



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E
BIOMÉDICAS**

JOSIVALDO GODOY DA SILVA

1216001533



Ilha Solteira - SP

Universidade Estadual Paulista

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Implementação de Sensores para Aplicações

Industriais e Biomédicas

Josivaldo Godoy da Silva

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho

Tese submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

1210001533



Área de Concentração: Automação

Ilha Solteira (SP)

Agosto de 2004

Proc. 063104-UNP 165104

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
<i>18.10.04</i>	<i>31.10.04</i>
REGISTRADO POR	TOMBO
<i>Ailza</i>	<i>Ta. 1533</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>Ilhas Autor R. 10.00</i>	<i>S586i</i>

*Co sup 226662
sup 56594
31302025*

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Silva, Josivaldo Godoy da
S586i Implementação de sensores para aplicações industriais e biomédicas /
Josivaldo Godoy da Silva . -- Ilha Solteira : [s.n.], 2004
xii, 106 p. : il.

Tese (doutorado) -- Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Engenharia de Ilha Solteira. Área de concentração: Automação, 2004

Orientador : Aparecido Augusto de Carvalho

Inclui bibliografia

1. Transdutores. 2. Transdutores biomédicos. 3. Transdutores de força.

UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE REGISTRO	31/30/2025
REGISTRADO POR	
CLASSIFICAÇÃO	
AQUISIÇÃO	

Implementação de Sensores para Aplicações Industriais e Biomédicas

JOSIVALDO GODOY DA SILVA

TESE SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

A. A. Carvalho
Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

A. A. Carvalho
Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho – orientador

Mauro Henrique de Paula
Prof. Dr. Mauro Henrique de Paula

Antonio Adilton Oliveira Carneiro
Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro

Haroldo M. Nagashima
Prof. Dr. Haroldo Naoyuki Nagashima

Rogério de Oliveira Rodrigues
Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues

Ilha Solteira-SP, agosto de 2004.



Agradecimentos

A implementação deste trabalho foi bem sucedida por causa do apoio que recebi de entidades de fomento e de diversas pessoas da universidade e fora dela, que com grande disposição investiram o tempo para ensinar, discutir e incentivar o desenvolvimento da pesquisa.

Fico grato às pessoas que me ajudaram e cujos nomes seguem abaixo com a finalidade de compartilhar o meu obito.

Miguel Angelo de Menezes, Emanuel da Rocha Wosky e Daniel Yvan Martin Delforge, professores do departamento de Engenharia Mecânica.

Sergio Kurukawa, Marcelo Minhoto Teixeira, Luis Fernando Bovoato, Uilson

Amor
do Departamento de Engenharia Elétrica
O Senhor é meu pastor e nada faltará, ele converteu a minha alma e
levou-me por veredas de justiça, por amor de seu nome.

Já estive no vale das sombras da morte e não temi o mal pois estavas comigo.

Haroldo Naciyuki Nacashima-professor do Departamento de Física
A tua vara e o teu báculo me consolaram.

Aprendi muito sobre tecnologia e ciência, mas também aprendi muito sobre
humildade, coragem, independência e bom senso com o professor Aparicio Augusto de
Carvalho
Preparaste uma mesa diante de mim, a vista dos que me odeiam.

Carvalho
Elétrica. Caso me
A tua misericórdia me acompanha a fim de que eu não pereça mas
habite na casa do Senhor por longos dias.

M
Bendito és Senhor porque se compadece do órfão e da viúva.

Antônio Adilson Oliveira Carneiro-professor do Departamento de Física da USP.

Jair Antônio Longo Junior-engenheiro eletrista.

Wanderley Ognemede Gerente do Laboratório de Engenharia Civil do QESP

Marco Marques-Gerente das Usinas Hidroelétricas do Rio São Paulo

QESP.

Dedico a Nosso Senhor Jesus Cristo



Agradecimentos

A implementação deste trabalho foi bem sucedida por causa do apoio que recebi de entidades de fomento e de diversas pessoas da universidade e fora dela, que com grande disposição investiram o tempo para ensinar, discutir e incentivar o desenvolvimento da pesquisa.

Fico grato às pessoas que me ajudaram e cujos nomes seguem abaixo com a finalidade de compartilhar o êxito obtido.

Miguel Ângelo de Menezes, Emanuel da Rocha Woisky e Daniel Yvan Martin Delforge, professores do departamento de Engenharia Mecânica.

Sérgio Kurokawa, Marcelo Minhoto Teixeira, Luís Fernando Bovolato, Dilson Amâncio Alves, Cláudio Kitano, Ricardo Tokio Higuti, Carlos Alberto Canesin, professores do Departamento de Engenharia Elétrica.

Rogério de Oliveira Rodrigues-professor do Departamento de Engenharia Civil.

Haroldo Naoyuki Nagashima-professor do Departamento de Física.

Aprendi muito sobre tecnologia e ciência, mas também aprendi muito sobre humildade, coragem, imparcialidade e bom senso com o professor Aparecido Augusto de Carvalho, que foi meu orientador nos cursos de mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica. Caso me tome docente, não tenho queixa da referência.

Mauro Henrique de Paula-professor do Departamento de Física da UFMS.

Antônio Adilton Oliveira Carneiro-professor do Departamento de Física da USP.

Jair Antônio Longo Júnior-engenheiro eletricitista.

Wanderley Ognemede-Gerente do Laboratório de Engenharia Civil da CESP.

Marco Marques-Gerente das Usinas Hidrelétricas de Ilha Solteira e Três Irmãos da CESP.



Finalmente agradeço à Universidade Estadual Paulista pela oportunidade concedida, às agências financiadoras CAPES pela bolsa de estudos concedida no período entre 2000 a 2001 e ao CNPq pela bolsa de estudos e pela reserva técnica que permitiu o desenvolvimento da pesquisa.

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

Abstract

Capítulo 1 - Visão Geral da Área e Descrição dos Capítulos	01
1.0 - Introdução	02
1.1 - Organização dos Capítulos	02
Capítulo 2 - Inclinômetro Bidirecional de Baixo Custo para Estruturas de Grande Porte	04
2.1 - Introdução	04
2.2 - Metodologia e Materiais	06
2.2.1 - Pontas de Wheatstone Principal e de Verificação	07
2.2.2 - Direções das Inclinações	08
2.2.3 - Sistema Mecânico de Referência	10
2.2.4 - Circuito de Condicionamento de Sinais	12
2.2.5 - Características Estatísticas do Inclinômetro Bidirecional	15
2.3 - Fundamentos Teóricos	17
2.3.1 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Superior	20
2.3.2 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Inferior	22
2.4 - Resultados Obtidos e Discussão	24

Sumário

Lista de Figuras	27
Lista de Tabelas	27
Resumo	29
Abstract	37
Capítulo 1 - Visão Geral da Área e Descrição dos Capítulos	01
1.0 - Introdução	02
1.1 - Organização dos Capítulos	02
Capítulo 2 - Inclinômetro Bidirecional de Baixo Custo para Estruturas de Grande Porte	04
2.1 - Introdução	04
2.2 - Metodologia e Materiais	06
2.2.1 - Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação	07
2.2.2 - Direções das Inclinações	08
2.2.3 - Sistema Mecânico de Referência	10
2.2.4 - Circuito de Condicionamento de Sinais	12
2.2.5 - Características Estáticas do Inclinômetro Bidirecional	15
2.3 - Fundamentos Teóricos	17
2.3.1 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Superior	20
2.3.2 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Inferior	22
2.4 - Resultados Obtidos e Discussão	24



2.5 - Conclusões	25
Referências Bibliográficas	26
Capítulo 3 - Extensômetro Capacitivo de Alta Sensibilidade e Baixo Custo	27
3.1 - Introdução	27
3.2 - Metodologia e Materiais Utilizados	29
3.2.1 - Circuito Eletrônico de Condicionamento de Sinais	37
3.2.2 - Comparação com um Sensor Capacitivo Convencional	41
3.3 - Resultados e Discussão	43
3.3.1 - Calibração Estática	43
3.4 - Conclusões	46
Referências Bibliográficas	46
Capítulo 4 - Dinamômetro Ergonômico Microcontrolado para Aplicações Biomédicas e Dinamômetro Eletrônico com Extensômetros Capacitivos	48
4.1 - Introdução	48
4. A - Implementação da Estrutura Mecânica dos Dinamômetros	50
4.2 - Metodologia e Materiais	50
4.3 - Fundamentos Teóricos	52
4.3.1 - Determinação dos Esforços na Face Externa da Região R_{12}	55
4.3.2 - Determinação dos Esforços na Face Externa da Região R_{34}	56
4.3.3 - Determinação da Espessura das Secções Transversais das regiões R_{12} e R_{34}	57
4.B - Implementação do Dinamômetro ER	59
4.4 - Metodologia e Materiais	59
4.5 - Fundamentos Teóricos	62



4.6 - Resultados Obtidos e Discussão	63
4.C - Implementação do Dinamômetro <i>EC</i>	64
4.7 - Materiais e Métodos	64
4.8 - Fundamentos Teóricos	67
4.9 - Resultados Obtidos e Discussão	69
4.10 - Conclusões	70
Referências Bibliográficas	71

Capítulo 5 - Sensor Capacitivo para a Determinação de Água em Óleo

Lubrificante

5.1 - Introdução	73
5.2 - Fundamentos Teóricos	77
5.2.1 - Dielétrico Constituído Unicamente por Óleo	77
5.2.2 - Dielétrico Constituído por Óleo e Água	78
5.2.3 - Determinação das Variações dos Volumes de Óleo e de Água	81
5.2.4 - Determinação do Volume de Água	81
5.2.5 - Determinação do Sinal Elétrico Produzido Pelos Sensores	85
5.3 - Metodologia e Materiais	91
5.3.1 - Estrutura Mecânica do Sensor Capacitivo	91
5.3.2 - Circuito de Condicionamento de Sinais	94
5.4 - Conclusões	100
Referências Bibliográficas	100

Capítulo 6 - Conclusões

6.1 - Conclusões	102
6.1.1 - Sensores para Aplicações Industriais	102



6.1.2 - Sensores para Aplicações Biomédicas	102
6.1.3 - Sensor de Aplicação Geral	103
6.2 - Resumo de Contribuições	103
6.3 - Pesquisa Futura	103
Publicações Decorrentes deste Trabalho	105
Publicados	105
Aceitos	105
Submissão à Revista	106
Solicitação de Patentes	106
Figura 2.1 – Estrutura mecânica do inclinômetro bidirecional	6
Figura 2.2 – Pontes de Wheatstone Pandapara e de Verificação	8
Figura 2.3 – Vista lateral do inclinômetro	9
Figura 2.4 – Sistema mecânico de referência	10
Figura 2.5 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais	12
Figura 2.6 – Blocos A, B e C do circuito de condicionamento de sinais	13
Figura 2.7 – Blocos D e E do circuito de condicionamento de sinais	13
Figura 2.8 – Fixação do inclinômetro bidirecional a estrutura mecânica	18
Figura 2.9 – Diagrama de forças que atuam no inclinômetro	17
Figura 2.10 – Gráficos de momentos flexores	20
Figura 2.11 – Curvas obtidas com a calibração do inclinômetro	24
Figura 3.1 – Ligação dos sensores capacitivos nas duas pontes completas	29
Figura 3.2 – Extensômetro α	31
Figura 3.3 – Vista lateral da estrutura do dispositivo capacitivo	31
Figura 3.4 – Vista superior do dispositivo capacitivo	32
Figura 3.5 – Sensor capacitivo	33
Figura 3.6 – Extensômetro capacitivo colado à barra	33
Figura 3.7 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais	37
Figura 3.8a – Circuito de entrada	38
Figura 3.8b – Circuito intermediário	39
Figura 3.8c – Circuito Final	39
Figura 3.9 – Sensor capacitivo convencional	41

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura mecânica do inclinômetro bidirecional.	6
Figura 2.2 - Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação.	8
Figura 2.3 - Vista lateral do inclinômetro.	9
Figura 2.4 - Sistema mecânico de referência	10
Figura 2.5 - Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.	12
Figura 2.6 - Blocos A, B e C do circuito de condicionamento de sinais.	13
Figura 2.7 - Blocos D e E do circuito de condicionamento de sinais.	13
Figura 2.8 - Fixação do inclinômetro bidirecional a estrutura mecânica.	16
Figura 2.9 - Diagrama de forças que atuam no inclinômetro.	17
Figura 2.10 - Gráficos de momentos fletores.	20
Figura 2.11 - Curvas obtidas com a calibração do inclinômetro.	24
Figura 3.1 - Ligação dos sensores capacitivos nas duas pontes completas.	29
Figura 3.2 - Extensômetro α .	31
Figura 3.3 - Vista lateral da estrutura do dispositivo capacitivo.	31
Figura 3.4 - Vista superior do dispositivo capacitivo.	32
Figura 3.5 - Sensor capacitivo.	33
Figura 3.6 - Extensômetro capacitivo colado à barra.	33
Figura 3.7 - Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.	37
Figura 3.8a - Circuito de entrada.	38
Figura 3.8b - Circuito intermediário.	39
Figura 3.8c - Circuito Final.	39
Figura 3.9 - Sensor capacitivo convencional.	41

Figura 3.10 - Resultados de simulação obtidos com o extensômetro capacitivo convencional.	42
Figura 3.11 - Resultados de simulação obtidos com o novo extensômetro capacitivo.	43
Figura 3.12 – Sistema mecânico utilizado para a calibração estática do sensor.	44
Figura 3.13 - Resposta estática do extensômetro.	44
Figura 4.1 - Foto da estrutura mecânica dos dinamômetros <i>ER</i> e <i>EC</i> .	50
Figura 4.2 - Desenho da estrutura mecânica.	51
Figura 4.3 - Esforços atuantes na barra de duralumínio.	53
Figura 4.4 - Gráfico de momento fletor na barra de duralumínio.	54
Figura 4.5 - Localização dos extensômetros resistivos.	59
Figura 4.6 – Barra de duralumínio com extensômetros resistivos.	60
Figura 4.7 - Ponte de Wheatstone.	60
Figura 4.8 – Foto que ilustra como foi realizado o teste estático.	61
Figura 4.9 – Esquema elétrico do circuito de condicionamento de sinais.	61
Figura 4.10 – Curva de calibração do dinamômetro <i>ER</i> .	63
Figura 4.11 - Resposta do dinamômetro <i>ER</i> com o ponto de aplicação da força.	64
Figura 4.12 - Localização dos dispositivos sensores D_{SA} e D_{SB} .	65
Figura 4.13 – Ligações dos extensômetros α e ϕ .	66
Figura 4.14 - Extensômetro α .	67
Figura 4.15 - Curva de calibração do dinamômetro <i>EC</i> .	69
Figura 4.16 – Resposta do dinamômetro <i>EC</i> com o ponto de aplicação da força.	70
Figura 5.1 – Mancal de escora inutilizado.	71
Figura 5.2 – Aquecimento exagerado e presença de sulfeto de cobre.	74



Figura 5.3 – Capacitor de placas paralelas com dielétrico constituído unicamente por óleo.	77
Figura 5.4 – Capacitor de placas paralelas com dielétrico constituído por óleo e água.	79
Figura 5.5 - Relação entre a capacitância C_{df} e a permissividade dielétrica ξ_{dr} .	80
Figura 5.6 - Relação entre capacitâncias, permissividades dielétricas e volumes de óleo e água.	82
Figura 5.7 – Ponte de sensores capacitivos.	85
Figura 5.8 – Resultado de simulações do sensor capacitivo.	90
Figura 5.9 - Estrutura do sensor capacitivo implementado.	91
Figura 5.10 - Desenho da barra de acrílico.	92
Figura 5.11 – Foto da barra de acrílico.	93
Figura 5.12 - Fotos dos suportes e recipiente de acrílico.	93
Figura 5.13 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.	95
Figura 5.14a - Blocos A, B e C.	96
Figura 5.14b - Blocos D e E.	96
Figura 5.14c - Blocos F e G.	97
Figura 5.14d - Filtro ativo passa-faixa.	97
Figura 5.14e – Detector de pico.	98



Resumo

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Componentes dos extensômetros α e ϕ	30
Tabela 3.2 – Dimensões dos eletrodos.....	32

Resumo

O trabalho consistiu no desenvolvimento de cinco novos sensores: um inclinômetro bidirecional de baixo custo, um extensômetro capacitivo de elevada sensibilidade, um dinamômetro ergonômico microcontrolado para medição de forças exercidas pelos dedos e pelas mãos, desenvolvido com extensômetros resistivos, um dinamômetro biomédico desenvolvido com extensômetros capacitivos e um sensor projetado para medir concentração de água em óleos lubrificantes. Os sensores desenvolvidos encontram aplicações em Engenharia Biomédica e na Indústria. Foram realizados testes com os sensores de maneira a se determinar as principais características de cada um deles. As principais características do inclinômetro bidirecional são: resposta linear, coeficiente de correlação linear igual a 0,999, sensibilidade de $1,20 \text{ V}^\circ$ para a saída do circuito de condicionamento de sinais. A histerese obtida foi de 1,6% e a resolução de $0,08^\circ$. O sensor é robusto e de alta confiabilidade. Para o extensômetro capacitivo obteve-se as seguintes características: apresenta alta sensibilidade e baixo custo, sendo a sensibilidade 820 vezes maior que a de um extensômetro convencional. A resposta é linear, apresenta histerese de 2,7% e a resolução foi de 0,009 N. Os resultados obtidos com o dinamômetro microcontrolado desenvolvido com extensômetros resistivos para se efetuar medições de forças exercidas pelos dedos e pela mão são os seguintes: resposta linear, histerese inferior a 1%, precisão de 99,3%, sensibilidade de $0,024 \text{ V/N}$, acurácia de 0,9 N, resposta independente do ponto de aplicação da força, tempo de resposta de 7 ms. Os resultados indicam que o aparelho poderá ser muito útil nas áreas de Medicina de Reabilitação, Engenharia Biomédica, Biomecânica e Fisioterapia. Com o dinamômetro desenvolvido com extensômetros capacitivos obteve-se as seguintes característica: resposta linear, histerese de 2,5%, precisão de 98,8%, sensibilidade de $0,041 \text{ V/N}$, a resposta não depende do ponto de aplicação da força, possui boas características ergonômicas, e possibilidade de apresentação do resultado da medição em *display* digital ou na tela de um computador.



Através de equacionamento da teoria do capacitor de placas paralelas, desenvolveu-se um modelo teórico de sensor capacitivo cujas simulações apresentam sensibilidade adequada para medir teor de água em óleo, com resolução melhor que 0,1%. O protótipo é robusto e de fácil construção. Os sensores de forma geral apresentam simplicidade de construção e versatilidade para operação sendo as respostas, adequadas as finalidades propostas.



Abstract

The research consisted of the of new five sensors implementation: a low cost bi-directional inclinometer, an capacitive strain gage of high sensitivity, a microcontrolled dynamometer ergonomic for mensuration of forces exercised by the fingers and for the hands, being used resistives strain gages, a biomedical dynamometer developed with capacitives strain gages and a sensor, one is projected to measure water concentration in lubricating oils. The sensor developed found applications in the Biomedical and Industrial Engineering areas. The main characteristics of bi-directional inclinometer are: lineal answer, coefficient of lineal correlation the same to 0,999, sensitivity of $1,20 \text{ V}^\circ$ for the exit of the conditioning circuit of Wheatstone Bridge signs that contain the strain gages glued in the walls hole. The obtained hysteresis was of 1,6% and the resolution of $0,08^\circ$. The sensor is robust and of high reliability. The characteristics obtained for the capacitive strain gage were the following ones: It presents sensitivity of 8.7 V/N and fall time of 12 ms, being the sensitivity 820 times larger than the one of a conventional extensômetro. The answer is lineal, it presents hysteresis of 2,7% and the resolution was of 0,009 N. The equationing indicates that the answer of the sensor doesn't depend on the temperature and of the frequency of the feeding sign. The results obtained with the microcontrolled dynamometer that uses strain gages to make mensurations of forces exercised by the fingers and for the hand they are the following ones: lineal answer, inferior hysteresis at 1%, precision of 99,3%, sensitivity of $0,024 \text{ V/N}$, acurácia of 0,9 N, independent answer of the application point of the force, answer time of 7 ms, good ergonomic characteristics, use easiness. The results indicate that the apparel can be very useful in the areas of Medicine of Rehabilitation, Biomedical Engineering, Biomechanics and Physiotherapy. The characteristics of the results gotten with the dynamometer that uses capacitives strain gages are the following ones: lineal answer, hysteresis of 2,5%, precision of 98,8%, sensitivity of $0,041 \text{ V/N}$, the answer doesn't depend on the point of application of the force, it owns good ergonomic



characteristics, and possibility of result presentation of the mensuration in digital display or a computer screen. The developed dynamometer can be useful for physiotherapists and doctors that work in rehabilitation medicine, etc. it was obtained by means of equations of the capacitor theory of parallel plates, a theoretical model of capacitive sensor whose simulations present sensitivity adapted to measure text of water in oil, with better resolution than 0,1%. The sensors answers appropriate the purposes proposals.

No último Congresso de Instrumentação e Medidas, organizado e promovido pelo IEEE Instrumentation and Measurement Society (XXI Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC 2004), realizado em Como, na Itália, em maio de 2004, esta tecnologia é hoje, extremamente importante para integrar sistemas de medições e de controle.

Espera-se que o mercado mundial de sensores atinja 43 bilhões de dólares em 2008. Nosso país não pode ficar à margem e obter o progresso que vem ocorrendo neste campo e foi necessário todo o recurso humano e grupos de pesquisas fortes que possam contribuir com a sociedade brasileira desenvolvendo novos tipos de sensores e propor novas aplicações para a grande gama de sensores existentes.

No Brasil, não há muitas grupos que trabalhem nesta área. No Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, foi criado, em 1985, o Laboratório de Sensores. Neste laboratório, tem sido implementados principalmente sensores tácteis para aplicações em Engenharia de Reabilitação, mas também sensores piezoelétricos para medição de radiação α e sensores compostos piezoelétricos.

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de cinco novos sensores: um indômetro de passo ativo, um extensômetro capacitivo de elevada sensibilidade, um dinamômetro ativo de câpulas para medição de forças pelos dedos e pelas mãos, um dinamômetro biomédico com extensômetros capacitivos e um sensor projetado para medir concentração de água em óleos lubrificantes.

Capítulo 1

Visão Geral da Área e Descrição dos Capítulos

1.1 – Organização dos Capítulos

1.0 - Introdução

No último Congresso de Instrumentação e Medidas, organizado e promovido pelo IEEE Instrumentation and Measurement Society (XXI Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2004) realizado em Como, na Itália, em maio do corrente ano, dezenas de artigos relacionados à tecnologia de sensores foram apresentados. Esta tecnologia é, hoje, reconhecidamente importante para integrar sistemas de medições e de controle.

Espera-se que o mercado mundial de sensores atinja 43 bilhões de dólares em 2008. Nosso país não pode ficar à margem de todo o progresso que vem ocorrendo neste campo e há necessidade de recursos humanos e grupos de pesquisas fortes que possam contribuir com a sociedade brasileira, desenvolvendo novos tipos de sensores e propondo novas aplicações para a grande gama de sensores existentes.

No Brasil, não há muitos grupos que trabalham nesta área. No Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, foi criado, em 1995, o Laboratório de Sensores. Neste laboratório, tem sido implementados principalmente sensores tácteis para aplicações em Engenharia de Reabilitação, mas também sensores piroelétricos para medição de radiação X e sensores compósitos piezoelétricos.

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de cinco novos sensores: um inclinômetro de baixo custo, um extensômetro capacitivo de elevada sensibilidade, um dinamômetro ergonômico microcontrolado para medição de forças exercidas pelos dedos e pelas mãos, um dinamômetro biomédico com extensômetros capacitivos e um sensor projetado para medir concentração de água em óleos lubrificantes.



São apresentados a teoria que fundamenta a operação desses dispositivos, as considerações de projeto, detalhes de construção e os experimentos realizados visando a determinação de suas principais características estáticas e dinâmicas.

1.1 – Organização dos Capítulos

O Capítulo 2 descreve o desenvolvimento de um inclinômetro, construído com extensômetros metálicos, projetado para medir ângulo de inclinação de estruturas de grande porte.

O Capítulo 3 apresenta a implementação de um extensômetro (*strain gage*) capacitivo de alta sensibilidade e baixo custo. O dispositivo pode monitorar a si próprio, aumentando a confiabilidade do sistema de medição. O sensor implementado foi comparado com um extensômetro capacitivo convencional.

No Capítulo 4 é descrito o desenvolvimento de dois dinamômetros biomédicos ergonômicos.

Os dinamômetros utilizam a mesma estrutura mecânica de apoio sendo que o primeiro dinamômetro foi implementado com extensômetros resistivos e utiliza um microcontrolador no circuito de condicionamento de sinais que facilita sua utilização pelo usuário e possibilita armazenamento em memória de resultados de medições de forças exercidas pelos dedos e pelas mãos. O segundo dinamômetro foi implementado com extensômetros capacitivos descritos no Capítulo 3 e possui um circuito de condicionamento menor.

O Capítulo 5 descreve um sensor projetado para medir concentração de água em óleos lubrificantes. A contaminação de óleo lubrificante por água é um problema que ocorre com frequência em unidades geradoras de usinas hidrelétricas. É desejável que o dispositivo de medição possa medir concentrações de água com resolução de 0,1% em volume. O sensor implementado é um conjunto de 17 sensores capacitivos, que podem ser



configurados de diferentes formas. Foi desenvolvido um modelo teórico para o sensor e são apresentados os resultados de simulação.

Inclinômetro Bidirecional de Baixo Custo para Estruturas de Grande Porte

2.1 - Introdução

Em se tratando de verificação da segurança de sistemas estruturais verticais, tais como edifícios, torres e pontes, um dos grandes problemas é o rescalque diferencial que pode ocorrer no sistema de fundação, provocando uma inclinação estrutural incompatível com os valores prescritos em projeto. Como exemplo extremo, pode-se mencionar alguns edifícios construídos na Avenida Paulista – SP, onde as inclinações apresentadas pelos sistemas estruturais são tão acentuadas que comprometem a segurança dos mesmos de forma definitiva.

Neste contexto, um sensor, de uso permanente, para a medição do ângulo de inclinação (inclinômetro) de estruturas possibilita detectar, de forma precoce, o surgimento de uma inclinação incompatível com o sistema estrutural, possibilitando que seja planejado o reparo da estrutura, com redução significativa de custos de manutenção.

Os sensores de inclinação são chamados de inclinômetros quando medem ângulos em relação ao eixo vertical mediante o deslocamento horizontal. São denominados clinômetros quando medem ângulos em relação ao eixo horizontal havendo deslocamento vertical.

Powell e Pfeiffer (2000) desenvolveram um sensor de inclinação eletrônico baseado na fácil utilização e estabilidade e confiabilidade. Este sensor pode medir ângulos na faixa de -60° a $+60^\circ$. O sensor pode ser aplicado no controle de inclinação de antenas, aviãoica, no controle remoto de veículos, testes automáticos, testes de vibração, monitoramento de ângulo, etc.

Capítulo 2

Inclinômetro Bidirecional de Baixo Custo para Estruturas de Grande Porte

2.1 - Introdução

Em se tratando da verificação da segurança de sistemas estruturais verticais, tais como edifícios, torres e pontes, um dos grandes problemas é o recalque diferencial que pode ocorrer no sistema de fundação, provocando uma inclinação estrutural incompatível com os valores prescritos em projeto. Como exemplo extremo, pode-se mencionar alguns edifícios construídos na Baixada Santista – SP, onde as inclinações apresentadas pelos sistemas estruturais são tão acentuadas que comprometem a segurança dos mesmos de forma definitiva.

Neste contexto, um sensor, de uso permanente, para a medição do ângulo de inclinação (inclinômetro) de estruturas possibilita detectar, de forma precoce, o surgimento de uma inclinação incompatível do sistema estrutural, propiciando que seja planejado o reparo da estrutura, com redução significativa de custo do mesmo.

Os sensores de inclinação são chamados de inclinômetros quando medem ângulo em relação ao eixo vertical mediante o deslocamento horizontal. São denominados clinômetros quando medem ângulos em relação ao eixo horizontal havendo deslocamento vertical.

Powell e Pheifer (2000) desenvolveram um sensor de inclinação eletrolítico barato e de fácil utilização que apresenta boa receptibilidade e confiabilidade, com capacidade para medir ângulos na faixa de -60° a $+60^\circ$. O sensor pode ser aplicado no posicionamento de antenas, aviônica, no controle remoto de veículos, testes automotivos, testes de vibração, monitoramento de ângulo, etc.



Puccio (2003) desenvolveu um inclínômetro compacto e robusto que possui um circuito eletrônico constituído por um microcontrolador e um sistema computacional. O dispositivo é capaz de corrigir a linearidade e realizar a calibração remota do sensor. O inclínômetro apresenta excelente repetibilidade, mesmo quando submetido às condições ambientais rigorosas e instáveis. Mede ângulos de inclinação na faixa de -60° a $+60^\circ$.

Singer e Singer (2003) desenvolveram um servo inclínômetro capaz de realizar auto ajuste de zero apresentando estabilidade por longos períodos de tempo. Possui aplicação em ensaios que exigem grande precisão por tempo prolongado. É capaz de operar em ambientes que apresentem grandes variações térmicas como, por exemplo, de -25°C a $+65^\circ\text{C}$.

Lyuan (2004) desenvolveu um inclínômetro constituído de fibra óptica e um pêndulo paralelogramo. O inclínômetro opera segundo a ação da gravidade, medindo a variação angular entre a linha de referência vertical na estrutura civil e a direção da gravidade. Utilizou-se a técnica de interferometria de Mach-Zehnder e uma fibra óptica de baixa coerência. O inclínômetro realiza medidas na faixa de -5° a $+5^\circ$, podendo ser utilizado em prédios comerciais, residenciais, torres, pontes, etc. Possui pequeno tamanho tornando-o adequado para operar ao ar livre. Apresenta resolução de $0,2'$ e uma acurácia de $1'$ de fundo de escala.

Os inclínômetros mencionados são tecnologicamente sofisticados e de custo elevado. Nenhum deles foi implementado com extensômetros resistivos.

O objetivo desta pesquisa foi o desenvolvimento de um medidor de inclinação bidirecional, de baixo custo, para monitorar estruturas de grande porte.



2.2 - Metodologia e Materiais

A Figura 2.1 ilustra a estrutura mecânica do inclinômetro bidirecional implementado.

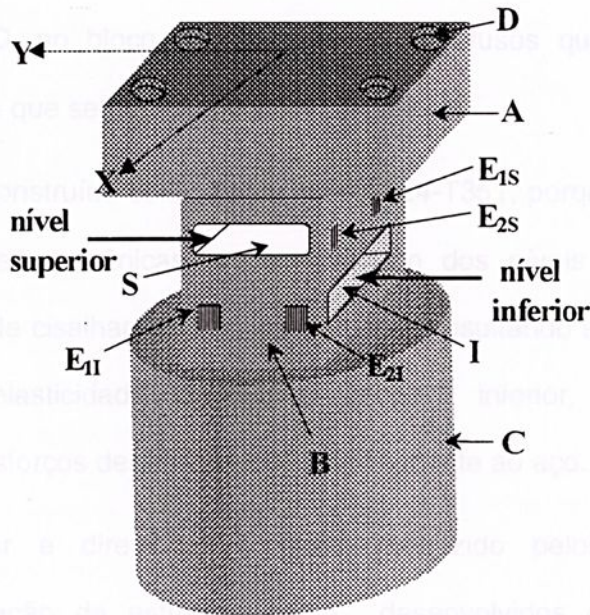


Figura 2.1 - Estrutura mecânica do inclinômetro bidirecional.

As partes que compõem o corpo do inclinômetro, mostrado esquematicamente na Figura 2.1, são as seguintes:

A: bloco de aço; B: bloco de duralumínio 2024-T351; C: bloco de aço; D: orifício para a introdução de parafusos; S: orifício do nível superior; I: orifício do nível inferior; E_{1s} e E_{2s} : extensômetros resistivos 1 e 2 colados na parede do orifício do nível superior; E_{1i} e E_{2i} : extensômetros resistivos 1 e 2 colados na parede do orifício do nível inferior.

A estrutura foi projetada objetivando medir-se ângulos de inclinação segundo os eixos ortogonais X e Y. É constituída de três blocos (A, B e C) interligados entre si através de parafusos.

As dimensões dos blocos A, B e C são, respectivamente: 80 mm x 40 mm x 20 mm, 40 mm x 40 mm x 60 mm e 80 mm x 70 mm de diâmetro.

Os blocos A e C foram construídos em aço AISI 420 que apresenta resistência mecânica, massa e resistência à oxidação superiores à maioria dos metais. O bloco A sustenta o corpo do inclínômetro na posição adotada, enquanto o bloco C, devido a sua massa, desloca-se na direção e com intensidade proporcionais à inclinação da estrutura. Os quatro orifícios D, no bloco A, são para os parafusos que servem para fixar o inclínômetro à estrutura que se deseja monitorar.

O bloco B foi construído com duralumínio 2024-T351, porque este metal apresenta excelentes propriedades mecânicas em se tratando dos níveis de tensão normal no escoamento e tensão de cisalhamento no escoamento, resultando em grande versatilidade. Possui módulo de elasticidade longitudinal (Young) inferior, resultando em maior sensibilidade com os esforços desenvolvidos, relativamente ao aço.

Para maximizar e direcionar o efeito produzido pelos esforços mecânicos decorrentes da inclinação da estrutura foram desenvolvidos dois orifícios idênticos, retangulares, passantes e orientados segundo os eixos perpendiculares X e Y.

Cada orifício mede 39,3 mm de largura e 15 mm de altura.

Devido aos orifícios localizados nos níveis superior S e inferior I, ocorre a concentração de tensões mecânicas nas duas paredes laterais de cada orifício, provocando o surgimento de grandes deformações. Por isto, as faces externas das paredes dos orifícios superior e inferior são as regiões mais adequadas para a colagem de extensômetros resistivos.

2.2.1- Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação

Em cada uma das faces externas das paredes de um mesmo orifício foram colados quatro extensômetros. Foram utilizados extensômetros resistivos modelo TA-13-060HB-350L (Excel). Os oito extensômetros, colados nas duas paredes do orifício, foram conectados em duas Pontes de Wheatstone independentes e idênticas, denominadas Ponte de Wheatstone Principal e Ponte de Wheatstone de Verificação, ligadas em paralelo.



A Figura 2.2 mostra a ligação dos extensômetros resistivos nas Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação, coladas nas paredes do orifício superior.

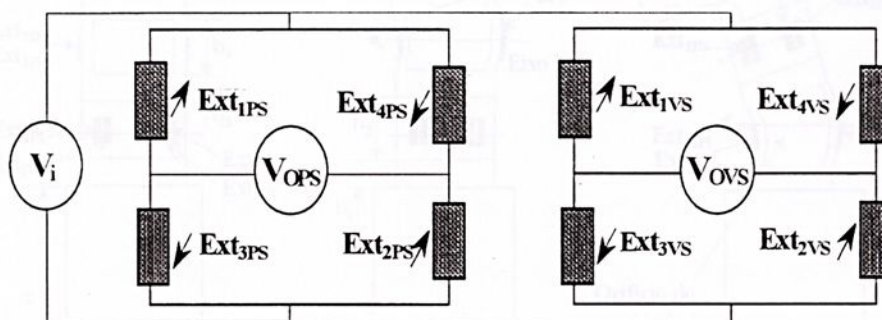


Figura 2.2 - Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação.

Na Figura 2.2 foram definidos os seguintes parâmetros:

V_{POS} e V_{OVS} : tensões de saída das Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação para o nível superior; V_i : tensão de alimentação das Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação; Ext_{1PS} , Ext_{2PS} , Ext_{3PS} e Ext_{4PS} : extensômetros resistivos da Ponte de Wheatstone Principal do orifício superior; Ext_{1VS} , Ext_{2VS} , Ext_{3VS} e Ext_{4VS} : extensômetros resistivos da Ponte de Wheatstone de Verificação do orifício superior.

As Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação monitoram, simultaneamente, as mesmas deformações e têm suas saídas (V_{OPS} e V_{OVS}) ligadas em circuitos de condicionamento de sinais independentes. A utilização de duas Pontes de Wheatstone para cada nível, superior e inferior, possibilita verificar continuamente as respostas e efetuar comparação das saídas dos circuitos de condicionamento, aumentando significativamente a confiabilidade do sistema de medição.

2.2.2 - Direções das Inclinações

Na Figura 2.3 são apresentadas três situações que podem ocorrer com o inclinômetro bidirecional.

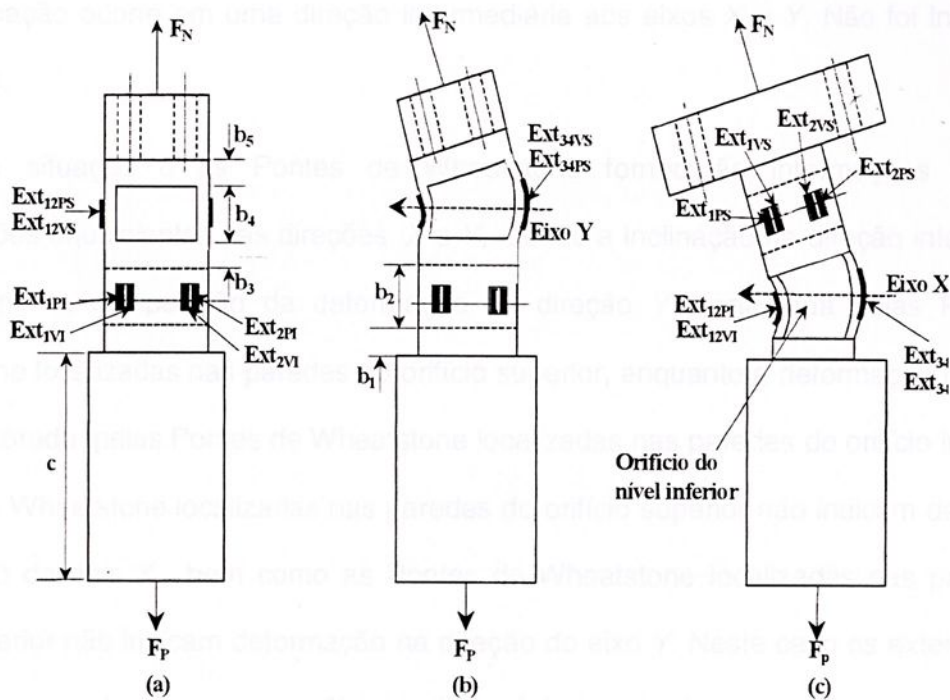


Figura 2.3 - Vista Lateral do Inclinoômetro.

Na Figura 2.3 são mostrados as seguintes partes do inclinômetro:

Ext_{12PS} : extensômetros resistivos 1 e 2 da Ponte de Wheatstone Principal, instalados nas paredes do orifício superior; Ext_{12VS} : extensômetros resistivos 1 e 2 da Ponte de Wheatstone de Verificação, instalados nas paredes do orifício superior; Ext_{12PI} : extensômetros resistivos 1 e 2 da Ponte de Wheatstone Principal, instalados nas paredes do orifício inferior; Ext_{12VI} : extensômetros resistivos 1 e 2 da Ponte de Wheatstone de Verificação, instalados nas paredes do orifício inferior. b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 e b_6 representam dimensões de algumas partes do inclinômetro.

Com o inclinômetro posicionado segundo o eixo vertical, pode haver quatro situações:

- (a): não houve inclinação da estrutura;
- (b): inclinação da estrutura na direção do eixo Y;
- (c): inclinação da estrutura na direção do eixo X;

(d): inclinação ocorre em uma direção intermediária aos eixos X e Y . Não foi indicada na Figura 2.3.

Na situação d as Pontes de Wheatstone fornecerão informações sobre as deformações equivalentes nas direções X e Y , sendo a inclinação na direção intermediária obtida com a composição da deformação na direção Y monitorada pelas Pontes de Wheatstone localizadas nas paredes do orifício superior, enquanto a deformação na direção X é monitorada pelas Pontes de Wheatstone localizadas nas paredes do orifício inferior. As Pontes de Wheatstone localizadas nas paredes do orifício superior não indicam deformação na direção do eixo X , bem como as Pontes de Wheatstone localizadas nas paredes do orifício inferior não indicam deformação na direção do eixo Y . Neste caso os extensômetros colados nas paredes do mesmo orifício indicam deformação de mesma amplitude e mesmo sentido.

2.2.3 - Sistema Mecânico de Referência

A Figura 2.4 mostra duas fotos do sistema mecânico de referência do ângulo de inclinação, utilizado para calibrar o inclinômetro.

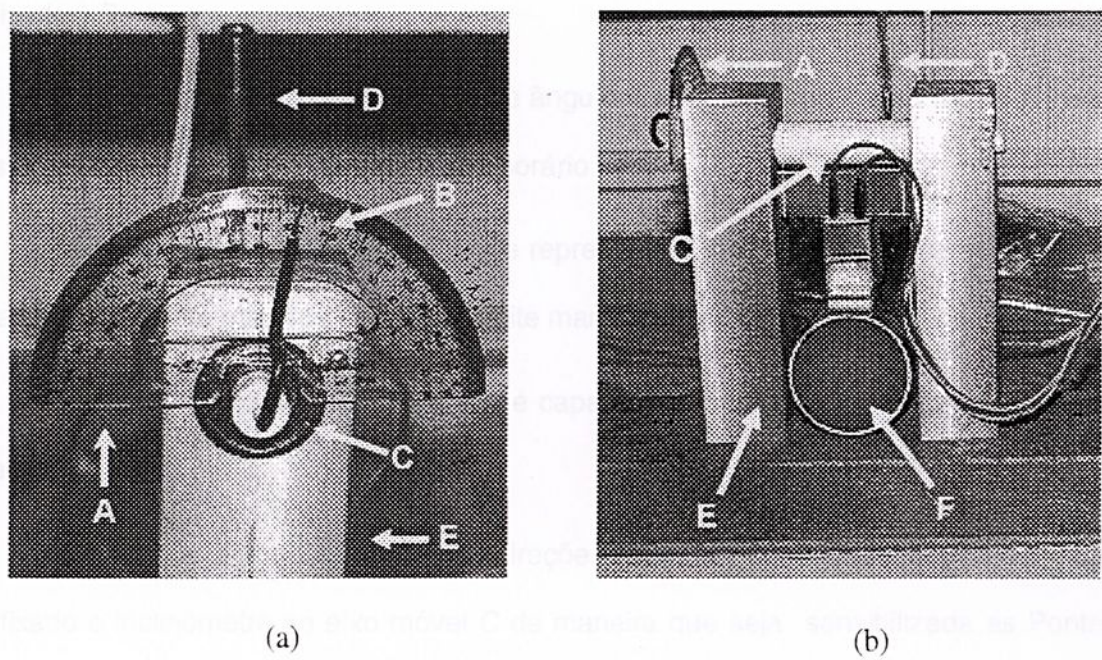


Figura 2.4 – Sistema mecânico de referência.

(a) – Vista frontal.

(b) – Vista lateral.

As partes que compõem o sistema de referência, apresentado na Figura 2.4, são as seguintes: *A*: medidor de ângulo; *B*: indicador de inclinação; *C*: eixo móvel horizontal de sustentação; *D*: haste para manuseio do eixo móvel; *E*: suportes resistivos para o eixo móvel.

sendo *F* a vista lateral de um inclinômetro unidirecional.

O inclinômetro *F* foi fixado verticalmente ao sistema mecânico de referência através do eixo móvel horizontal *C*.

As extremidades do eixo móvel *C* são fixadas em dois rolamentos embutidos nos suportes metálicos *E* dispostos nos extremos do eixo móvel *C*.

Os rolamentos tem a finalidade de impedir deslocamentos horizontais e verticais do eixo móvel *C* mas permitir o giro do mesmo.

Na Figura 2.4a é apresentado um medidor de ângulo *A* (com escala em graus) fixado ao suporte metálico *E* frontal enquanto ao eixo móvel *C* fixou-se um ponteiro (indicador) *B*.

O ponteiro *B* percorre o medidor de ângulo *A* a medida que o eixo móvel *C* gira seja no sentido horário ou seja no sentido anti-horário.

Para produzir o giro do eixo *C*, que representa a inclinação do sistema estrutural foi instalado uma haste metálica *D* que permite manusear convenientemente o eixo móvel *C*.

O sistema mecânico de referência é capaz de monitorar a inclinação do sensor em uma única direção.

Para determinar a inclinação nas direções *X* e *Y* é necessário mudar a posição que foi fixado o inclinômetro ao eixo móvel *C* de maneira que seja sensibilizada as Pontes de

Wheatstone constituídas pelos extensômetros colados nas paredes do orifício superior e posteriormente pelos extensômetros colados nas paredes do orifício inferior.

2.2.4 – Circuito de Condicionamento de Sinais

O circuito eletrônico de condicionamento de sinais implementado é simples, compacto e de baixo custo.

Foram implementados quatro circuitos de condicionamento de sinais idênticos e independentes, sendo dois circuitos de condicionamento de sinais para as duas Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação que contêm os extensômetros colados nas paredes do orifício superior. Outros dois circuitos de condicionamento de sinais para as duas Pontes de Wheatstone Principal e de Verificação que contêm os extensômetros colados nas paredes do orifício inferior.

A Figura 2.5 mostra os blocos que constituem o circuito de condicionamento de sinais. Em A há uma fonte de tensão constante e um *buffer*, em B uma ponte com extensômetros resistivos, em C um amplificador diferença, em D um amplificador somador e em E um filtro passa baixa.

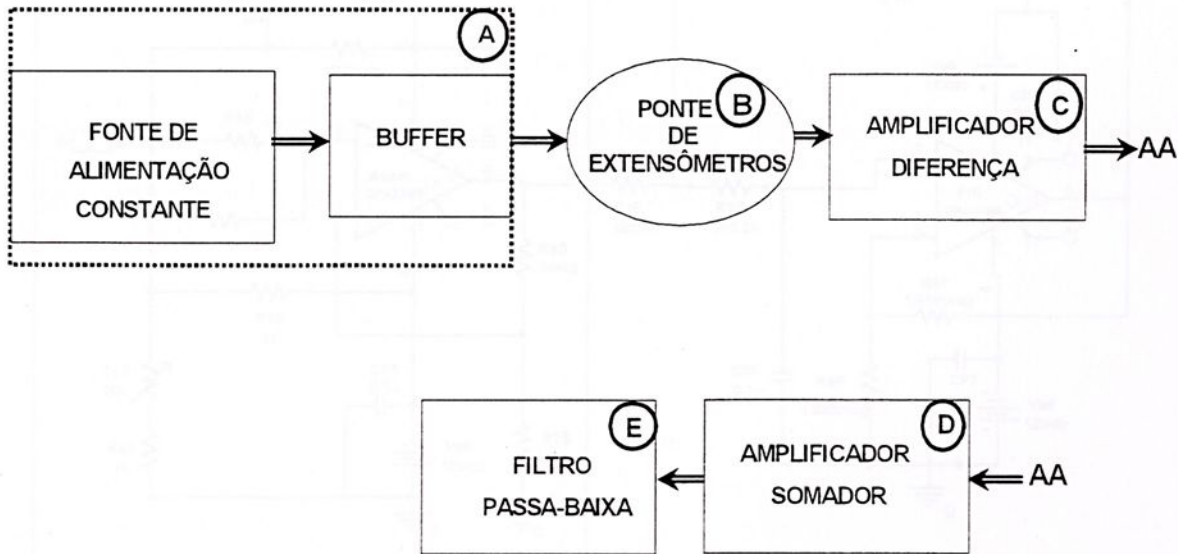


Figura 2.5 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram os blocos que constituem o circuito de condicionamento de sinais.

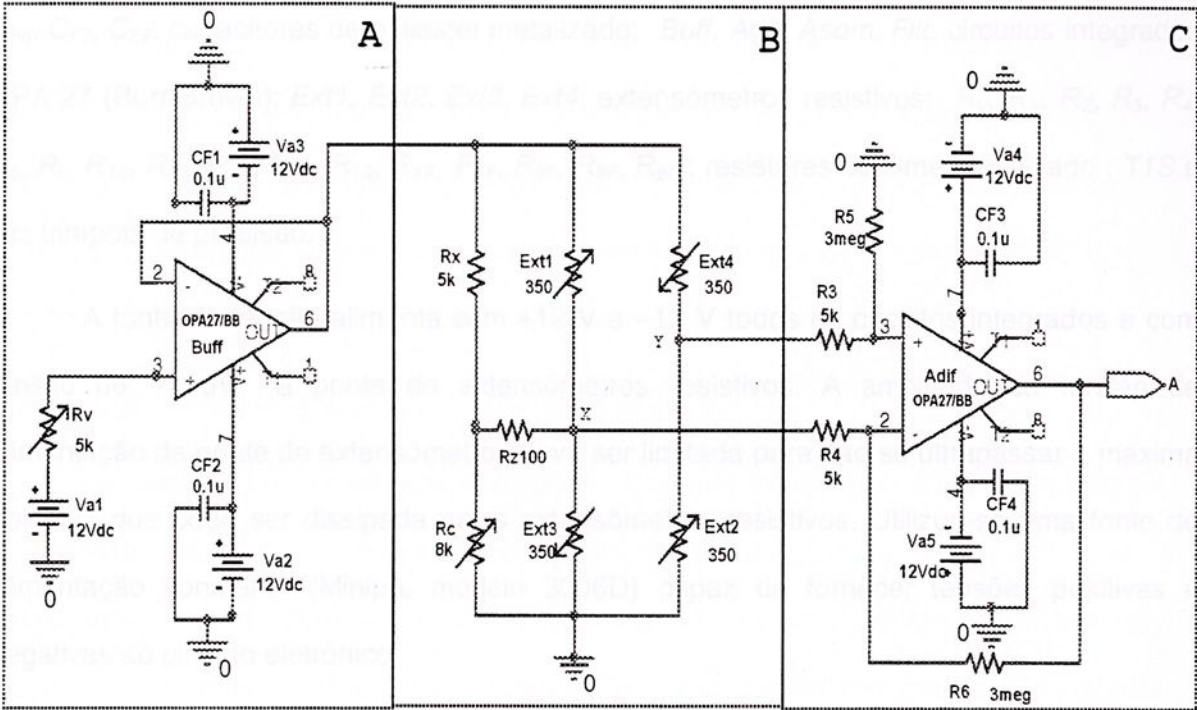


Figura 2.6 – Blocos A, B e C do circuito de condicionamento de sinais.

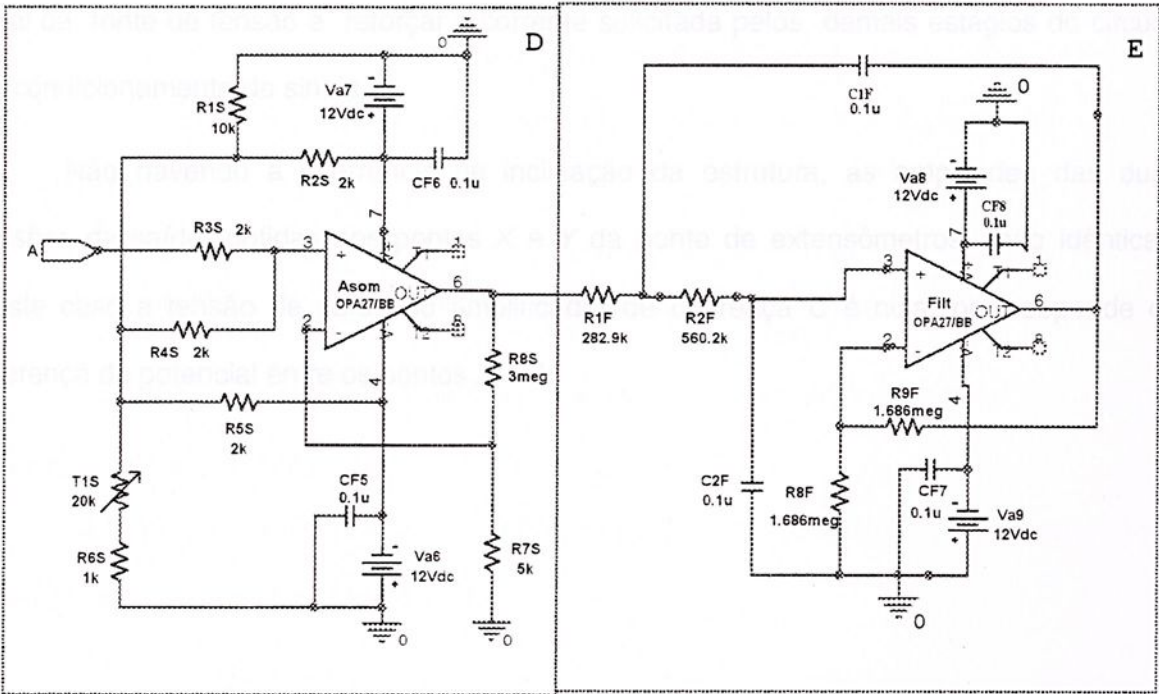


Figura 2.7 – Blocos D e E do circuito de condicionamento de sinais.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 foram definidos os seguintes parâmetros: V_{a2} , V_{a4} , V_{a7} , V_{a8} : alimentação com tensão positiva +12 V; V_{a3} , V_{a5} , V_{a6} , V_{a9} : alimentação com tensão negativa -12 V; V_{a1} : alimentação constante para a ponte de extensômetros; C_{F1} , C_{F2} , C_{F3} , C_{F4} , C_{F5} , C_{F6} , C_{F7} , C_{F8} : capacitores de políester metalizado; *Buff*, *Adif*, *Asom*, *Filt*: circuitos integrados OPA 27 (Burr-Brown); *Ext1*, *Ext2*, *Ext3*, *Ext4*: extensômetros resistivos; R_V , R_X , R_Z , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , R_{1S} , R_{2S} , R_{5S} , R_{6S} , R_{7S} , R_{8S} , R_{1F} , R_{2F} , R_{8F} , R_{9F} : resistores de filme metalizado; $T1S$ e Rc : trimpots de precisão.

A fonte de tensão alimenta com +12 V e -12 V todos os circuitos integrados e com tensão de +10V a ponte de extensômetros resistivos. A amplitude da tensão de alimentação da ponte de extensômetros deve ser limitada para não se ultrapassar a máxima potência que pode ser dissipada pelos extensômetros resistivos. Utilizou-se uma fonte de alimentação constante (Minipa, modelo 3006D) capaz de fornecer tensões positivas e negativas ao circuito eletrônico.

Todos os circuitos integrados utilizados são da família OPA 27 (Burr-Brown).

A ponte de extensômetros *B* é alimentada através do *buffer* cuja finalidade é isolar o sinal da fonte de tensão e reforçar a corrente solicitada pelos demais estágios do circuito de condicionamento de sinais.

Não havendo a ocorrência de inclinação da estrutura, as amplitudes das duas tensões de saída, obtidas nos pontos *X* e *Y* da ponte de extensômetros, são idênticas. Neste caso a tensão de saída do amplificador de diferença *C* é nula, pois depende da diferença de potencial entre os pontos *X* e *Y*.

Havendo ocorrência de inclinação, as tensões nos pontos X e Y são diferentes. A diferença de potencial não é nula, sendo amplificada pelo amplificador diferença C , com ganho de 6.10^2 .

A saída do amplificador diferença C foi conectada à entrada do amplificador somador não inversor D , que é responsável por nova amplificação, além de possibilitar a correção do desnível de tensão provocado por eventual instabilidade do circuito integrado do amplificador diferença C e do seu próprio circuito integrado. A correção do desnível de tensão é realizada através do trimpot T1S.

O ganho nos dois estágios de amplificação é $3,6.10^5$.

Na saída do amplificador somador D conectou-se um filtro passa-baixa E (Butterworth) de segunda ordem, com frequência de corte de 4 Hz e ganho 2. As inclinações de estruturas de grande porte ocorrem de forma muito lenta. Por isto a frequência de corte do filtro é baixa, visando eliminar o efeito provocado por oscilações naturais das estruturas que podem acontecer em frequências maiores.

O ganho de tensão total do circuito de condicionamento foi de $7,2.10^5$.

Os capacitores, ligados em paralelo com as alimentações dos circuitos integrados, constituem filtros para atenuar sinais de interferência de altas frequências gerados externamente.

2.2.5 – Características Estáticas do Inclinômetro Bidirecional

Visando a determinação das características estáticas do inclinômetro bidirecional, realizou-se um experimento em duas etapas.

Na primeira etapa fixou-se o inclinômetro ao eixo móvel horizontal de sustentação C na posição apresentada na Figura 2.8a.

O inclinômetro foi posicionado de maneira a produzir deformações nas paredes do orifício superior na direção eixo Y , à medida que o eixo móvel girava.



O eixo móvel foi girado, gradativamente, no sentido horário de 0° a $+6^\circ$, retornando gradativamente até 0° . Na sequência o mesmo procedimento foi realizado, agora no sentido anti-horário de 0° a -6° .

Na segunda etapa fixou-se o inclinômetro ao eixo móvel horizontal de sustentação C na posição apresentada na Figura 2.8b.

O inclinômetro foi posicionado de maneira a produzir deformações nas paredes do orifício inferior, segundo o eixo X, à medida que o eixo móvel girava. Repetiu-se o procedimento utilizado na primeira etapa. O passo utilizado para a medição do ângulo, em ambas as etapas, foi de 1° .

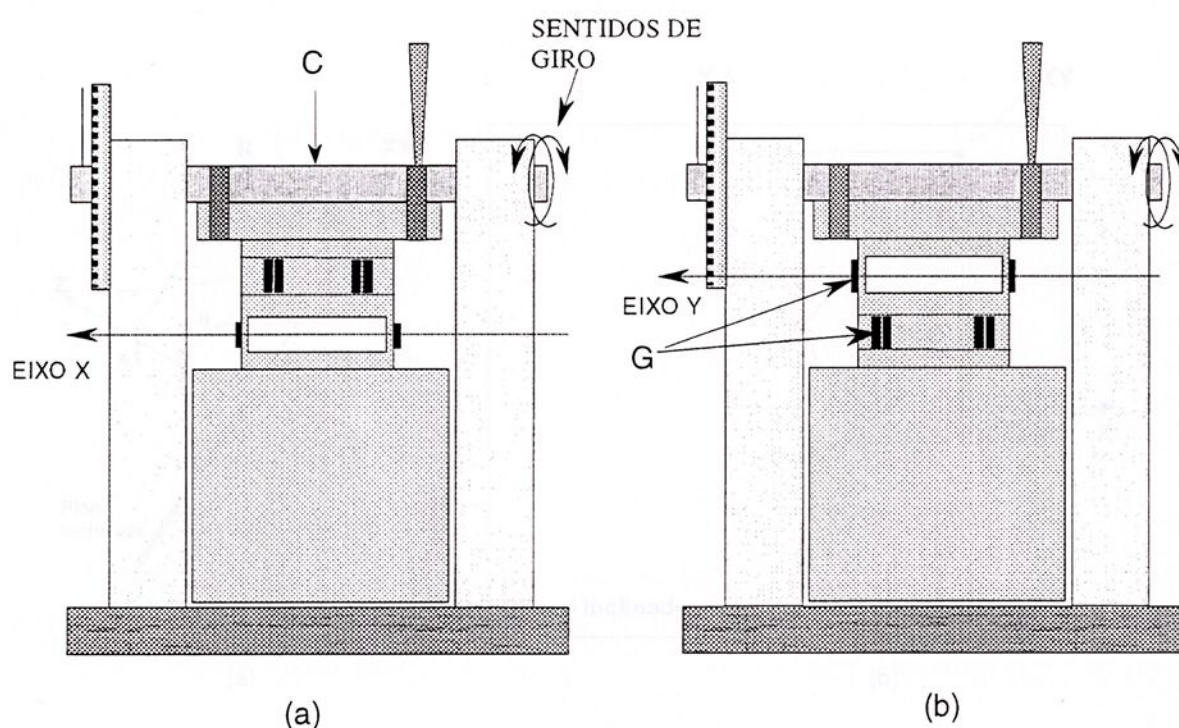


Figura 2.8 – Fixação do inclinômetro bidirecional a estrutura mecânica.

(a) - Deformação nas paredes orifício superior.

(b) - Deformação nas paredes do orifício inferior.

sendo C o eixo móvel e G os extensômetros resistivos colados nas paredes dos orifícios superior e inferior.

As demais partes que compõem o sistema mecânico foram apresentadas na Figura 2.4.

Para monitorar o sinal, na saída do circuito de condicionamento de sinais, foi utilizado um osciloscópio HP digital, de dois canais, modelo 54603B, de 60 MHz.

2.3 – Fundamentos Teóricos

A Figura 2.9 apresenta o diagrama da força cortante F_Y que provoca o momento fletor M_S nas paredes localizadas nas extremidades do orifício superior e a força cortante F_X que provoca o momento fletor M_I nas paredes localizadas nas extremidades do orifício inferior.

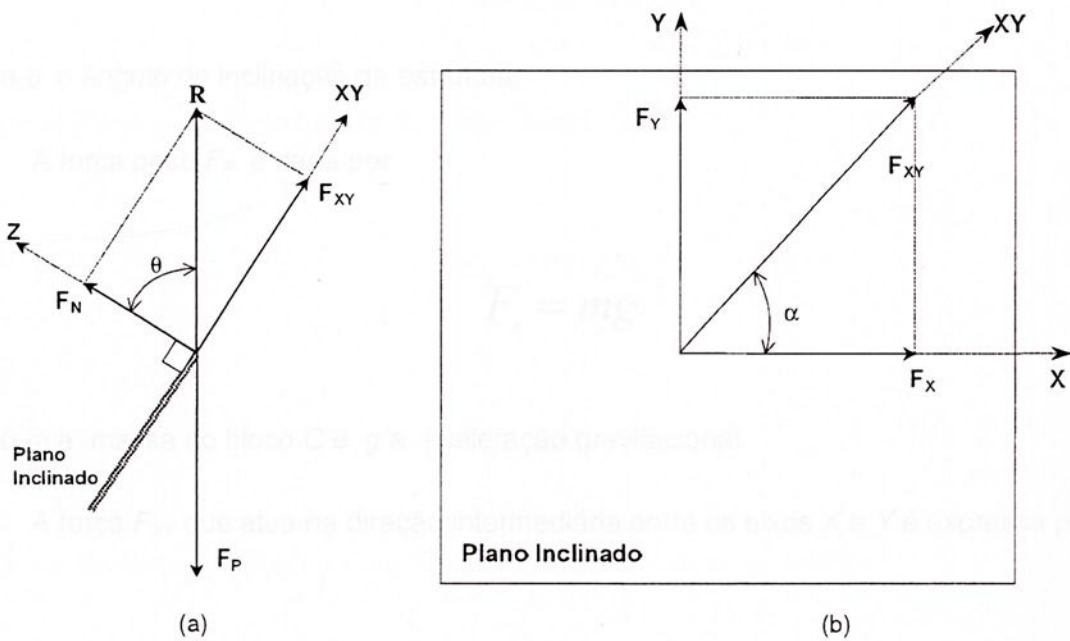


Figura 2.9 - Diagrama de forças que atuam no inclinômetro.

na qual (a) representa o diagrama de forças presentes no sistema e (b) o diagrama de forças que atuam no plano inclinado.

Da Figura 2.9a obtém-se

$$\sum F_v = 0$$

sendo $\sum F_v$ o somatório das forças na direção vertical.

$$R = F_p \quad (2.1)$$

sendo R a força de reação e F_p a força peso.

A força normal F_N é dada por

$$F_N = \cos \theta F_p \quad (2.2)$$

sendo θ o ângulo de inclinação da estrutura.

A força peso F_p é dada por

$$F_p = mg \quad (2.3)$$

sendo m a massa do bloco C e g a aceleração gravitacional.

A força F_{xy} que atua na direção intermediária entre os eixos X e Y é expressa por

$$F_{xy} = \sin \theta F_p \quad (2.4)$$

sendo θ o ângulo entre as forças F_{xy} e F_p .

Decompondo a força F_{xy} nas forças cortantes F_x e F_y , orientadas segundo os eixos X e Y , obtém-se

$$F_x = \cos \alpha F_{xy} \quad (2.5)$$



portanto:

$$F_x = \operatorname{sen} \theta \cos \alpha F_p \quad (2.6)$$

e,

$$F_y = \operatorname{sen} \alpha F_{xy} \quad (2.7)$$

portanto

$$F_y = \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \alpha F_p \quad (2.8)$$

Definindo-se as constantes K_I e K_S como

$$K_I = \cos \alpha F_p \quad (2.9)$$

$$K_S = \operatorname{sen} \alpha F_p \quad (2.10)$$

obtém-se as forças cortantes F_x e F_y em termos de K_I e K_S tal que

$$F_x = \operatorname{sen} \theta K_I \quad (2.11)$$

$$F_y = \operatorname{sen} \theta K_S \quad (2.12)$$

2.3.1 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Superior

O ângulo θ é pequeno sendo, portanto, válida a igualdade

$$M_x = I_x L \quad (2.16)$$

$$\theta = \text{sen } \theta \tag{2.13}$$

para θ em radianos.

Rescrevendo as forças F_x e F_y em termos de θ obtém-se

$$F_x = \theta K_I \tag{2.14}$$

$$F_y = \theta K_S \tag{2.15}$$

Para θ grande, não são válidas as equações (2.14) e (2.15). Neste caso as equações (2.11) e (2.12) devem ser utilizadas e a relação da força com o ângulo é não linear.

A Figura 2.10 mostra os gráficos dos momentos fletores M_S e M_I no inclinômetro, destacando-se as regiões das paredes dos orifícios superior S e inferior I.

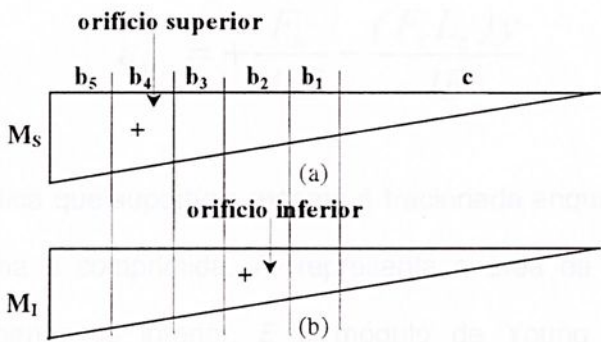


Figura 2.10 - Gráficos de momentos fletores.

2.3.1 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Superior

O momento M_S é dado por

$$M_S = F_y L_S \tag{2.16}$$

sendo L_s a distância entre o ponto de aplicação da força F_P , localizada no centro de gravidade do bloco C, e os extensômetros, colados na face do orifício superior.

A distância L_s é dada por

$$L_s = \left(\frac{c}{2} + b_1 + b_2 + b_3 + \frac{b_4}{2} \right) \tag{2.17}$$

A deformação da superfície externa da parede 1, do orifício superior, é igual à deformação ϵ_{12S} dos extensômetros resistivos (Ext_{1PS} e Ext_{2PS} ou Ext_{1VS} e Ext_{2VS}) colados na superfície. Pode ser expressa por

$$\epsilon_{12S} = + \frac{F_N}{A_T E} + \frac{(F_Y L_s) y}{I E} \tag{2.18}$$

A deformação da superfície externa da parede 2, do orifício superior, é igual à deformação ϵ_{34S} dos extensômetros resistivos (Ext_{3PS} e Ext_{4PS} ou Ext_{3VS} e Ext_{4VS}) colados na superfície. Pode ser expressa por:

$$\epsilon_{34S} = + \frac{F_N}{A_T E} - \frac{(F_Y L_s) y}{I E} \tag{2.19}$$

O sinal (+) significa que superfície externa é tracionada enquanto o sinal (-) significa que a superfície externa é comprimida. A_T representa a área da secção transversal da parede do orifício superior ou inferior, E o módulo de Young ($= 73794 \text{ N/mm}^2$) do duralumínio 2024-T351, I o momento de inércia da secção transversal que corta a parede do orifício em relação ao eixo X, e y a distância do centro de gravidade do bloco C aos extensômetros resistivos localizados nas faces do orifício superior.

A tensão de saída V_{OS} da Ponte de Wheatstone Principal ou de Verificação, que contém os extensômetros localizados nas paredes do orifício superior, é dada por

$$V_{os} = \theta \left(\frac{V_i K_F K_s L_s y}{IE} \right) \quad (2.20)$$

sendo K_F o fator de calibração dos extensômetros resistivos ($= 2,1$).

A deformação ε_{FN} provocada pela força normal F_N não afeta as respostas das Pontes de Wheatstone porque todos os extensômetros se deformarão com a mesma intensidade e apresentarão o mesmo sinal seja nos extensômetros localizados nas paredes do orifício superior como também nas paredes do orifício inferior.

Fazendo:

$$K_s = V_i K_F \left(\frac{K_s L_s y}{IE} \right) \quad (2.21)$$

obtém-se

$$V_{os} = \theta K_s \quad (2.22)$$

Portanto, a resposta obtida é linear.

2.3.2 - Determinação da Deformação nas Paredes do Orifício Inferior

O momento M_I é definido por

$$M_I = F_x L_I \quad (2.23)$$

sendo L_I a distância entre a força F_P localizada no centro geométrico do bloco C aos extensômetros colados nas paredes do orifício inferior. Esta distância pode ser expressa por

$$L_I = \left(\frac{c}{2} + b_i + \frac{b_2}{2} \right) \quad (2.24)$$



sendo $L_I < L_S \Rightarrow M_I < M_S$

A deformação da superfície externa da parede metálica 1, do orifício inferior, é igual à deformação ε_{12I} dos extensômetros resistivos (Ext_{1PI} e Ext_{2PI} ou Ext_{1VI} e Ext_{2VI}) colados na superfície, sendo expressa por

$$\varepsilon_{12I} = +\frac{F_N}{A_T E} + \frac{(F_X L_I)y}{IE} \quad (2.25)$$

A deformação da superfície externa da parede metálica 2, do orifício inferior, é igual à deformação ε_{34I} dos extensômetros resistivos (Ext_{3PI} e Ext_{4PI} ou Ext_{3VI} e Ext_{4VI}) colados na superfície. Pode ser expressa por

$$\varepsilon_{34I} = +\frac{F_N}{A_T E} - \frac{(F_X L_I)y}{IE} \quad (2.26)$$

A tensão de saída da Ponte de Wheatstone Principal ou de Verificação V_{OI} que contém os extensômetros localizados nas paredes do orifício inferior é dada por

$$V_{OI} = \theta \left(\frac{V_I K_F K_I L_I y}{IE} \right) \quad (2.27)$$

Fazendo

$$K_4 = V_I K_F \left(\frac{K_I L_I y}{IE} \right) \quad (2.28)$$

obtém-se

$$V_{OI} = \theta K_4 \quad (2.29)$$



A resposta obtida também é linear, sendo $V_{OI} < V_{OS}$.

2.4 - Resultados Obtidos e Discussão

A Figura 2.11 apresenta as curvas A e B obtidas com a calibração do inclinômetro bidirecional. Correspondem às saídas dos circuitos de condicionamento de sinais das Pontes de Wheatstone.

A Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes dos orifício superior E que monitora a deformação segundo o eixo Y e a Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício inferior F que monitora a deformação segundo o eixo X.

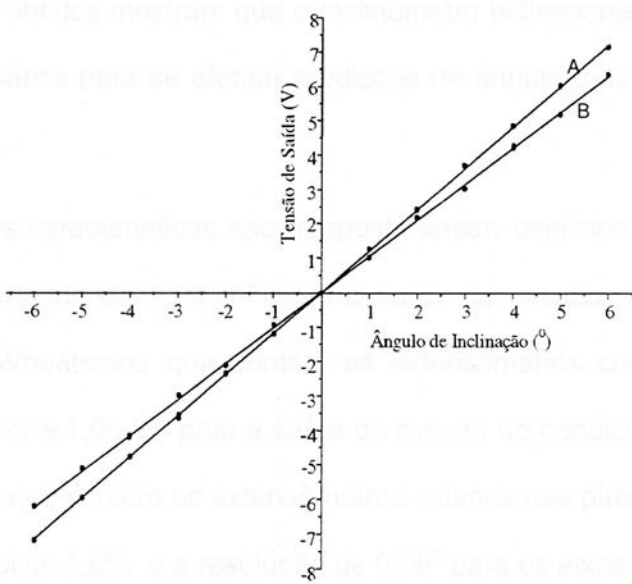


Figura 2.11 – Curvas obtidas com a calibração do inclinômetro.

Nas curvas apresentadas na Figura 2.10 foram definidos os seguintes parâmetros:

A: curva de calibração obtida na saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício superior; B: curva de calibração obtida na saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício inferior.

O inclinômetro apresentou resposta linear na faixa de -6° a $+6^\circ$, nas direções X e Y, sendo o coeficiente de correlação igual a 0,999, a sensibilidade de $1,20 \text{ V/}^\circ$ para a saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício superior e $1,06 \text{ V/}^\circ$ para a saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do nível inferior. A histerese medida foi de 1,6% e a resolução de $0,08^\circ$ para os eixos X e Y.

O inclinômetro pode medir ângulos de inclinação maiores, de -80° a $+80^\circ$, embora a resposta não seja linear para grandes ângulos.

2.5 – Conclusões

Os resultados obtidos mostram que o inclinômetro bidirecional implementado atende aos requisitos necessários para se efetuar medições de ângulo de inclinação de estruturas de grande porte.

Suas principais características são: resposta linear, coeficiente de correlação linear igual a 0,999, sensibilidade de $1,20 \text{ V/}^\circ$ para a saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício do nível superior e $1,06 \text{ V/}^\circ$ para a saída do circuito de condicionamento de sinais da Ponte de Wheatstone que contém os extensômetros colados nas paredes do orifício inferior. A histerese medida foi de 1,6% e a resolução de $0,08^\circ$ para os eixos X e Y.

Apesar da faixa dinâmica de inclinação estar limitada entre -6° a $+6^\circ$, o inclinômetro pode medir ângulos com inclinação na faixa de -80° a $+80^\circ$ embora, neste caso, a resposta seja não linear.

O sensor é robusto, de baixo custo e de alta confiabilidade.



Capítulo 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Powell, W. B.; Pheifer, D. The Electrolytic Tilt Sensor, 2000. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles/0500/120/main.shtr>. Acesso em: 05/07/2004.

Puccio, M. R. Digitally Compensated Tilt Sensors, 2003. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles/0903/59/main.shtr>. Acesso em: 05/07/2004.

Singer, F.; Singer, Y. A Novel Auto-Zero Servo-Inclinometer. Sept. 2003 Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles/0903/14/main.shtr>. Acesso em: 05/07/2004.

Lyuan, L-B., "Push-pull Fiber Optic Inclinometer Based on a Mach-Zehnder Optical Low-Coherence Reflectometer", Review of Scientific Instruments, v.75, n. 6, June 2004.



Capítulo 3

Extensômetro Capacitivo de Alta Sensibilidade e Baixo Custo

3.1 – Introdução

Deformações experimentadas por um material podem acarretar variações na capacitância, indutância ou na resistência elétrica do mesmo. Se um fio for submetido à tração experimentará alongamento e a área de sua secção transversal diminuirá (Areny, 1991).

A deformação de um objeto pode ser medida através de métodos mecânicos, ópticos, acústicos, pneumáticos e elétricos. Os extensômetros capacitivos são dispositivos mecânicos que medem deformação. Ao selecionar um extensômetro (Cobbold, 1974), não se deve considerar apenas as características que provocam a deformação do sensor, mas também sua estabilidade e sua sensibilidade com a temperatura.

HPI (entre 2000 e 2004) desenvolveu extensômetros capacitivos que podem ser usados em temperaturas superiores à 1500 °C para curtos e longos períodos de tempo. O projeto do mesmo, eliminou problemas que limitavam o desempenho de dispositivos medidores de deformação em altas temperaturas. O extensômetro consiste de dois capacitores variáveis conectados em meia ponte que cancelam os efeitos indesejáveis produzidos pela temperatura e pressão. Apresentou excelente linearidade.

Perusek et al. (2002) implementaram um extensômetro capacitivo para medição da deformação do osso para ser usado em seres humanos. O extensômetro utiliza pares de sensores capacitivos montados em pinos, que são introduzidos nos ossos, permitindo medir a deformação provocada no plano do extensômetro, bem como a compressão uniaxial ou a tensão mecânica. Kolb, Decca e Drew (1998) desenvolveram um sensor compacto para



medir posição em duas dimensões. O dispositivo opera de acordo com o princípio de que a capacitância de eletrodos de placas paralelas depende da área mútua de sobreposição. É adequado para operação em campos magnéticos intensos e temperaturas criogênicas. Uma resolução de aproximadamente 1,2 mm foi obtida, sendo a limitação determinada pela eletrônica utilizada.

Peters (1993) desenvolveu extensômetros capacitivos que apresentaram boa sensibilidade para medir pequenos deslocamentos. Possuem alta resolução, grande estabilidade com a temperatura e foram ligados em ponte completa. Apresentaram resolução de 0,1 μm , coeficiente de correlação de 0,999 e puderam medir baixos níveis de expansão térmica.

Neste trabalho, é apresentado um novo extensômetro capacitivo.

O extensômetro capacitivo foi desenvolvido com a finalidade de ser utilizado no desenvolvimento de células de carga e na determinação de deformações de sistemas estruturais. Além disso a resposta do extensômetro é pouco afetada pela variação da frequência da tensão de alimentação bem como pela variação de temperatura do ambiente.

O extensômetro capacitivo é de construção simples, robusto e de baixo custo. A principal característica é sua elevada sensibilidade. Os sensores capacitivos foram instalados em duas pontes completas visando medir forças com a mínima influência da temperatura.

Os resistores R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , R_7 e R_8 apresentam resistência de 100 Ω .



3.2 – Metodologia e Materiais Utilizados

O extensômetro capacitivo consiste em oito sensores capacitivos independentes s_{1A} , s_{3A} , s_{1B} , s_{3B} (extensômetro α), s_{2A} , s_{4A} , s_{2B} , s_{4B} (extensômetro ϕ) ligados em duas pontes completas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

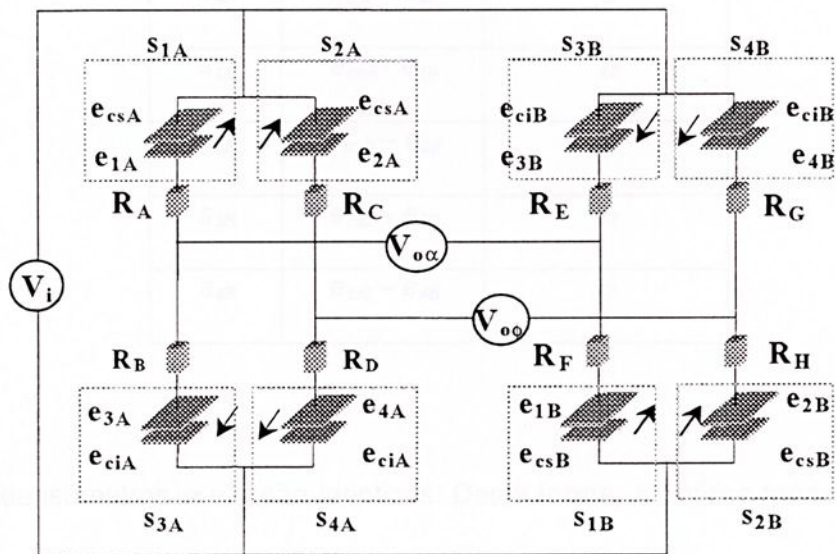


Figura 3.1 – Ligação dos sensores capacitivos nas duas pontes completas.

As pontes são alimentadas com sinal senoidal denotado como V_i . As tensões de saída dos extensômetros α e ϕ são, respectivamente, $V_{o\alpha}$ e $V_{o\phi}$. A Tabela 3.1 mostra os componentes dos extensômetros α e ϕ .

Os resistores R_A , R_B , R_C , R_D , R_E , R_F , R_G e R_H apresentam resistência de $100\ \Omega$.

Table 3.1 - Componentes dos extensômetros α e ϕ .

Sensor	Eletrodos	Extensômetro
S_{1A}	$e_{csA} - e_{1A}$	α
S_{2A}	$e_{csA} - e_{2A}$	ϕ
S_{3A}	$e_{ciA} - e_{3A}$	α
S_{4A}	$e_{ciA} - e_{4A}$	ϕ
S_{1B}	$e_{csB} - e_{1B}$	α
S_{2B}	$e_{csB} - e_{2B}$	ϕ
S_{3B}	$e_{ciB} - e_{3B}$	α
S_{4B}	$e_{ciB} - e_{4B}$	ϕ

Os extensômetros α e ϕ são idênticos. Desta forma, a análise teórica será realizada apenas para o extensômetro α .

A Figura 3.2 ilustra o extensômetro α . Os resistores são necessários para evitar curto circuito acidental dos sensores



Figure 3.2 - Schematic diagram of the capacitive extensometer.

Os componentes que compõem o extensômetro da Figura 3.2 são os seguintes:

- S_{1A} e S_{3A} - sensores capacitivos;
- R_1 , R_2 , R_3 e R_4 - resistores;
- V_{cc} - tensão de alimentação;
- V_o - tensão de saída;
- D_1 - distância entre os eletrodos do sensor S_{1A} e S_{3A} ;
- D_2 - distância entre os eletrodos do sensor S_{1A} e S_{2A} ;
- D_3 - distância entre os eletrodos do sensor S_{3A} e S_{4A} ;
- D_4 - distância entre os eletrodos do sensor S_{3A} e S_{4A} ;

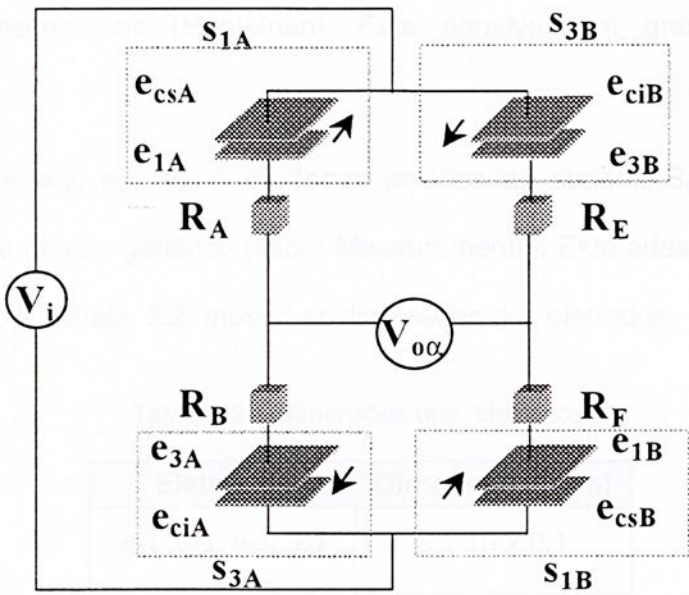


Figura 3.2 – Extensômetro α .

A Figura 3.3 mostra uma vista lateral da estrutura do dispositivo capacitivo.

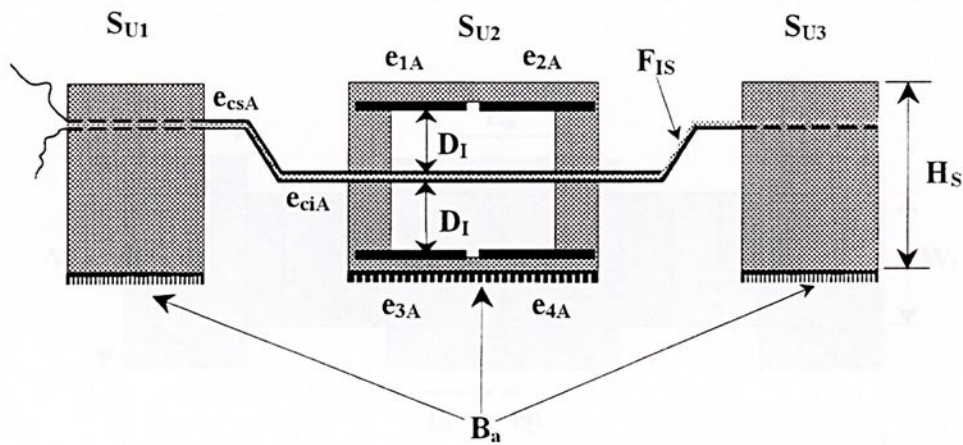


Figura 3.3 - Vista lateral da estrutura do dispositivo capacitivo.

Os componentes que constituem o dispositivo da Figura 3.3 são os seguintes:

S_{U1} , S_{U2} e S_{U3} : suportes isolantes; B_a : base do dispositivo; H_s : altura do dispositivo; D_i : distância entre os eletrodos comuns e_{csA} e e_{ciA} e os eletrodos e_{1A} , e_{2A} , e_{3A} , e e_{4A} .

Um filme isolante F_{is} foi colado entre os eletrodos e_{csA} e e_{ciA} utilizando-se uma resina epoxi de alto desempenho (Huntsman). Este adesivo tem grande capacidade de alongamento.

Os eletrodos e_{1A} , e_{2A} , e_{3A} e e_{4A} foram colados ao suporte S_{U2} , utilizando-se um adesivo cianocrilato de uso genérico (Micro-Measurements). Este adesivo é livre de *creep* e resistente à fadiga. A Tabela 3.2 mostra as dimensões dos eletrodos.

Table 3.2 – Dimensões dos eletrodos.

Eletrodos	Dimensões (mm)
$e_{1A}, e_{2A}, e_{3A}, e_{4A}$	8 x 10 x 0,1
e_{csA}	31 x 10 x 0,1
e_{ciA}	41 x 10 x 0,1

A Figura 3.4 mostra uma vista superior da estrutura do dispositivo capacitivo.

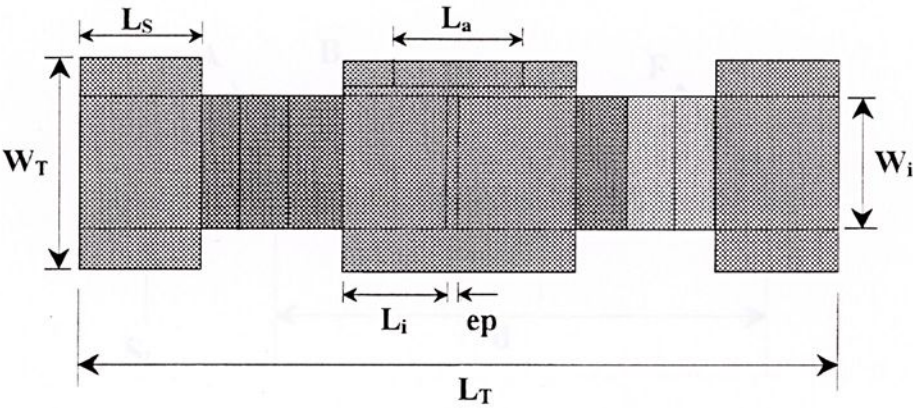


Figura 3.4 – Vista superior do dispositivo capacitivo.

sendo L_i o comprimento inicial dos eletrodos, W_i a largura inicial dos eletrodos, W_T a largura total, L_T o comprimento do extensômetro capacitivo, e_p a distância entre os eletrodos e L_a a abertura no suporte S_{U2} e L_S o comprimento dos suportes S_{U1} e S_{U3} .

Uma vista simples do sensor capacitivo é mostrada na Figura 3.5.

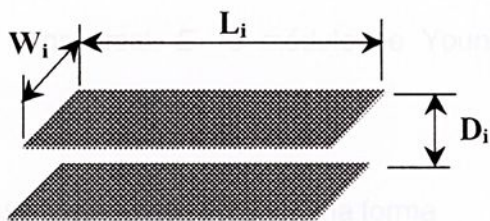


Figura 3.5 – Sensor capacitivo.

Para explicar como opera o dispositivo, considera-se que o extensômetro capacitivo A é usado para medir deformações sofridas por uma barra metálica B , submetida à força F , aplicada com um ângulo θ em relação à barra, a uma distância d do extensômetro, como mostra a Figura 3.6.

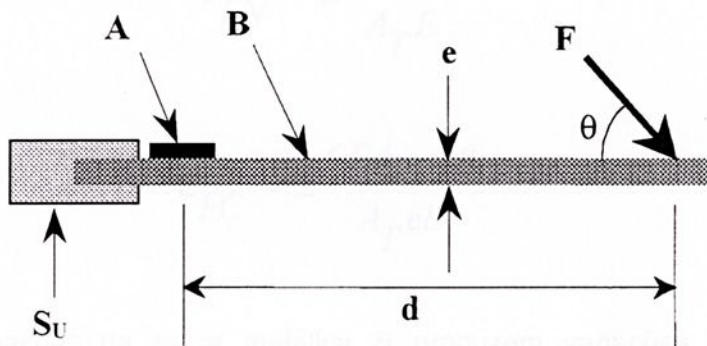


Figura 3.6 – Extensômetro capacitivo colado à barra.

A deformação longitudinal ϵ_{L_i} e a deformação transversal ϵ_{T_i} da barra são dadas respectivamente pelas equações (3.1) e (3.2).

$$\varepsilon_{Li} = \pm \frac{F \cos \theta}{A_T E} \pm \frac{6 F d \sin \theta}{A_T E e} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{Ti} = -\nu \varepsilon_{Li} \quad (3.2)$$

sendo A_T a área da secção transversal, E o módulo de Young e ν o coeficiente de Poisson.

Desta forma, pode-se escrever a equação (3.1) na forma

$$\varepsilon_{Li} = \pm \varepsilon_{FN} \pm \varepsilon_{FC} \quad (3.3)$$

sendo ε_{FN} a deformação produzida na barra B pela força normal F_N , e ε_{FC} a deformação produzida na barra B pela força cortante F_C .

As equações (3.4) e (3.5) descrevem ε_{FN} e ε_{FC}

$$\varepsilon_{FN} = \pm \frac{F \cos \theta}{A_T E} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{FC} = \pm \frac{6 F d \sin \theta}{A_T e E} \quad (3.5)$$

As deformações da barra metálica B produzem variações nas dimensões do extensômetro capacitivo.

O comprimento e a largura do eletrodo e a distância entre os eletrodos s_{3A} e s_{4A} são dados respectivamente por

$$L_{F3} = L_i (1 + \varepsilon_{Li}) \quad (3.6)$$



$$W_{F3} = W_i(1 - \nu \varepsilon_{Li}) \quad (3.7)$$

$$D_{F3} = D_i(1 + \varepsilon_{Li}) \quad (3.8)$$

sendo $\varepsilon_{Li} \neq 0$ e $\varepsilon_{Ti} \neq 0$.

O comprimento e a largura do eletrodo e a distância entre os eletrodos dos sensores s_{1A} e s_{2A} são dados, respectivamente, por

$$L_{F1} = L_i \quad (3.9)$$

$$W_{F1} = W_i \quad (3.10)$$

$$D_{F1} = D_i(1 - \varepsilon_{Li}) \quad (3.11)$$

As deformações longitudinal e transversal de s_{1A} e s_{2A} são zero.

Os sensores possuem eletrodos paralelos com dimensões idênticas.

A capacitância inicial é dada por:

$$C_i = \xi \frac{L_i W_i}{D_i} \quad (3.12)$$

sendo ξ a permissividade dielétrica.

A capacitância dos sensores s_{1A} , s_{2A} , s_{1B} e s_{2B} é dada por:

$$C_{F1} = C_i \pm \varepsilon_{Li} C_i \pm C_i \beta \Delta T \quad (3.13)$$

A capacitância dos sensores s_{3A} , s_{4A} , s_{3B} e s_{4B} é dada por:

$$C_{F3} = C_i \mp v \varepsilon_{Li} C_i \pm C_i \beta \Delta T \quad (3.14)$$

sendo C_i a capacitância inicial e $v \varepsilon_{Li} C_i$ devido à força aplicada F e ainda $C_i \beta \Delta T$ devido à variação de temperatura. β representa o coeficiente superficial de dilatação térmica.

V_o é a tensão de saída do circuito da ponte, sendo facilmente calculada usando leis de circuito elétrico, e considerando $|R_A|, |R_B|, |R_E|, |R_F| \ll |X_{CF1}|, |X_{CF3}|$.

$$V_o = \varepsilon_{Li} \left[\frac{V_i (1 + v)}{2} \right] \quad (3.15)$$

sendo X_{CF1} a reatância capacitiva dos sensores s_{1A} , s_{2A} , s_{1B} e s_{2B} e X_{CF3} a reatância capacitiva dos sensores s_{3A} , s_{4A} , s_{3B} e s_{4B} .

A deformação longitudinal ε_{Li} é dada por:

$$\varepsilon_{Li} = F \left(\frac{\pm e \cos \theta \pm 6 d \sin \theta}{e A_T E} \right) \quad (3.16)$$

Então

$$V_o = F \left(\frac{\pm e \cos \theta \pm 6 d \sin \theta}{e A_T E} \right) \left[\frac{V_i (1 + v)}{2} \right] = KF \quad (3.17)$$

sendo

$$K = \left(\frac{\pm e \cos \theta \pm 6 d \sin \theta}{e A_T E} \right) \left[\frac{V_i (1 + v)}{2} \right] \quad (3.18)$$

A equação (3.17) mostra que a resposta do extensômetro capacitivo é linear com a força aplicada F .

3.2.1- Circuito Eletrônico de Condicionamento de Sinais

A ponte foi alimentada com um sinal senoidal com amplitude de 7 V e frequência de 15 KHz.

A Figura 3.7 mostra o diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.

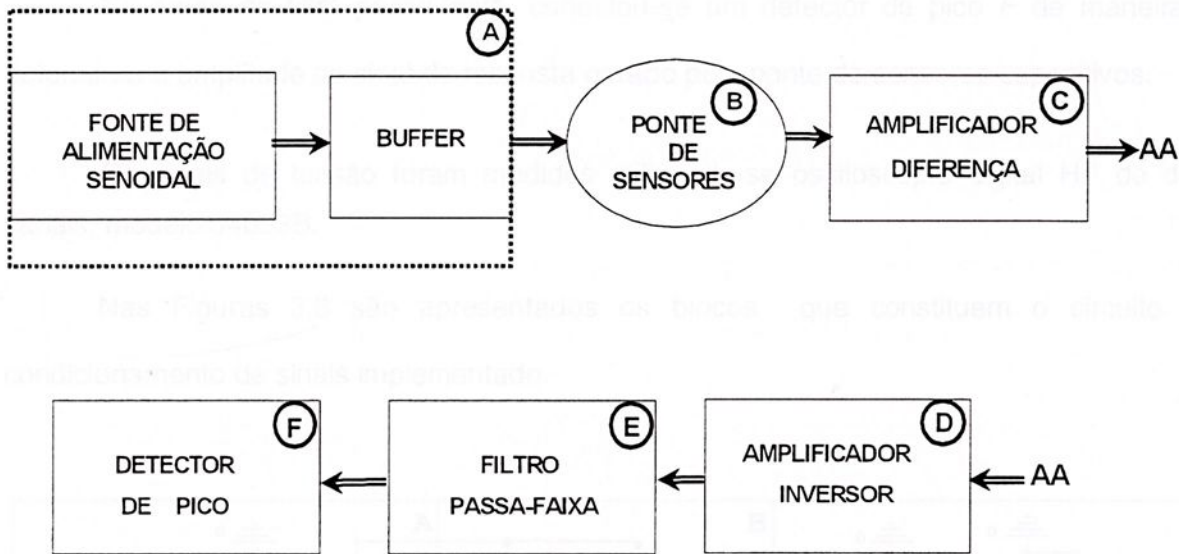


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.

O circuito de condicionamento é representado pelos blocos A , B , C , D , E e F , ligados em série.

O bloco A é constituído por uma fonte de tensão senoidal e por um *buffer*.

Para a alimentação do circuito de condicionamento de sinais foram utilizadas duas fontes de tensão distintas, uma constante (Minipa, modelo MPC 3006D) para alimentar os circuitos integrados com amplitude de +12 V e -12 V, e uma senoidal (gerador de sinais, módulo DEGEN PU 2222) com amplitude de 7 V e frequência de 15 KHz, para alimentar à ponte de sensores capacitivos.

O *buffer* tem a finalidade de isolar o sinal da fonte de tensão e reforçar a corrente para os demais estágios.

As tensões nas saídas da ponte são comparadas entre si e a diferença é pré-amplificada pelo amplificador diferença C.

A saída do amplificador diferença é conectada ao amplificador inversor D que realiza nova amplificação. Na saída do amplificador inversor D, conectou-se um filtro passa-faixa E de maneira a excluir interferência gerada por sinais externos que ocorrem em frequências diferentes da frequência utilizada.

Na saída do filtro passa-faixa, conectou-se um detector de pico F de maneira a determinar a amplitude do sinal de resposta gerado pela ponte de sensores capacitivos.

Os sinais de tensão foram medidos utilizando-se osciloscópio digital HP de dois canais, modelo 54603B.

Nas Figuras 3.8 são apresentados os blocos que constituem o circuito de condicionamento de sinais implementado.

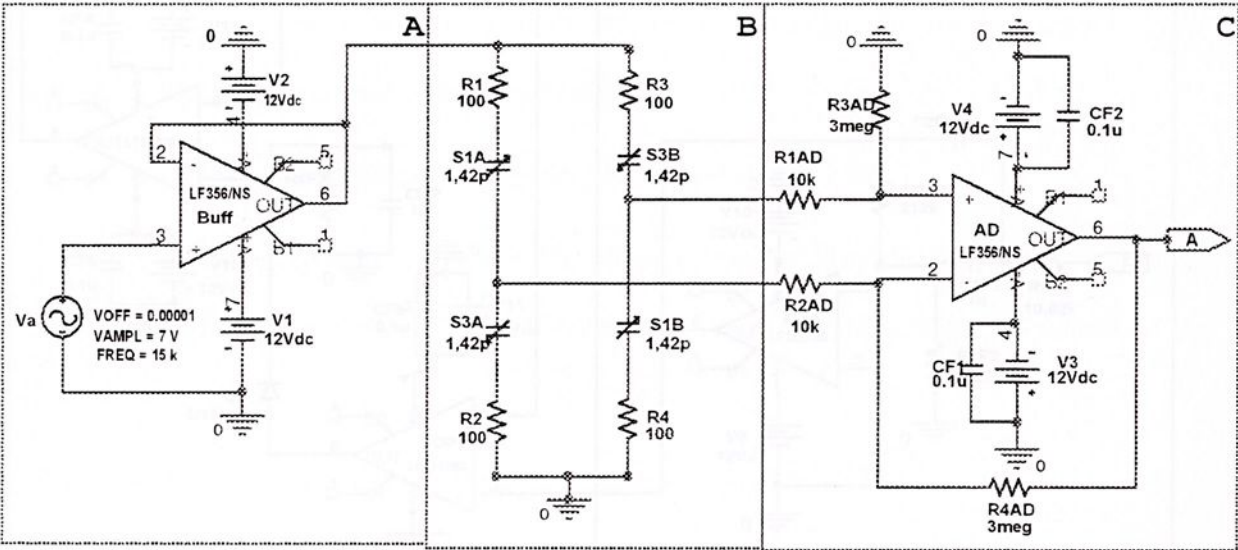


Figura 3.8a – Circuito de entrada.

sendo *A* constituído pela fonte de tensão alternada e senoidal e pelo *buffer*, *B* definido pelo extensômetro capacitivo e *C* constituído pelo amplificador diferença.

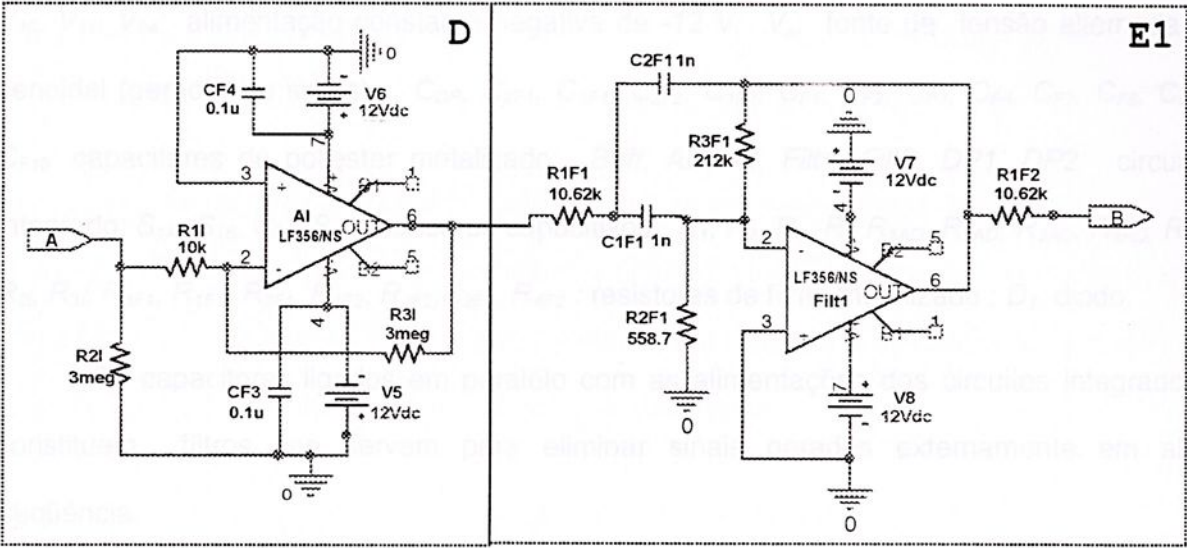


Figura 3.8b – Circuito intermediário.

sendo *D* constituído pelo amplificador inversor, *E1* definido pelo primeiro estágio do filtro passa-faixa e *E2* é constituído pelo segundo estágio do filtro passa-faixa.

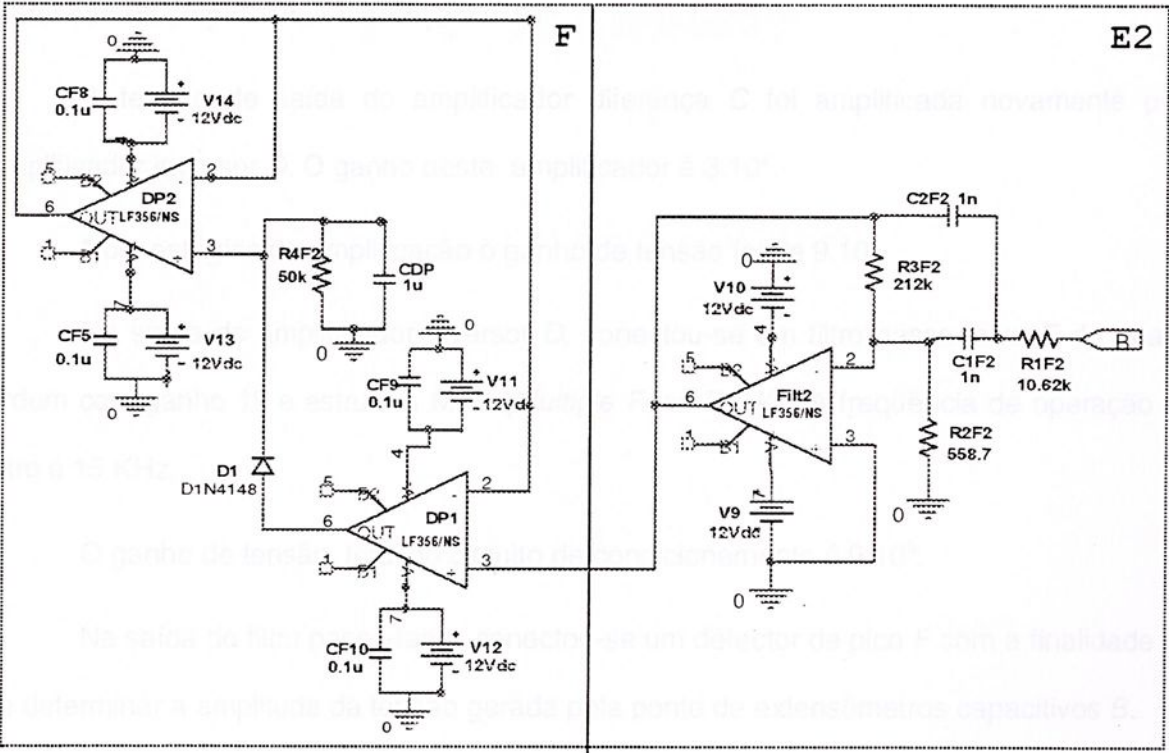


Figura 3.8c – Circuito Final.

Além disso o bloco F é constituído pelo detector de pico.

sendo $V_1, V_4, V_6, V_8, V_9, V_{12}, V_{13}$: alimentação constante positiva de +12 V; $V_2, V_3, V_5, V_7, V_{10}, V_{11}, V_{14}$: alimentação constante negativa de -12 V; V_a : fonte de tensão alternada e senoidal (gerador de sinais) ; $C_{DP}, C_{2F1}, C_{1F1}, C_{2F2}, C_{1F2}, C_{F1}, C_{F2}, C_{F3}, C_{F4}, C_{F7}, C_{F8}, C_{F9}, C_{F10}$: capacitores de poliéster metalizado; $Buff, AD, AI, Filt1, Filt2, DP1, DP2$: circuito integrado; $S_{1A}, S_{1B}, S_{3A}, S_{4A}$: sensores capacitivos; $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{1AD}, R_{2AD}, R_{3AD}, R_{4AD}, R_{1I}, R_{2I}, R_{3I}, R_{3F1}, R_{1F1}, R_{2F1}, R_{1F2}, R_{3F2}, R_{2F2}, R_{4F2}$: resistores de filme metalizado ; D_1 : diodo.

Os capacitores ligados em paralelo com as alimentações dos circuitos integrados, constituem filtros que servem para eliminar sinais gerados externamente em alta frequência.

No circuito foram utilizados circuitos integrados $LF 356N$ (National Semiconductor).

Com a ocorrência de deformação, os sinais gerados nos pontos A e B da ponte se desequilibram proporcionalmente à deformação sendo, neste caso, comparadas às saídas, sendo a diferença entre elas pré-amplificada através do amplificador diferença C . O ganho de tensão do amplificador diferença é $3 \cdot 10^2$.

A tensão de saída do amplificador diferença C foi amplificada novamente pelo amplificador inversor D . O ganho deste amplificador é $3 \cdot 10^2$.

Nos estágios de amplificação o ganho de tensão foi de $9 \cdot 10^4$.

Na saída do amplificador inversor D , conectou-se um filtro passa-faixa E de quarta ordem com ganho 10 e estrutura MFB (*Multiple Feed Back*). A frequência de operação do filtro é 15 KHz.

O ganho de tensão total do circuito de condicionamento é $9 \cdot 10^5$.

Na saída do filtro passa-faixa, conectou-se um detector de pico F com a finalidade de se determinar a amplitude da tensão gerada pela ponte de extensômetros capacitivos B .



3.2.2 - Comparação com um Sensor Capacitivo Convencional

Visando estabelecer comparação entre o extensômetro capacitivo implementado e um convencional, considera-se que este foi utilizado nas mesmas condições experimentais em que o novo extensômetro foi submetido, conforme ilustrado na Figura 3.6.

O extensômetro capacitivo convencional é sensível apenas à força normal F_N . Como é mostrado na Figura 3.9, a distância D entre os eletrodos e_1 e e_2 varia, mas o comprimento L_i e a largura W_i do eletrodo não variam quando o dispositivo é submetido à força F . S_u é um suporte isolante e B uma barra metálica.

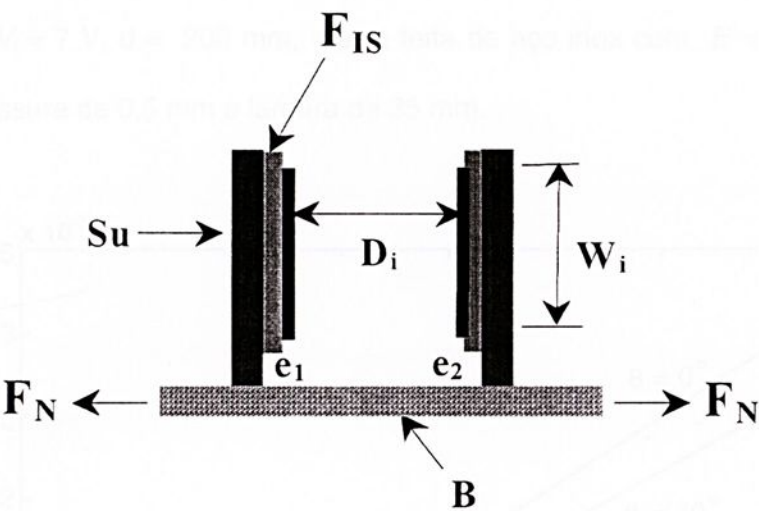


Figura 3.9 – Sensor capacitivo convencional.

Neste caso

$$W_F = W_i \tag{3.19}$$

$$L_F = L_i \tag{3.20}$$

$$D_F = D_i(1 + \epsilon_{FN}) \tag{3.21}$$

A tensão de saída da ponte, utilizando configuração de ponte completa, é

$$V_o = \epsilon_{FN} V_i \tag{3.22}$$

sendo ϵ_{FN} a deformação devido à força normal aplicada F_N .

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram, respectivamente, o resultado da simulação, utilizando o programa MATLAB 5.3, para um extensômetro capacitivo convencional e para o novo extensômetro capacitivo, para $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90° , com as seguintes condições experimentais: $V_i = 7\text{ V}$, $d = 200\text{ mm}$, barra feita de aço inox com $E = 2,1 \times 10^5\text{ N/mm}^2$ e $\nu = 0,27$, espessura de $0,5\text{ mm}$ e largura de 35 mm .

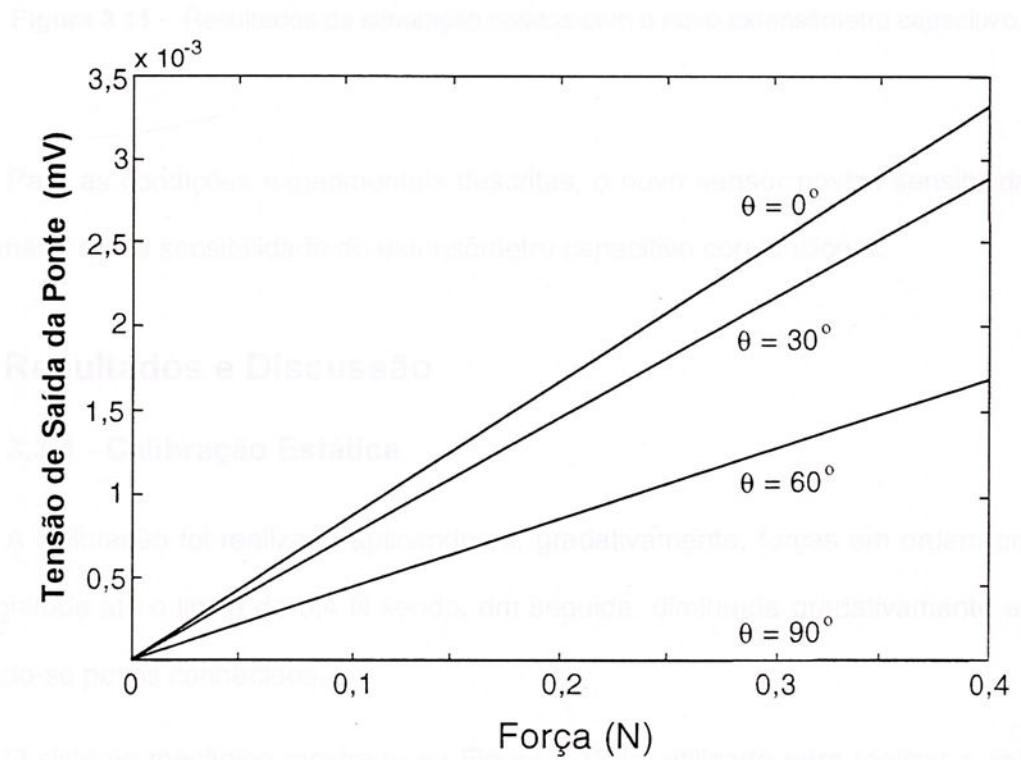


Figura 3.10 - Resultados de simulação obtidos com o extensômetro capacitivo convencional.

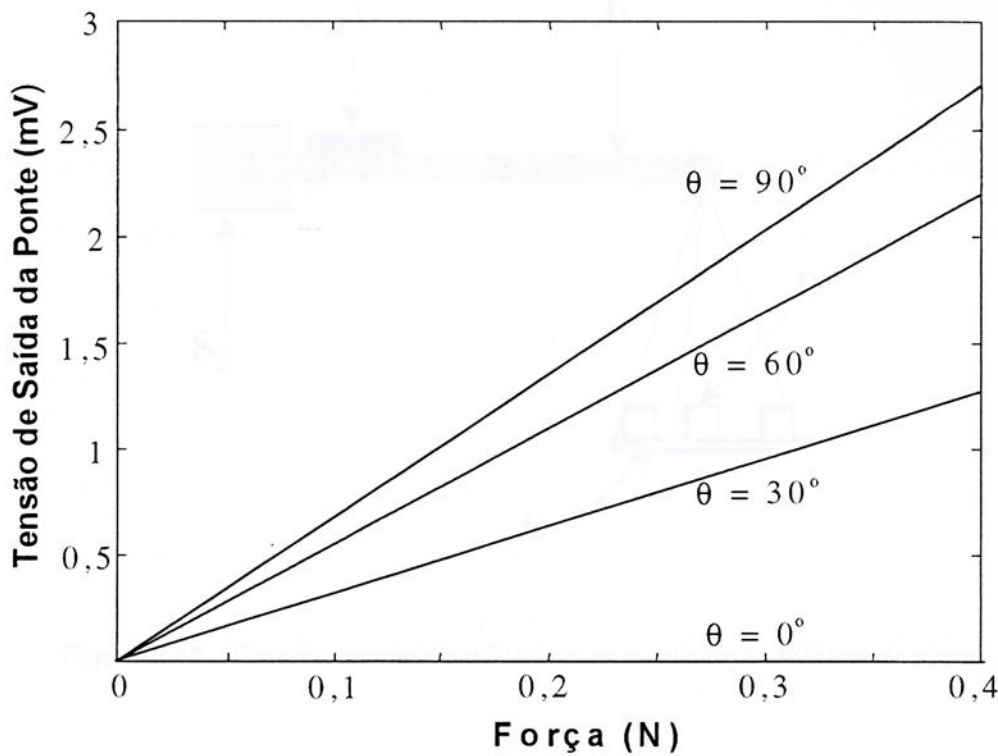


Figura 3 11 - Resultados de simulação obtidos com o novo extensômetro capacitivo.

Para as condições experimentais descritas, o novo sensor possui sensibilidade 820 vezes maior que a sensibilidade do extensômetro capacitivo convencional.

3.3 – Resultados e Discussão

3.3.1 - Calibração Estática

A calibração foi realizada aplicando-se, gradativamente, forças em ordem crescente de magnitude até o limite de 0,4 N sendo, em seguida, diminuída gradativamente até zero, utilizando-se pesos conhecidos.

O sistema mecânico mostrado na Figura 3.12 foi utilizado para realizar a calibração do sensor, sendo S_U um suporte, A o novo extensômetro capacitivo, B a barra, C um receptáculo e D objetos com pesos conhecidos.

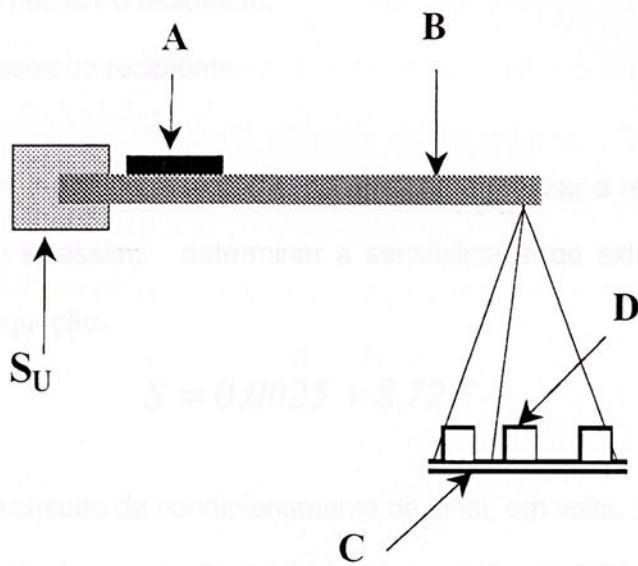


Figura 3.12 – Sistema mecânico utilizado para a calibração estática do sensor.

A Figura 3.13 mostra uma relação linear entre a saída do circuito de condicionamento de sinal e a força aplicada.

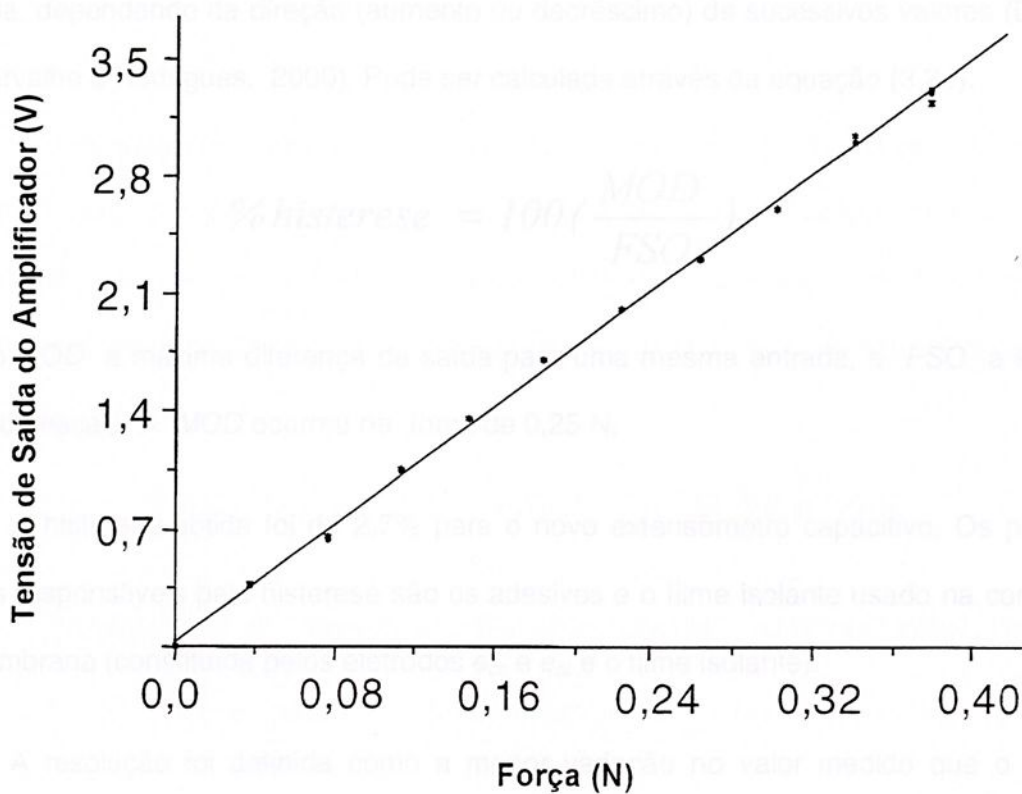


Figura 3.13 - Resposta estática do extensômetro.

- Adicionando-se pesos no recipiente.
- * Retirando-se pesos do recipiente.

Foi aplicado o método dos mínimos quadrados para realizar a regressão linear e obter a curva de calibração e, assim, determinar a sensibilidade do extensômetro capacitivo. A curva é dada pela equação.

$$S = 0,0025 + 8,72F \tag{3.23}$$

sendo S , a saída do circuito de condicionamento de sinal, em volts, e F a força aplicada em newtons, o coeficiente de correlação é 0,999 e a sensibilidade 8,7 V/N.

O novo extensômetro capacitivo apresenta grande durabilidade e baixo custo. Os eletrodos foram construídos com alumínio e o suporte feito em acrílico. A estrutura do sensor foi cuidadosamente projetada de maneira que o sensor opere seguramente na região de elasticidade.

A histerese refere-se à diferença entre dois valores de saída para uma mesma entrada, dependendo da direção (aumento ou decréscimo) de sucessivos valores (Da Silva, De Carvalho e Rodrigues, 2000). Pode ser calculada através da equação (3.24).

$$\%histerese = 100\left(\frac{MOD}{FSO}\right) \tag{3.24}$$

sendo MOD a máxima diferença da saída para uma mesma entrada, e FSO a saída de fundo de escala. A MOD ocorreu na força de 0,25 N.

A histerese obtida foi de 2,7% para o novo extensômetro capacitivo. Os principais fatores responsáveis pela histerese são os adesivos e o filme isolante usado na construção da membrana (constituída pelos eletrodos e_{cs} e e_{ci} e o filme isolante).

A resolução foi definida como a menor variação no valor medido que o sistema responde. Para este circuito de condicionamento de sinais a resolução foi de 0,009 N.



A resposta dinâmica do sensor foi avaliada utilizando-se, como entrada, um sinal de força com forma de onda degrau. As forças foram aplicadas para o sensor e então removidas abruptamente. O tempo de descida, definido como o tempo necessário para a saída do sensor atingir o valor de 63% do valor em regime, foi de 12 ms.

A precisão foi calculada medindo-se, com o dispositivo, forças de 0,15 N. Foram realizadas dez medições. A precisão obtida foi de 98,7%.

3.4 – Conclusões

Foi implementado um extensômetro capacitivo que apresenta alta sensibilidade e baixo custo. Ele apresenta sensibilidade 820 vezes maior que a de um extensômetro convencional. Sua resposta é linear, apresenta histerese de 2,7% e pode medir forças com a resolução de 0,009 N.

A histerese verificada na resposta do extensômetro capacitivo tende a aumentar com a frequência de oscilação do sistema mecânico onde o mesmo está colado. A principal causa da existência de histerese é a utilização de cola no desenvolvimento da estrutura do extensômetro.

O extensômetro poderá ser utilizado no desenvolvimento de células de carga em geral bem como na determinação de deformações de sistemas estruturais que estejam submetidos a frequência moderadas e baixas. Além disso a equação (3.17) mostra que a resposta do sensor não depende da temperatura e da frequência do sinal de alimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Areny, R. P.; Webster, J. W. "Sensors and Signal Conditioning". New York: Wiley, 1991.
- Cobbold, R.S.C. "Transducers for Biomedical Measurements". New York: Wiley, 1974.



HITEC PRODUCTS INC - HPI, entre 2000 e 2004. Disponível em: <http://www.hitecprod.com/Sensors for Hostile Enviroments>. Acesso em maio. 2004.

Perusek, G. P.; Davis, B. L.; Courtney, A. C.; Andrea, S. E. D. "An extensometer for global measurement of bone strain suitable for use in vivo in humans". Journal of Biomechanics, v. 34, n. 3, p. 385-391, 2002.

Kolb, P. W.; Decca, R. S.; and Drew, H. D. "Capacitive sensor for micropositioning in two dimension". Rev. Sci. Instrum., v. 69, n. 1, p. 310-312, Jan. 1998.

Peters, R. D. "Full-bridge capacitive extensometer", Rev. Sci. Instrum., v. 64, n.8, Aug. 1993.

Da Silva, J. G.; De Carvalho, A. A.; Rodrigues, R. O. "Development of a dynamometer for hand clinical evaluation". in Proc. Iberdiscap 2000, Madrid, Spain, pp. 429-434, Oct. 18-20, 2000.



Capítulo 4

Dinamômetro Ergonômico Microcontrolado para Aplicações Biomédicas e Dinamômetro Eletrônico com Extensômetros Capacitivos

4.1 – Introdução

A Engenharia de Reabilitação visa utilizar técnicas, métodos e processos da Engenharia no auxílio aos deficientes físicos, de uma maneira geral, objetivando a melhoria de sua qualidade de vida.

A determinação precisa das forças exercidas pelos dedos e pelas mãos é de grande importância em estudos de Biomecânica, Engenharia de Reabilitação, Fisioterapia e Ergonomia. Pode ser útil para documentar a recuperação de pacientes submetidos a cirurgias nas mãos ou de pacientes que perderam a mobilidade das mãos, devido a doenças ou acidentes. O acompanhamento do processo de recuperação destas pessoas tem sido realizado de uma forma qualitativa por médicos e fisioterapeutas.

Transdutores práticos para medição das forças exercidas pelos dedos e pelas mãos são necessários em pesquisas biomédicas, avaliações clínicas funcionais e em mecanismos de reabilitação das mãos. O dinamômetro biomédico é um equipamento capaz de medir as forças exercidas pelos dedos e pelas mãos.

Radwin, Masters e Lupton (1991) descreveram um dinamômetro biomédico constituído por duas hastes metálicas frontais, onde colaram-se extensômetros. O instrumento podia somar forças exercidas em vários pontos de uma haste, na faixa de 0 a 80 N. Era compacto e rígido sendo projetado para aplicação em Ergonomia.



Da Silva e De Carvalho (1998) desenvolveram um dinamômetro que podia medir a soma das forças exercidas pelos dedos. Consiste de duas hastes de duralumínio suportadas em um trilho de aço. Cada haste possui dois bolsos onde há uma membrana com dois extensômetros resistivos colados em cada um de seus lados. Os extensômetros foram posicionados sobre o eixo neutro da haste, formando um ângulo de 45° com o eixo neutro, de forma a garantir a sensibilidade somente à tensão de cisalhamento. O dinamômetro apresentou resposta linear, excelente repetibilidade, resolução de 0,8 N, faixa dinâmica de 0 a 100 N. Sua resposta não depende do ponto de aplicação da força na haste.

Da Silva, De Carvalho e Rodrigues (2000) implementaram um dinamômetro biomédico com dois sensores que operam segundo princípios físicos diferentes: tensão normal e tensão de cisalhamento. Os transdutores são constituídos por extensômetros resistivos conectados em duas pontes de Wheatstone independentes. A ponte que opera sob efeito da tensão de cisalhamento constitui um sensor de referência para a que opera sob efeito da tensão normal. O dinamômetro apresentou resposta linear, diminuta histerese, resolução de 0,4 N, faixa dinâmica de 100 N, tempo de resposta inferior a 12 ms e insensibilidade em relação ao ponto de aplicação da força.

Os instrumentos mencionados nas três referências possuem faixa dinâmica não superior a 100 N, sendo constituídos por duas hastes metálicas planas, não contemplando, portanto, a facilidade de utilização por parte do usuário.

Devido a estas limitações, foram implementados dois novos dinamômetros. Ambos possuem estruturas mecânicas idênticas, construídas com acrílico e duralumínio.

O primeiro, denominado dinamômetro *ER*, utilizou extensômetros resistivos e possui um microcontrolador no circuito eletrônico de condicionamento de sinais. O resultado da medição é mostrado em um *display* e há possibilidade de armazenamento de informações. O segundo, denominado dinamômetro *EC*, utilizou extensômetros capacitivos similares aos descritos no Capítulo 3. Possui circuito de condicionamento simples e de baixo custo.

A seguir descreve-se a estrutura mecânica dos dinamômetros *ER* e *EC*.



4. A - Implementação da Estrutura Mecânica dos Dinamômetros

4.2 – Metodologia e Materiais

A estrutura mecânica dos dois dinamômetros é constituída por um suporte desenvolvido em acrílico e por uma barra metálica de duralumínio 2024-T351. Esta liga possui 4,5% de cobre, sendo solubilizada e encruada por laminação a frio para aliviar tensões por estiramento (EMBRAER, 1999-200?).

A Figura 4.1 mostra uma foto da estrutura mecânica desenvolvida.

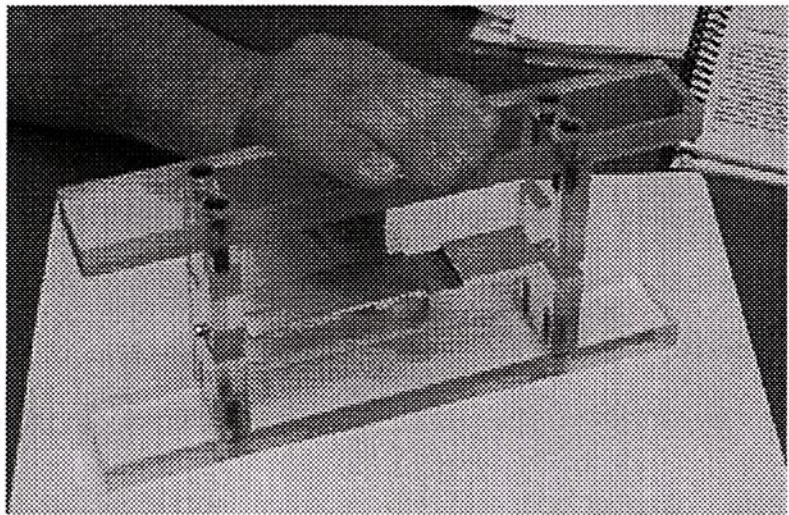


Figura 4.1 - Foto da estrutura mecânica dos dinamômetros *ER* e *EC*.

A estrutura mecânica foi projetada considerando a necessidade da segurança do usuário, a portabilidade e a versatilidade dos dinamômetros.

A Figura 4.2 mostra o desenho da estrutura mecânica.

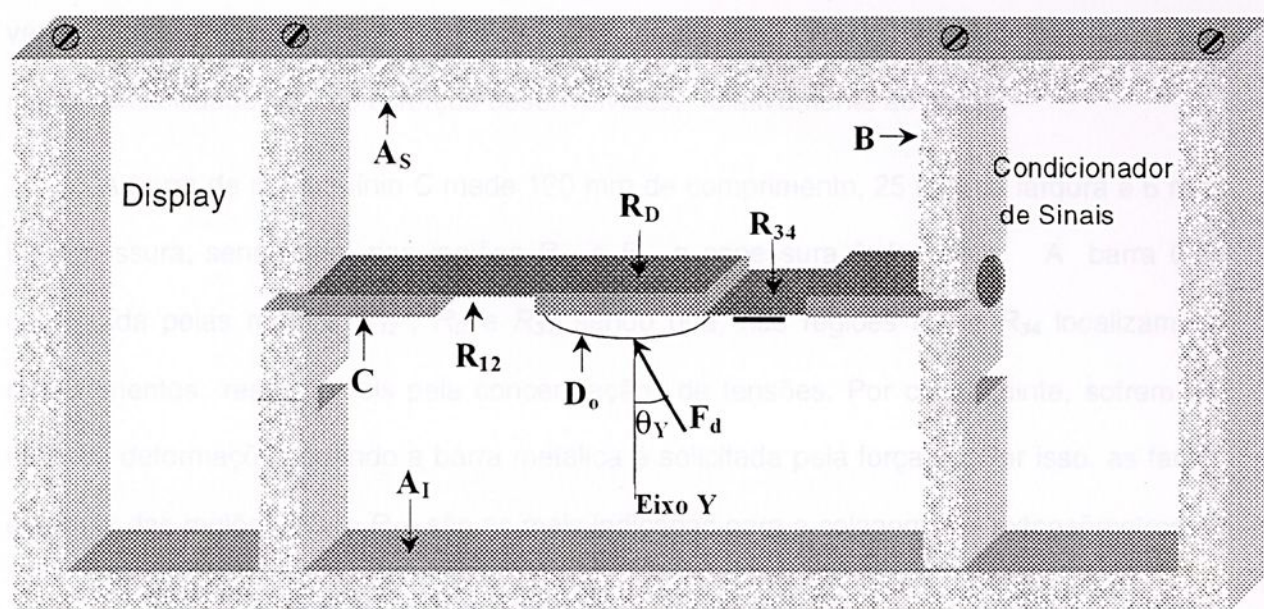


Figura 4.2 - Desenho da estrutura mecânica.

Na Figura 4.2 foram definidos os seguintes parâmetros: A_s e A_i : hastes horizontais de acrílico superior e inferior; B : haste vertical de acrílico para sustentação; C : barra metálica de duralumínio; R_{12} e R_{34} : regiões da barra de duralumínio rebaixasadas; D_0 : domo distribuidor de força; R_D : região de colocação do domo D_0 na face inferior; F_d : força aplicada pelo dedo; θ_Y : ângulo de aplicação da força F_d em relação ao eixo Y .

O acrílico foi escolhido porque possui boa isolamento elétrica e resistência mecânica adequada. A estrutura de acrílico mede 240 mm de comprimento, 35 mm de largura e 120 mm de altura.

No lado esquerdo da estrutura de acrílico instalou-se um *display* de cristal líquido para a apresentação das medidas de força, enquanto o lado direito foi reservado para a instalação do circuito de condicionamento de sinais.

Escolheu-se o duralumínio 2024-T351 para construir a barra metálica C porque este metal apresenta excelentes propriedades mecânicas em se tratando dos níveis de tensão normal no escoamento e tensão de cisalhamento no escoamento, resultando em grande

versatilidade. Possui módulo de elasticidade longitudinal (Young) inferior, resultando em maior sensibilidade com os esforços desenvolvidos, relativamente ao aço.

A barra de duralumínio C mede 120 mm de comprimento, 25 mm de largura e 6 mm de espessura, sendo que nas regiões R_{12} e R_{34} a espessura é de 2 mm. A barra C é constituída pelas regiões R_{12} , R_D e R_{34} , sendo que, nas regiões R_{12} e R_{34} localizam-se rebaixamentos responsáveis pela concentração de tensões. Por conseguinte, sofrem as maiores deformações quando a barra metálica é solicitada pela força F_d . Por isso, as faces externas das regiões R_{12} e R_{34} são as mais indicadas para a colagem dos extensômetros.

Na região R_D instalou-se um domo D_O na face inferior da barra metálica de maneira a distribuir uniformemente a força F_d no espaço disponível. A região R_D mede 30 mm de comprimento e 6 mm de espessura.

Em cada extremidade (esquerda e direita) da barra de duralumínio C existe um pino circular que mantém a estrutura metálica engastada de maneira a impedir o deslocamento horizontal e vertical. O formato circular dos pinos possibilita que a barra metálica gire se a força F_d solicitar, mas evita o surgimento de momento torsor. A barra metálica C pode ser engastada em um dos dois níveis verticais de ranhuras, projetadas com a finalidade de melhor acomodar a mão.

4.3 - Fundamentos Teóricos

A Figura 4.3 ilustra os esforços que atuam na barra de duralumínio submetida à força distribuída f_{dy} . Devido aos engastamentos, em ambas as extremidades, a estrutura metálica é hiperestática.



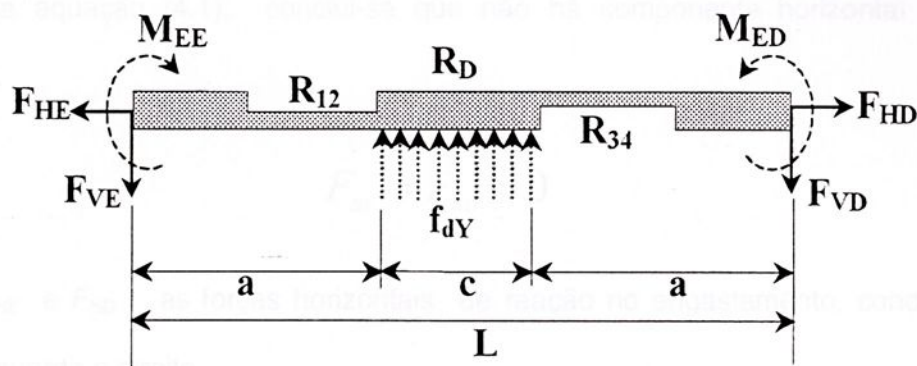


Figura 4.3 - Esforços atuantes na barra de duralumínio.

Os parâmetros apresentados na Figura 4.3 são:

f_{dY} : força uniformemente distribuída em R_D ao longo de c ; F_{VE} : força de reação vertical devido ao engastamento, concentrada do lado esquerdo; F_{VD} : força de reação vertical devido ao engastamento, concentrada do lado direito; M_{EE} : momento fletor de engastamento do lado esquerdo; M_{ED} : momento fletor de engastamento do lado direito; a : representa a distância da extremidade da barra a força f_{dY} ; c : representa o espaçamento disponível para a aplicação da força f_{dY} na região R_D ; L : representa o comprimento total da barra metálica.

Devido à forma que é realizada a pressão na barra metálica, θ_Y é pequeno tal que $0^\circ \leq \theta_Y \leq 20^\circ$. O caso limite ocorre para $\theta_Y = 20^\circ$. Mesmo neste caso, tem-se $\cos \theta_Y \cong 1.0$.

Desta forma, obtém-se F_{dY} da igualdade

$$F_{dY} = F_d \tag{4.1}$$

O domo D_o provoca a distribuição uniforme de força em c , tal que

$$f_{dY} = \frac{F_{dY}}{c} \tag{4.2}$$

Da equação (4.1), conclui-se que não há componente horizontal da força F_d .
Portanto,

$$F_{HE} = F_{HD} = 0$$

sendo F_{HE} e F_{HD} as forças horizontais de reação no engastamento, concentradas nos lados esquerdo e direito.

A partir da equação (4.2) obtém-se as igualdades

$$F_{VE} = F_{VD} = \frac{F_{dy}}{2} \tag{4.3}$$

As áreas das regiões R_{12} e R_{34} são idênticas e estão dispostas simetricamente de forma que

$$M_{EE} = M_{ED} \tag{4.4}$$

Na Figura 4.4 é apresentado o gráfico de momento fletor ao longo da barra de duralumínio.

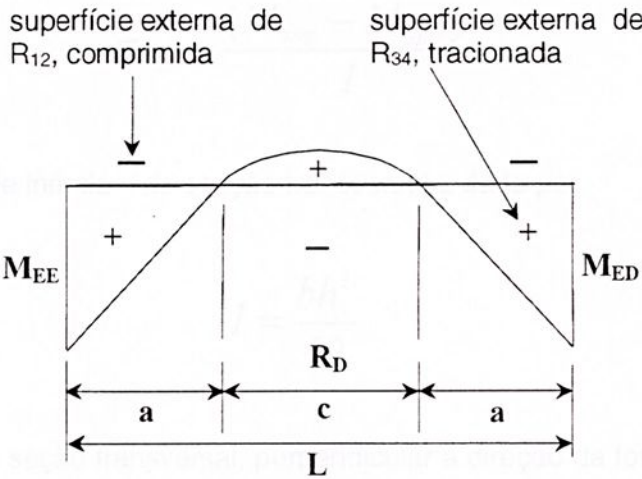


Figura 4.4 - Gráfico de momento fletor na barra de duralumínio.

4.3.1 - Determinação dos Esforços na Face Externa da Região R_{12}

Os momentos fletores M_{FVE} e M_{EE} são definidos por

$$M_{FVE} = \frac{3}{4} a F_{VE} \quad (4.5)$$

$$M_{EE} = \frac{F_{dY}}{24L} (3L^2 - c^2) \quad (4.6)$$

A distância y , do centro de gravidade da seção transversal à superfície externa, é dada por

$$y = \frac{e}{2} \quad (4.7)$$

na qual e representa a espessura da seção transversal das regiões R_{12} e R_{34} .

Devido à força F_{dY} surgem as tensões normal σ_{N12} e de cisalhamento τ_{C12} .

A tensão normal σ_{N12} é definida por

$$\sigma_{N12} = \frac{(M_{FVE} - M_{EE})y}{I} \quad (4.8)$$

O momento de inércia I da seção transversal é dado por

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.9)$$

sendo b a largura da seção transversal, perpendicular a direção da força F_{dY} , e h a altura da seção transversal, paralela à direção da força F_{dY} .

Desta forma, obtém-se

$$h = e \quad (4.10)$$

A tensão normal σ_{N12} e a tensão de cisalhamento τ_{C12} são definidas por

$$\sigma_{N12} = F_{dy} \frac{(9aL - 3L^2 + c^2)}{4eLA_T} \quad (4.11)$$

$$\tau_{C12} = \frac{3}{4} \frac{F_{dy}}{A_T} \quad (4.12)$$

sendo A_T a área da secção transversal.

A deformação ε_{12} que ocorre na superfície externa da região R_{12} é definida por

$$\varepsilon_{12} = F_{dy} \frac{(9aL + c^2 - 3L^2)}{4eELA_T} \quad (4.13)$$

sendo E módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young do duralumínio 2024-T351 (= 73794 N/mm²).

4.3.2 - Determinação dos Esforços na Face Externa da Região R_{34} .

O momento fletor M_{FVD} é dado por

$$M_{FVD} = M_{FVE} \quad (4.14)$$

sendo M_{FVD} o momento fletor provocado por F_{VD} .

A tensão normal σ_{N34} é

$$\sigma_{N34} = -\frac{(M_{FVD} - M_{ED})y}{I} \quad (4.15)$$

A tensão de cisalhamento τ_{C34} é definida segundo a igualdade

$$\tau_{C34} = \tau_{C12} \quad (4.16)$$

Como as regiões R_{12} e R_{34} são idênticas, l e y também são idênticos.

A tensão normal σ_{N34} é dada por

$$\sigma_{N34} = -\sigma_{N12} \quad (4.17)$$

A deformação ε_{34} que ocorre na superfície externa da região R_{34} é definida por

$$\varepsilon_{34} = -\varepsilon_{12} \quad (4.18)$$

4.3.3 - Determinação da Espessura das Secções Transversais das Regiões R_{12} e R_{34} .

A determinação da espessura (e) da região R_{12} ou R_{34} deve satisfazer as condições definidas nas equações (4.19) e (4.20)

$$F_s |\sigma_{NMAX}| \leq \bar{\sigma}_N \quad (4.19)$$

sendo $\bar{\sigma}_N$ a tensão normal no escomento ($= 310 \text{ N/mm}^2$).

O fator de segurança F_s adotado foi 1,4.

Além disso, tem-se:

$$F_s |\tau_{NMAX}| \leq \bar{\tau}_C \quad (4.20)$$

sendo $\bar{\tau}_C$ a tensão de cisalhamento no escomento.

Segundo Volterra e Gaines (1971) e Timoshenko e Gere (1983) tem-se

$$\bar{\tau}_c = 0,6 \bar{\sigma}_N \tag{4.21}$$

A espessura (e) é dada por

$$e \geq \left| \frac{F_s F_{dy} K_e}{\bar{\sigma}_N} \right|^{\frac{1}{2}} \tag{4.22}$$

sendo K_e definido por

$$K_e = \frac{(9aL + c^2 - 3L^2)}{4Lb} \tag{4.23}$$

4.B - Implementação do Dinamômetro *ER*

4.4 – Metodologia e Materiais

Na barra de duralumínio foram colados quatro extensômetros resistivos *Ext1*, *Ext2*, *Ext3* e *Ext4* , conforme mostra a Figura 4.5.

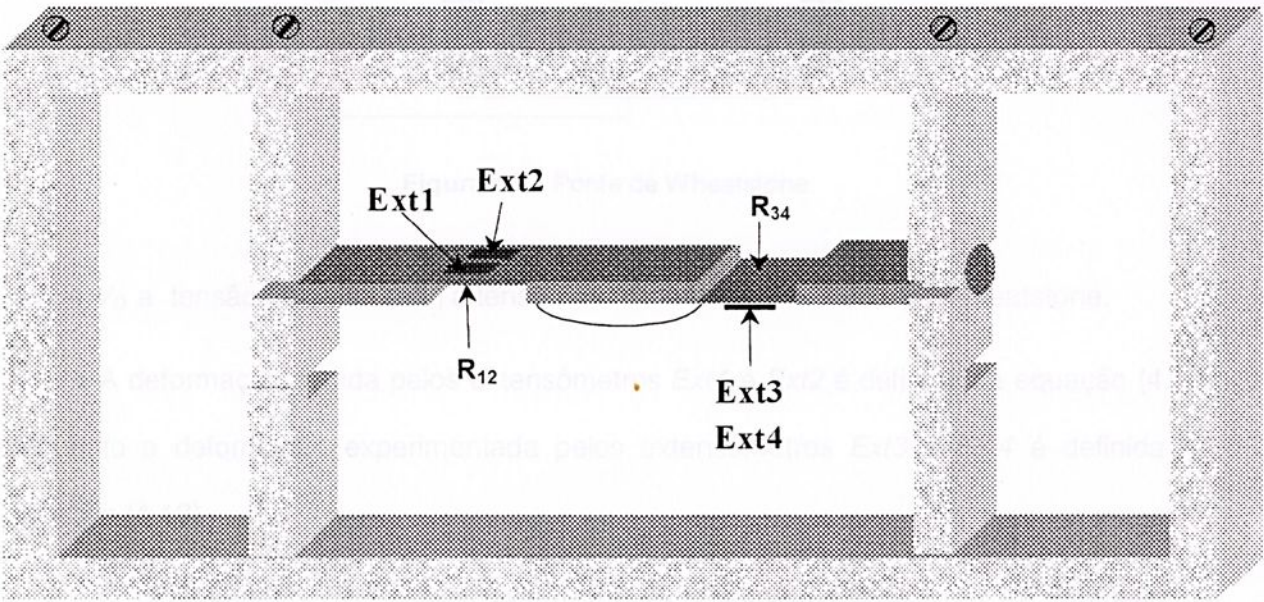


Figura 4.5 - Localização dos extensômetros resistivos.

Os extensômetros são do tipo TA-13-060HB-350L (Excel), ligados em Ponte de Wheatstone.

A Figura 4.6 mostra uma vista lateral da barra de duralumínio contendo os extensômetros resistivos.

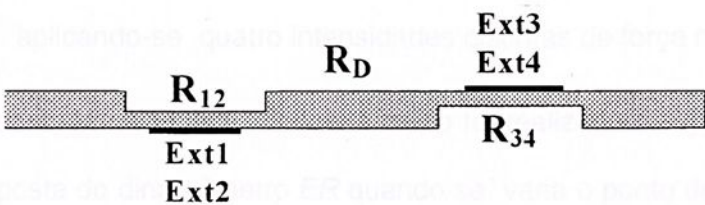


Figura 4.6 – Barra de duralumínio com extensômetros resistivos.

A Figura 4.7 ilustra a ligação em Ponte de Wheatstone dos extensômetros *Ext1*, *Ext2*, *Ext3* e *Ext4*.

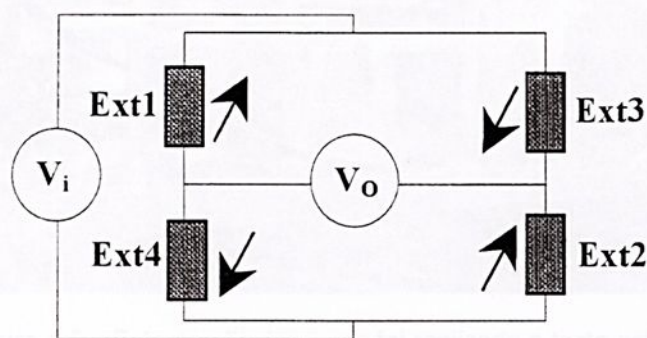


Figura 4.7 - Ponte de Wheatstone.

sendo V_o a tensão de saída e V_i a tensão de alimentação da Ponte de Wheatstone.

A deformação sofrida pelos extensômetros *Ext1* e *Ext2* é definida na equação (4.13) enquanto a deformação experimentada pelos extensômetros *Ext3* e *Ext4* é definida na equação (4.18).

O dinamômetro *ER* (desenvolvido com extensômetros resistivos) foi submetido a testes estáticos e dinâmicos utilizando-se um sistema mecânico constituído por um recipiente sustentado por um fio de *nylon*. O recipiente tem a finalidade de suportar massas padronizadas de 1 kg.

O ensaio estático constituiu-se de três etapas. Na primeira carregou-se a barra metálica de 0 a 196 N adicionando-se, progressivamente, massas de 1 kg, enquanto na segunda, descarregou-se, paulatinamente, retirando-se as massas do recipiente.

Na terceira etapa, estudou-se a resposta do dinamômetro em relação ao ponto de aplicação da força, aplicando-se quatro intensidades distintas de força na região R_D .

A foto apresentada na Figura 4.8 ilustra como foi realizado o experimento idealizado para verificar a resposta do dinamômetro *ER* quando se varia o ponto de aplicação da força F_d .

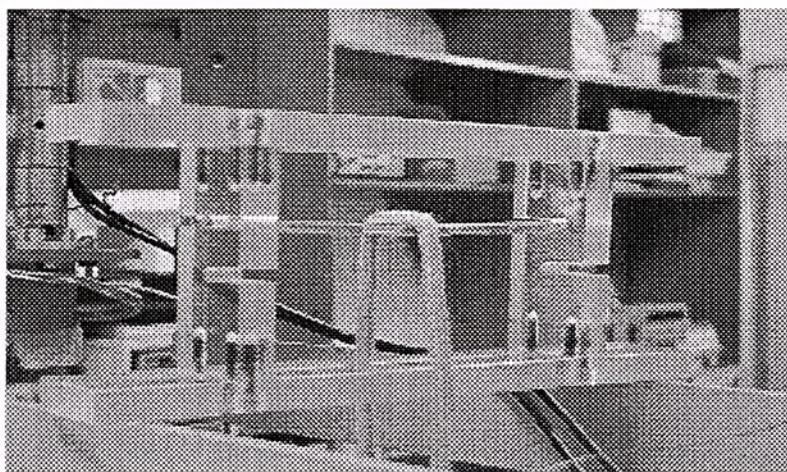


Figura 4.8 – Foto que ilustra como foi realizado o teste estático.

Para a determinação da precisão do instrumento, efetuou-se 10 medições de uma mesma intensidade de força (80 N).

O teste dinâmico foi realizado retirando-se, abruptamente, uma força aplicada sobre o dinamômetro *ER* e medindo-se, com o osciloscópio, o tempo de descida do sinal. Para uma mesma intensidade de força aplicada (80 N) efetuou-se dez medições.

O circuito de condicionamento foi construído com o amplificador e o filtro passa – baixas de segunda ordem, apresentado na Figura 4.9.

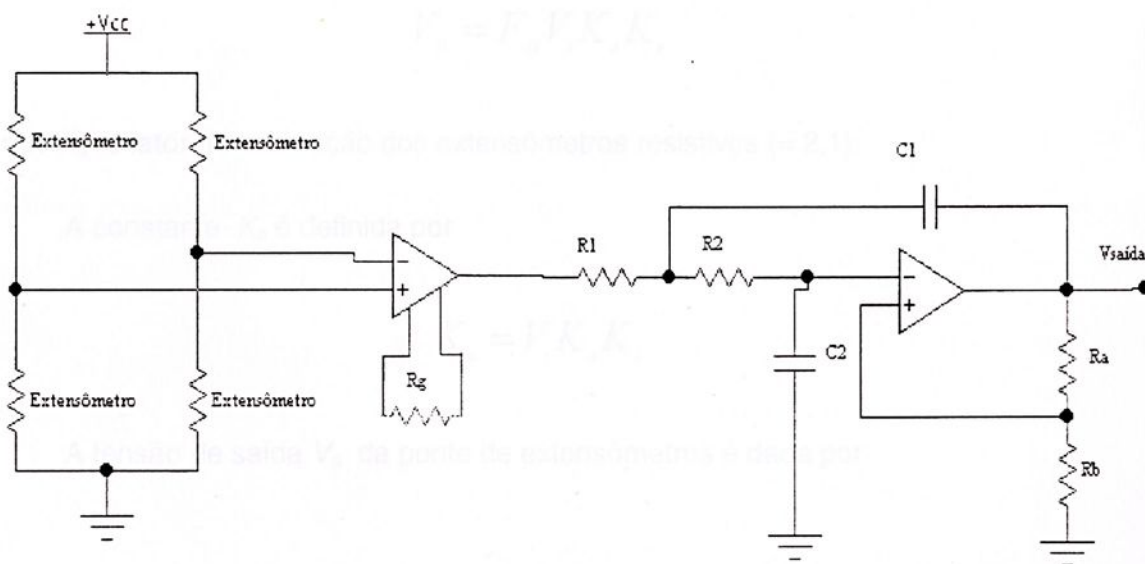


Figura 4.9 - Esquema elétrico do circuito de condicionamento de sinais.

O amplificador foi implementado com um amplificador de instrumentação INA 129 (Burr-Brown). O ganho do circuito de condicionamento de sinais é de 10^5 .

Um microcontrolador PIC 18 (Microship) foi conectado na saída do circuito de condicionamento de sinais. O microcontrolador realiza a leitura analógica, converte o valor lido em valor correspondente de força, apresenta o valor de força em um *display* e pode enviar os dados a um microcomputador. Para isso, conecta-se a porta de leitura analógica à saída do circuito condicionador de sinais. A calibração pode ser feita tanto via *software* (alterando constantes de conversão), quanto pelo potenciômetro de ajuste R_g do circuito de condicionamento de sinais.

As alimentações do circuito de condicionamento de sinais e do microcontrolador PIC 18 foram realizadas utilizando-se uma fonte DC Minipa, modelo MPC 3006D.

Para se medir a resposta do circuito de condicionamento de sinais utilizou-se um osciloscópio HP digital, de dois canais, modelo 54603B, de 60 MHz.

4.5 - Fundamentos Teóricos

A tensão de saída V_o da Ponte de Wheatstone é dada por

$$V_o = F_{dY} V_i K_a K_e \quad (4.24)$$

sendo K_a o fator de calibração dos extensômetros resistivos ($= 2,1$).

A constante K_c é definida por

$$K_c = V_i K_a K_e \quad (4.25)$$

A tensão de saída V_o da ponte de extensômetros é dada por

$$V_o = F_{dy} K_c \tag{4.26}$$

Portanto, há uma relação linear entre F_{dy} e V_o .

4.6 – Resultados Obtidos e Discussão

A Figura 4.10 apresenta a curva da tensão de saída do dinamômetro *ER* em função da força aplicada F_{dy} .

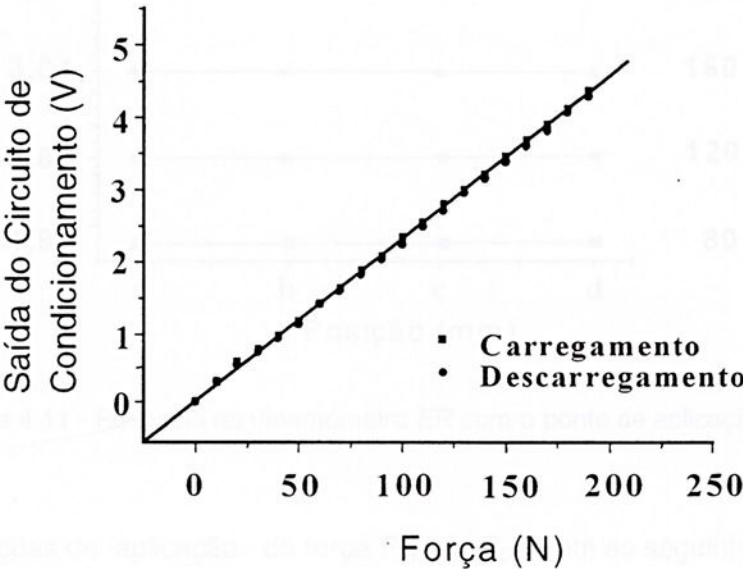


Figura 4.10 - Curva de calibração do dinamômetro *ER*.

Verifica-se uma relação linear entre a tensão de saída V_o do circuito de condicionamento de sinais e a força aplicada F_{dy} . O coeficiente de determinação da reta é 0,999, a histerese foi praticamente inexistente, sendo inferior a 1%.

Nesta caso, tem-se:

$$V_{ocs} = 0,024 F_{dy} \tag{4.27}$$

sendo V_{ocs} a tensão de saída do circuito eletrônico de condicionamento de sinais, em volts, e F_{dy} a força aplicada, em newtons.

A sensibilidade foi de 0,024 V/N, a precisão das medições de 99,3%, a acurácia de 0,9 N e o valor médio do tempo de descida de 7 ms.

O dinamômetro *ER* apresenta grande durabilidade e baixo custo.

A Figura 4.11 apresenta um gráfico que mostra que a resposta do dinamômetro *ER* não depende do ponto de aplicação da força ao longo de *c* na região *R_D*.

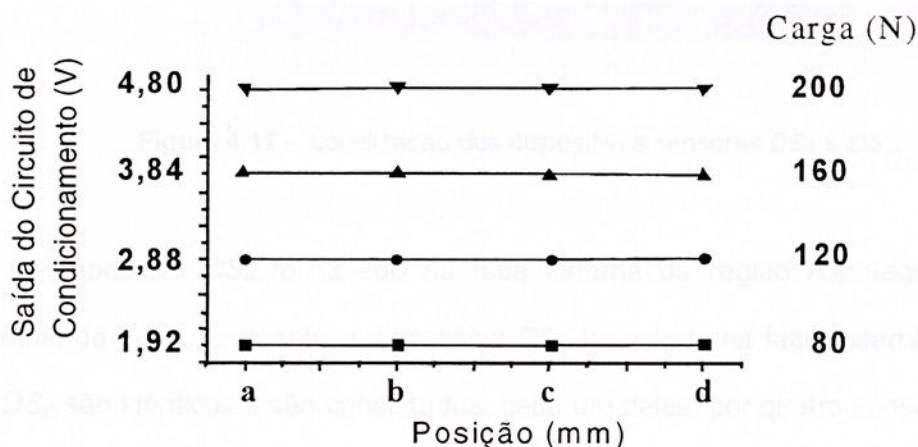


Figura 4.11 - Resposta do dinamômetro *ER* com o ponto de aplicação da força.

As posições de aplicação da força F_{dy} em *R_D* foram as seguintes:

a: a 3 mm da extremidade esquerda; b: a 11 mm da extremidade esquerda; c: a 19 mm da extremidade esquerda; d a 27 mm da extremidade esquerda.

4.C - Implementação do Dinamômetro *EC*

4.7 - Materiais e Métodos

A estrutura mecânica da Figura 4.12 foi utilizada, sendo os extensômetros resistivos do dinamômetro *ER* substituídos pelos dispositivos *DS_A* e *DS_B*, colados nas posições indicadas, constituídos por extensômetros capacitivos.

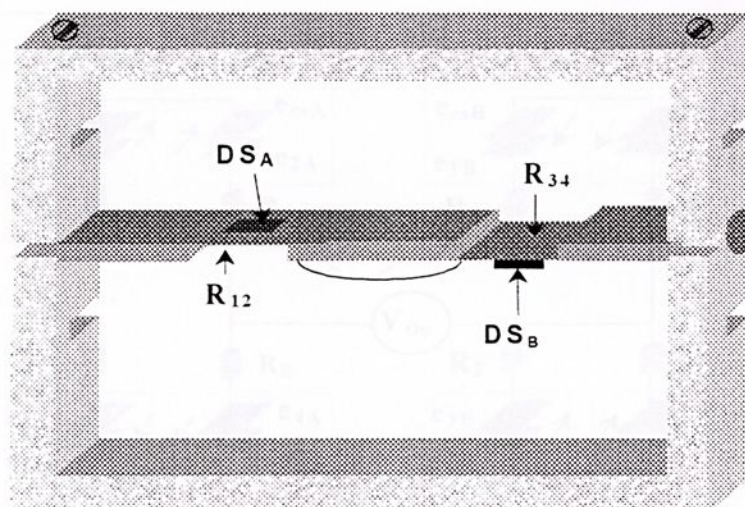


Figura 4.12 - Localização dos dispositivos sensores DS_A e DS_B .

O dispositivo DS_A foi colado na face externa da região R_{12} segundo a direção longitudinal da barra, enquanto o dispositivo DS_B foi colado na face externa da região R_{34} . DS_A e DS_B são idênticos e são constituídos, cada um deles, por quatro sensores capacitivos independentes.

O sensor capacitivo é constituído por dois eletrodos planos e paralelos sujeitos a deformação.

As partes que compõem o dispositivo DS_A são idênticas as que foram apresentadas na Figura 3.3.

O circuito de condicionamento conectado ao extensômetro é constituído por um amplificador diferença que utiliza o circuito integrado LF 356 (National Semiconductor), um filtro passa-faixa e um detector de pico.

Os sensores capacitivos de DS_A foram ligados com os sensores capacitivos de DS_B , gerando duas pontes de sensores capacitivos idênticas, denominadas de extensômetros α e ϕ .

A Figura 4.13 mostra a ligação dos extensômetros α e ϕ .

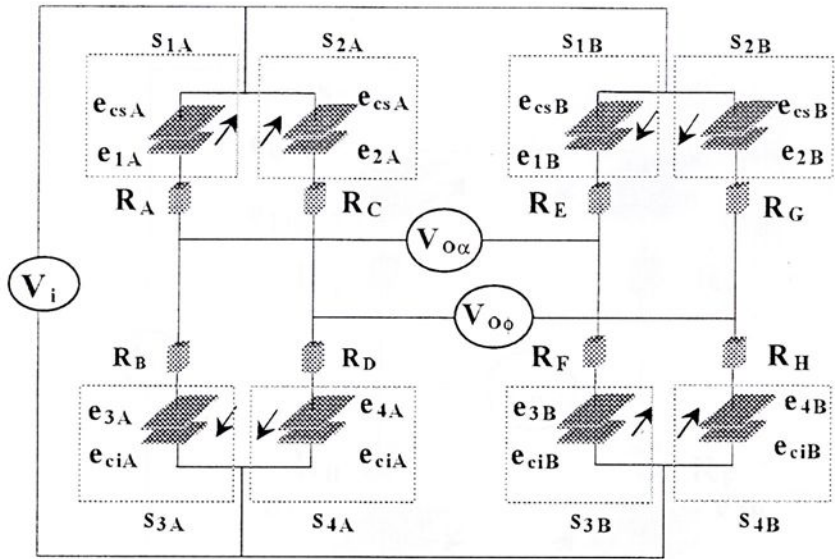


Figura 4.13 – Ligações dos extensômetros α e ϕ .

Os resistores R_A , R_B , R_C , R_D , R_E , R_F , R_G e R_H são de filme metalizado, de 100 Ω cada.

Os resistores têm a finalidade de evitar curto circuito entre os eletrodos. Os resistores foram escolhidos de maneira que

$$R \ll X_{cs}$$

sendo X_{cs} a reatância capacitiva do sensor e R a resistência introduzida em série com o sensor.

Os extensômetros α e ϕ foram ligados em paralelo. A tensão de alimentação V_i dos extensômetros foi de 7 V senoidal com frequência de 15 KHz. V_{OP} e V_{OV} são as tensões de saída dos extensômetros α e ϕ , respectivamente.

A Tabela 3.1 mostra os componentes dos extensômetros α e ϕ .

A Figura 4.14 mostra o extensômetro α .

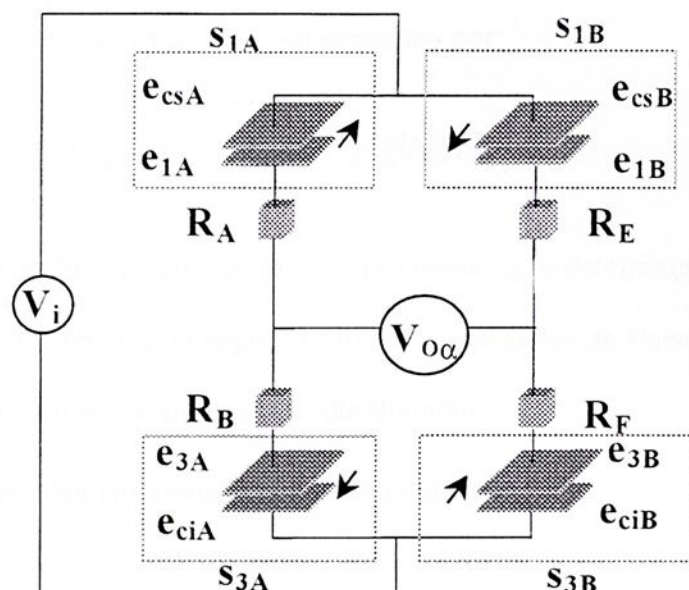


Figura 4.14 - Extensômetro α .

Os extensômetros α e ϕ monitoram a mesma deformação (e), conseqüentemente, fornecem a mesma tensão de saída. A comparação eletrônica das saídas $V_{O\alpha}$ e $V_{O\phi}$ aumenta significativamente a confiabilidade na utilização dos extensômetros.

O circuito de condicionamento de sinais utilizado foi o descrito no Capítulo 3.

O dinamômetro *EC* (desenvolvido com extensômetros capacitivos) foi submetido a testes estático e dinâmico, utilizando-se o sistema mecânico mencionado no item 4.4. A repetibilidade do instrumento foi medida utilizando-se forças de 40 N.

Os equipamentos mencionados no item 4.4 foram também utilizados nos experimentos, realizados com o dinamômetro *EC*, além do gerador de sinal DEGEN (módulo PU 2222) para alimentar as pontes sensoras.

4.8 - Fundamentos Teóricos

Cada sensor capacitivo é um capacitor de placas paralelas cujos eletrodos estão sujeitos à deformação devido a dois fatores: a força F_{dy} aplicada pelo dedo ou pela mão e a

variação de temperatura ΔT no ambiente em que está inserido o sensor. Assim sendo, a capacitância dos sensores s_{3A} e s_{4A} pode ser expressa por:

$$C_{34} = C_I - \varepsilon_L \nu C_I \pm \beta \Delta T C_I \quad (4.28)$$

sendo C_I a capacitância do capacitor de placas paralelas, ε_L a deformação longitudinal da barra de duralumínio definida na equação (4.18), ν o coeficiente de Poisson ($= 0,33$) e β o coeficiente de dilatação térmica superficial da duralumínio.

O coeficiente de dilatação térmica superficial é definido por

$$\beta = 2\delta \quad (4.29)$$

sendo δ o coeficiente de dilatação térmica linear. Para o duralumínio 2024-T351, $\delta = 13.10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

A capacitância inicial C_I é dada por

$$C_I = \frac{\xi W_I L_I}{D_I} \quad (4.30)$$

na qual ξ é a permissividade dielétrica do ar ($= 8,85.10^{-12} \text{ F/m}$), W_I a largura do eletrodo, L_I o comprimento do eletrodo e D_I o espaçamento entre eletrodos.

A capacitância dos sensores s_{1A} e s_{2A} é expressa por

$$C_{12} = C_I + \varepsilon_L C_I \pm \beta \Delta T C_I \quad (4.31)$$

A tensão produzida pelo extensômetro é dada por

$$V_o = \varepsilon_L V_i \nu \quad (4.32)$$

$$V_o = F_{dy} K_R \quad (4.33)$$

Substituindo-se na equação 4.32 a equação 4.13 para ε_L obtém-se

$$K_R = V_i v \left[\frac{(9aL + c^2 - 3L^2)}{4eEL A_t} \right] \quad (4.34)$$

4.9 - Resultados Obtidos e Discussão

A Figura 4.15 apresenta a curva de calibração do dinamômetro EC.

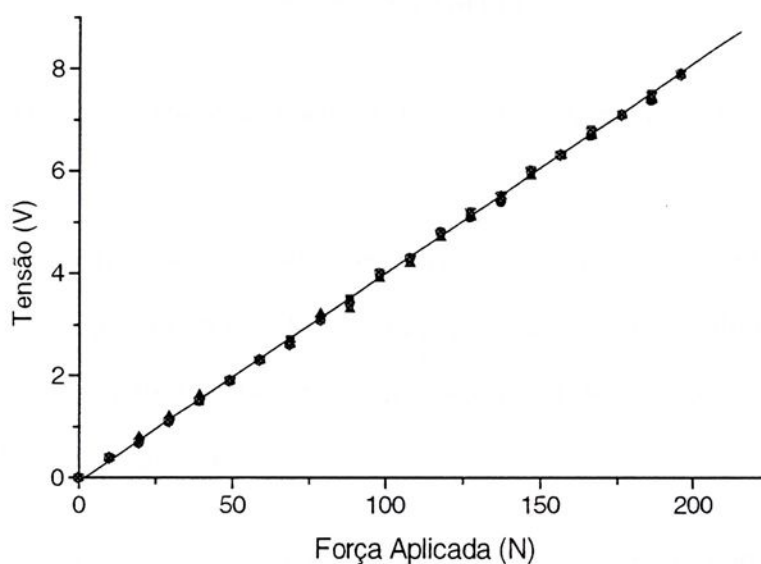


Figura 4.15 - Curva de calibração do dinamômetro EC.

Constata-se que a resposta do dinamômetro EC é linear. O coeficiente de determinação da reta é 0,999. A histerese é 2,5%, a sensibilidade 0,041 V/N e a precisão das medições é de 98,8%.

O valor médio do tempo de descida foi de 12 ms.

A Figura 4.16 mostra a variação da força em função do ponto de aplicação da força F_{dy} na barra, para o dinamômetro EC.

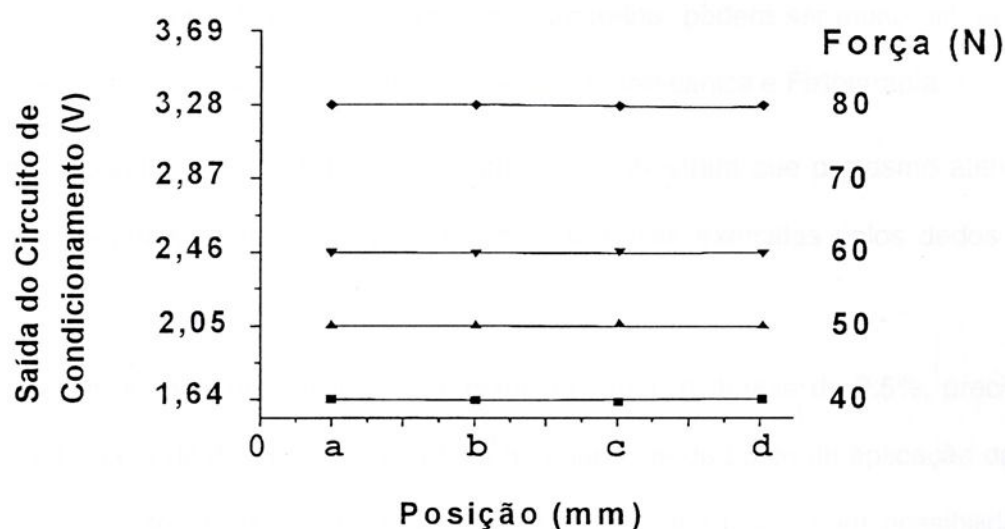


Figura 4.16 – Resposta do dinamômetro *EC* com o ponto de aplicação da força.

Na Figura 4.16 foram definidos os seguintes parâmetros: *a*: Força aplicada a 3 mm da extremidade esquerda de R_D ; *b*: Força aplicada a 11 mm da extremidade esquerda de R_D ; *c*: Força aplicada a 19 mm da extremidade esquerda de R_D e *d*: Força aplicada a 27 mm da extremidade esquerda de R_D .

Como se observa, a resposta do dinamômetro *EC* não depende do ponto de aplicação da força.

4.10 - Conclusões

Os resultados mostram que o dinamômetro *ER* atende aos requisitos necessários para se efetuar medições de forças exercidas pelos dedos e pela mão.

Suas principais características são: resposta linear, histerese inferior a 1%, precisão de 99,3%, sensibilidade de 0,024 V/N, acurácia de 0,9 N, resposta independente do ponto de aplicação da força, tempo de resposta de 7 ms, boas características ergonômicas, facilidade de utilização, com a apresentação do resultado da medição em *display* digital ou na tela de um computador, possibilidade de armazenamento de informações, visando utilização em prontuário eletrônico do paciente para fins de análise estatística dos

resultados. Os resultados obtidos indicam que o aparelho poderá ser muito útil nas áreas de Medicina de Reabilitação, Engenharia Biomédica, Biomecânica e Fisioterapia.

Os resultados obtidos com o dinamômetro *EC* mostram que o mesmo atende aos requisitos necessários para se efetuar medições de forças exercidas pelos dedos e pela mão.

Suas principais características são: resposta linear, histerese de 2,5%, precisão de 98,8%, sensibilidade de 0,041 V/N, a resposta não depende do ponto de aplicação da força, possui boas características ergonômicas, facilidade de utilização, com possibilidade de apresentação do resultado da medição em *display* digital ou na tela de um computador.

Os dinamômetros *ER* e *EC* poderão ser muito úteis para fisioterapeutas e médicos que trabalham em medicina de reabilitação. Uma outra aplicação importante para os equipamentos será na avaliação de forças exercidas pelas mãos, nos exames médicos dos que pretendem tirar ou renovar a carteira de habilitação de motorista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Radwin, R. G.; Masters, G. P.; Lupton, F. W. "A linear force-summing hand dynamometer independent of point application". *Applied Ergonomics*, v. 22, pp. 339-345, 1991.

Da Silva, J. G.; De Carvalho, A. A. "Implementação de um dinamômetro para medições de forças exercidas pelos dedos e pelas mãos". *Anais do IV Fórum Nacional de Ciência e Tecnologia em Saúde*, Curitiba, pp. 157-158, 1998.

Da Silva, J. G.; De Carvalho, A. A.; Rodrigues, R. O. "Desenvolvimento de um dinamômetro para Avaliações Clínicas e Funcionais das Mãos". *Anais do Congresso Ibero-Americano – IBERDISCAP*, Madrid-Espanha, pp. 429 – 434, 2000.

EMBRAER. Metais utilizados em aeronáutica, (1999-200?), Apostila de curso, digitada.



Volterra, E.; Gaines, J.H. "Advanced strength of materials". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, p. 522, 1971.

Timoshenko, S.P.; Gere, J.E. "Mecânica dos sólidos". Livros Técnicos e Científicos, v.2, Rio de Janeiro, 1983.



Capítulo 5

Sensor Capacitivo para a Determinação de Água em Óleo Lubrificante

5.1 – Introdução

O ambiente úmido de usinas hidrelétricas provoca alterações de algumas propriedades importantes de óleos lubrificantes utilizados em reguladores de velocidade e em mancais de escora de unidades geradoras. A viscosidade, por exemplo, pode sofrer modificação acentuada.

O mancal de escora é uma peça metálica constituída por três tipos de metais, dispostos em camadas sobrepostas, contendo metal patente na camada externa, bronze na camada intermediária e aço na camada inferior.

Segundo Delforge (200?), o óleo lubrificante contém enxofre que, ao se combinar quimicamente com a água, na presença de calor gerado pelo movimento relativo das peças metálicas, produz ácidos tais como o sulfúrico e o sulfídrico.

Tais ácidos diminuem a rugosidade do metal patente que ocupa a superfície do mancal que é o principal responsável pela lubrificação hidrodinâmica. Devido a isto, ocorre a diminuição da espessura da película de óleo que separa as partes metálicas que têm movimento relativo, resultando na aproximação das mesmas e, conseqüentemente, no superaquecimento da região. Numa segunda etapa, o ácido sulfúrico arranca o metal patente de certas regiões do mancal e expõe o bronze que se encontra na camada inferior do mancal.

O contato do ácido sulfídrico com o bronze produz sulfeto de cobre, um sal.

A presença de sulfeto de cobre é extremamente prejudicial ao sistema mecânico.



As Figuras 5.1 e 5.2 são exemplos da ação da água no mancal de escora.

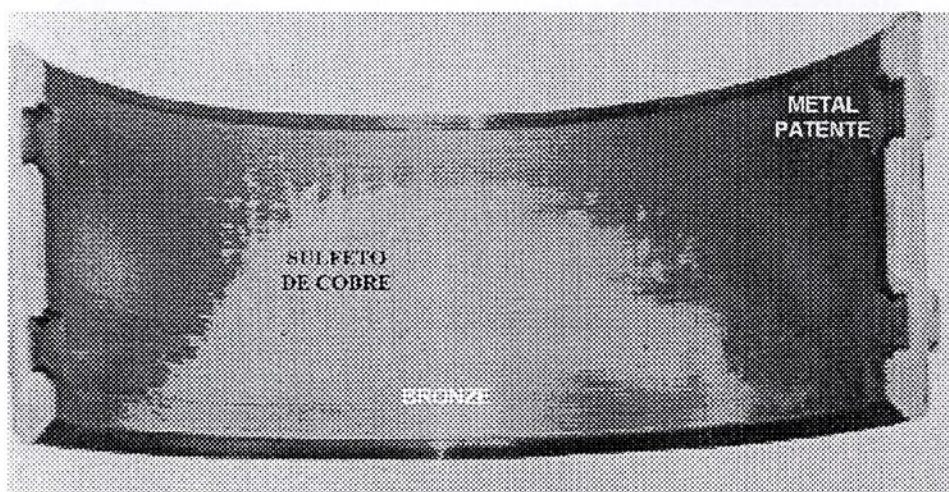


Figura 5.1 – Mancal de escora inutilizado.

O metal patente possui coloração cinza escuro e deveria cobrir toda superfície do mancal. Entretanto, há uma grande região de coloração branca demonstrando a presença de sulfeto de cobre.

Na Figura 5.2, observa-se: 1) a falta de metal patente na superfície do mancal; 2) a formação de sulfeto de cobre na região mais clara, e 3) o superaquecimento provocado por falta de lubrificação indicada pela tonalidade escurecida do bronze. As ilustrações dão idéia da gravidade do problema.

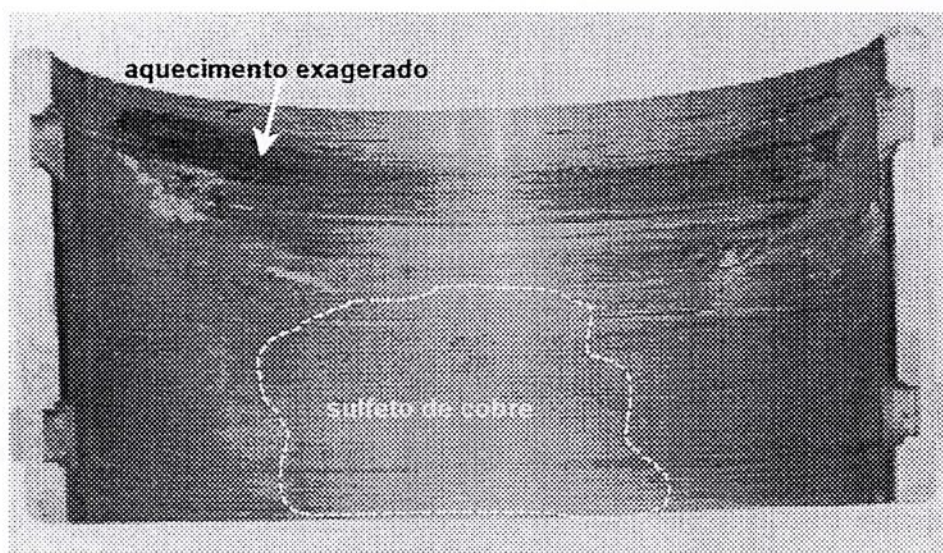


Figura 5.2 – Aquecimento exagerado e presença de sulfeto de cobre.

Segundo pesquisas realizadas, as concentrações de água que devem ser detectadas nos óleos lubrificantes são baixas, menores que 0,5% em volume, e é desejável que se tenha um método de medição com resolução de 0,1% (Higuti, 2001).

O monitoramento do estado do óleo é importante, pois possibilita planejamentos para manutenções preventivas, reduzindo custos e riscos de paradas não programadas (Higuti, 2001).

Existe uma demanda considerável por instrumentos que realizem a caracterização ou a discriminação de líquidos homogêneos e não-homogêneos, com elevada sensibilidade e acurácia (Higuti, 2001).

Higuti (2001) desenvolveu metodologia precisa e robusta para determinação da densidade, velocidade de propagação e coeficiente de atenuação acústicos em líquidos, com o objetivo de medir a quantidade de água em óleo através de técnicas ultra-sônicas. Utilizou uma célula de medição com um transdutor duplo-elemento que elimina o problema da difração acústica. Realizou experimentos com diferentes líquidos e avaliou a potencialidade do método, estudando emulsões de água em óleo com baixas concentrações (0 a 10% em volume).

Os experimentos que foram realizados apresentaram grandes dificuldades relacionadas a eliminação de bolhas de ar na mistura bem como a troca da amostra na célula, devido à viscosidade do óleo. Assim, as dificuldades em controlar bem todas as condições, tornaram o método insensível para detecção de pequenas concentrações de água em óleo.

CY e CB (2003) desenvolveram um microsensor capacitivo, com técnica de *micromachine* (MEMS), para a determinação de umidade. O dispositivo é constituído basicamente por um resistor de platina, na forma de um filme fino, e de uma microestrutura de nitrito/silicone recoberta com um filme de polímero (poliamida). Os dados experimentais indicaram baixa histerese para umidade relativa ($> 65\%$), coeficiente de linearidade de 0,9989 e grande estabilidade.

Arregui et al. (2003) realizaram um estudo sobre a sensibilidade óptica de quatro diferentes hidrogéis em relação a umidade. Os hidrogéis investigados eram de poli-hidroxietil metacrilato, poli-acrilamida, poli-N-vinil pirolidinome e agarose. Foram depositados sobre a superfície de uma fibra óptica através de polimerização direta. Os materiais foram analisados com diferentes fontes de luz, temperatura e umidade relativas. O aumento do tamanho dos póros dos hidrogéis melhora acentuadamente a sensibilidade e o tempo de resposta destes materiais com a umidade.

Wang et al. (2004) desenvolveram dois sensores de umidade, sendo um construído com material compósito nanocristalino constituído de LaFeO_3 e o outro com resina de acrílico com polímero quaternário. Ambos foram avaliados e comparados entre si em relação à sensibilidade, histerese e tempo de resposta. Foi verificado que a frequência influencia a linearidade das curvas de resistência com a umidade relativa, bem como a relação entre a capacitância e a umidade relativa.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sensor, constituído por pontes de sensores capacitivos, para medir o teor de água em óleos lubrificantes de reguladores de velocidade e de mancais de escora de unidades geradoras de usinas



hidrelétricas. A estrutura em ponte possibilita a obtenção de elevada sensibilidade e de alta estabilidade com a temperatura.

5.2 - Fundamentos Teóricos

Visando a determinação do volume de água presente em óleo, através de um sensor capacitivo de placas paralelas, foram analisadas duas diferentes constituições para o dielétrico:

- 1) Constituído unicamente por óleo;
- 2) Constituído por óleo e água.

5.2.1 - Dielétrico Constituído Unicamente por Óleo

Seja um capacitor de placas paralelas. As placas possuem comprimento H , largura L e estão separadas pela distância D , conforme ilustrado na Figura 5.3. Considera-se que o campo elétrico seja uniforme entre as placas e que $D \ll H, L$.

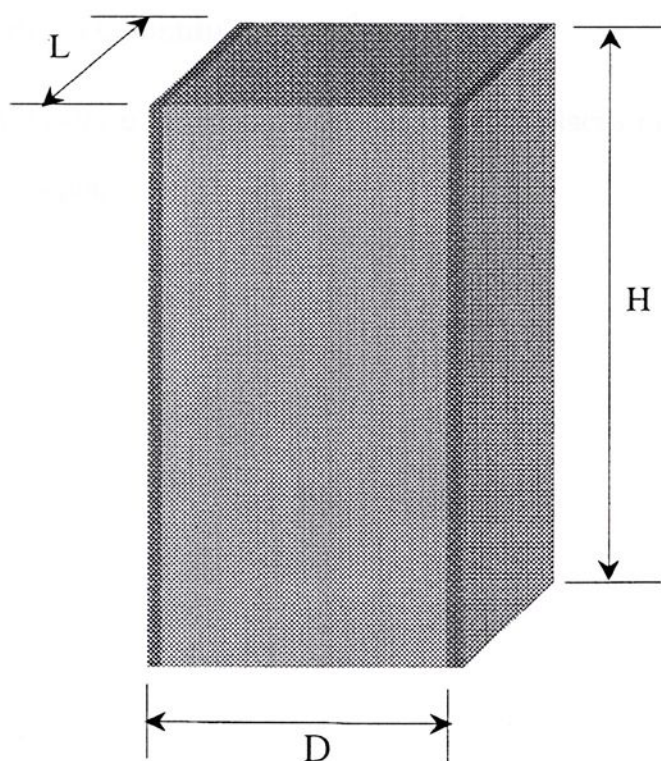


Figura 5.3 – Capacitor de placas paralelas com dielétrico constituído unicamente por óleo.

O volume do dielétrico é dado por:

$$V_d = LDH \quad (5.1)$$

Como o óleo é o único constituinte do dielétrico, seu volume é expresso por:

$$V_{OI} = V_d \quad (5.2)$$

A capacitância C_{dl} do capacitor, também denominada C_{OI} neste trabalho, é descrita por:

$$C_{dl} = \xi_{dl} \frac{V_d}{D^2} \quad (5.3)$$

sendo ξ_{dl} a permissividade do dielétrico que, neste caso, é igual à permissividade dielétrica do óleo ξ_o .

5.2.2 - Dielétrico Constituído por Óleo e Água

A Figura 5.4 mostra o desenho de um capacitor de placas paralelas com dielétrico constituído por óleo e água.

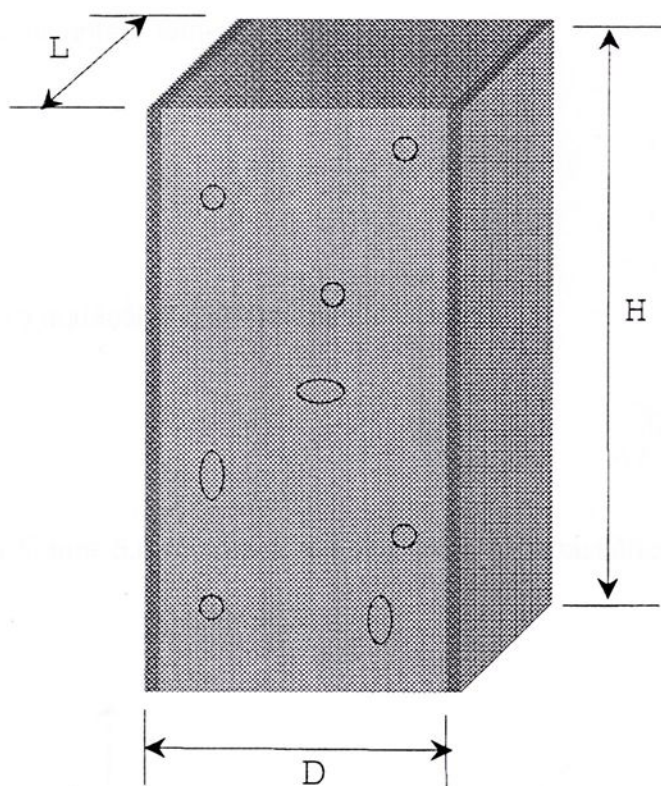


Figura 5.4 – Capacitor de placas paralelas com dielétrico constituído por óleo e água.

Diferenciando e posteriormente integrando a equação (5.3) da capacitância C_d em relação a ξ_d , obtém-se:

$$C_{dF} = C_{dl} + \frac{LH(\xi_{dF} - \xi_{dl})}{D} \quad (5.4)$$

sendo C_{dF} a capacitância e ξ_{dF} a permissividade quando o dielétrico é constituído por óleo e água.

Substituindo-se as condições iniciais na equação 5.4, obtém-se a equação a equação 5.5.

$$C_{dF} = C_{ol} + \frac{LH(\xi_{dF} - \xi_o)}{D} \quad (5.5)$$

Definindo a constante K tem-se

$$\frac{C_{dF}}{\xi_{dF}} = \frac{V_d}{D^2} = K \quad (5.6)$$

Rescrevendo a equação 5.5 em relação a K tem-se

$$C_{dF} = \xi_{dF} K \quad (5.7)$$

O gráfico da Figura 5.5 mostra a relação entre a capacitância e a permissividade dielétrica.

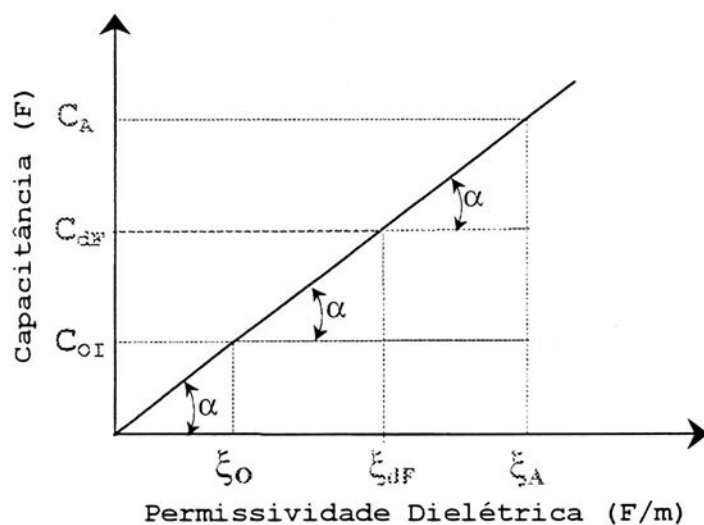


Figura 5.5 - Relação entre a capacitância C_{dF} e a permissividade dielétrica ξ_{dF} .

Utilizando a Figura 5.5, obtém-se:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_{oI}}{\xi_o} = \frac{C_A}{\xi_A} = K \quad (5.8)$$

O volume do dielétrico é dado por:

$$V_d = V_{OF} + V_A \quad (5.9)$$

sendo V_{OF} o volume de óleo e V_A o volume de água do dielétrico.

5.2.3 - Determinação das Variações dos Volumes de Óleo e de Água

Diferenciando V_d em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{d}{dt}(V_{OF} + V_A) = 0 \quad (5.10)$$

Integrando V_d em relação ao tempo, tem-se:

$$-\int_{V_{OFI}}^{V_{OFF}} \left(\frac{dV_{OF}}{dt} \right) dt = \int_{V_{AI}}^{V_{AF}} \left(\frac{dV_A}{dt} \right) dt \quad (5.11)$$

$$\Delta V_A = -\Delta V_{OF} \quad (5.12)$$

Assim, quando se aumenta o volume de água ocorre a diminuição proporcional do volume de óleo no dielétrico.

5.2.4 - Determinação do Volume de Água

O gráfico da Figura 5.6 apresenta a relação entre as capacitâncias, as permissividades e os respectivos volumes de óleo e água.

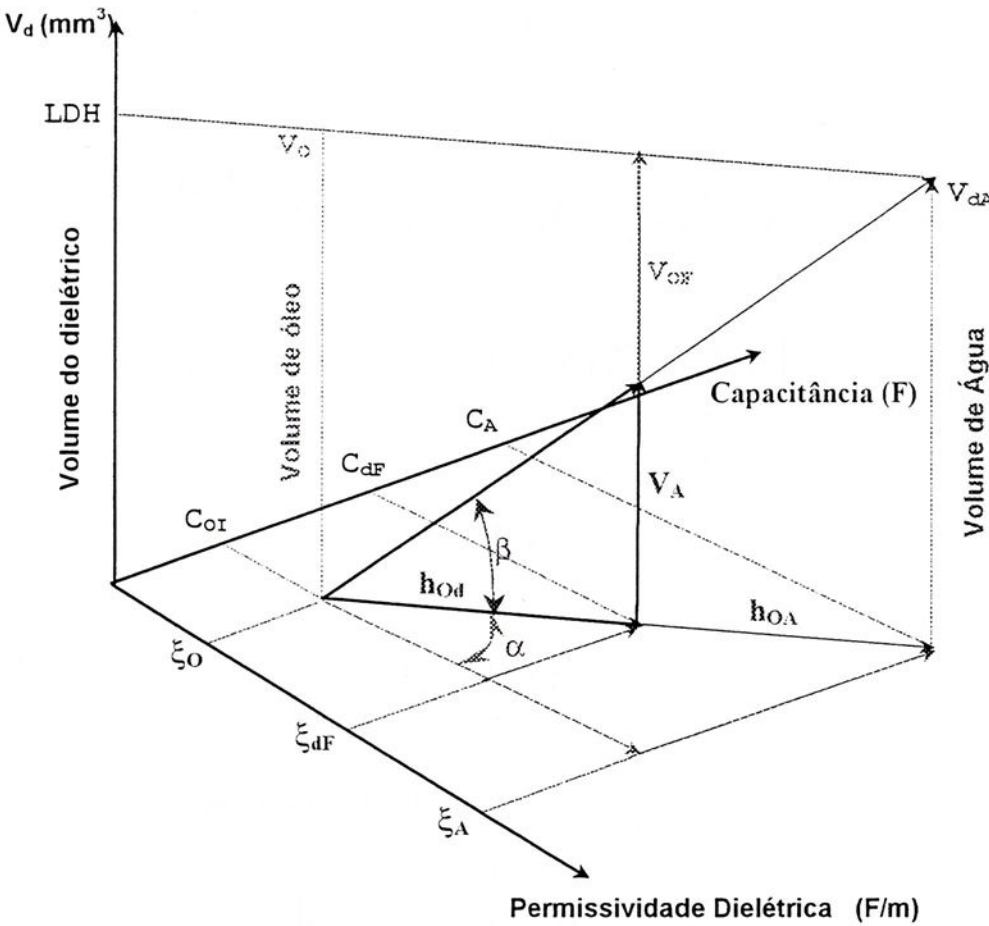


Figura 5.6 - Relação entre capacitâncias, permissividades dielétricas e volumes de óleo e água.

Através de relações geométricas pode-se obter as seguintes expressões, a partir do gráfico da Figura 5.6:

$$h_{oA} = [(C_A - C_{oI})^2 + \delta^2 (\xi_A - \xi_o)^2]^{1/2} \tag{5.13}$$

sendo δ a função de transferência, tal que:

$$C = \delta \xi \tag{5.14}$$

$$tg\beta = \frac{V_{dA}}{h_{oA}} \tag{5.15}$$

$$V_{dA} = V_d \quad (5.16)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_d}{[(C_A - C_{Ol})^2 + \delta^2 (\xi_A - \xi_o)^2]^{1/2}} \quad (5.17)$$

$$h_{Od} = [(C_{dF} - C_{Ol})^2 + \delta^2 (\xi_{dF} - \xi_o)^2]^{1/2} \quad (5.18)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_A}{h_{Od}} \quad (5.19)$$

$$V_A = h_{Od} \operatorname{tg} \beta \quad (5.20)$$

Usando as relações acima, obtém-se:

$$V_A = V_d \frac{[(C_{dF} - C_{Ol})^2 + \delta^2 (\xi_{dF} - \xi_o)^2]^{1/2}}{[(C_A - C_{Ol})^2 + \delta^2 (\xi_A - \xi_o)^2]^{1/2}} \quad (5.21)$$

Substituindo-se a equação(5.5) na equação (5.21), obtém-se (5.22):

$$V_A = V_d \left[\frac{(C_{dF} - C_{Ol})^2 + \delta^2 (C_{dF} - C_{Ol})^2 \frac{D^4}{V_d^2}}{(\xi_A - \xi_o)^2 \frac{V_d^2}{D^4} + \delta^2 (\xi_A - \xi_o)^2} \right]^{1/2} \quad (5.22)$$

Tem-se:

$$V_A = D^2 \left[\frac{(C_{dF} - C_{Ol})}{(\xi_A - \xi_o)} \right] \quad (5.23)$$

$$V_A = V_d \left[\frac{(C_{dF} - C_{OI})}{C_{OI}} \frac{\xi_o}{(\xi_A - \xi_o)} \right] \quad (5.24)$$

Considerando a influência da temperatura, o volume de água deve ser expresso por:

$$V_A = D^2 \left[\frac{(C_{dF} - C_{OI} \pm \Delta C_T)}{(\xi_A - \xi_o \pm \Delta \xi_T)} \right] \quad (5.25)$$

Se $\xi_A \neq \xi_o \Rightarrow \Delta \xi_T \neq 0$.

Como $\Delta \xi_T \ll (\xi_A - \xi_o)$ e $(\xi_A - \xi_o) \ll 1$ tem-se:

$$V_A = D^2 \left[\frac{(C_{dF} - C_{OI} \pm \Delta C_T)}{(\xi_A - \xi_o)} \right] \quad (5.26)$$

Para $C_{dF} \neq C_{OI} \Rightarrow \Delta C_T \neq 0$

sendo ΔC_T a variação de capacitância provocada pela temperatura.

5.2.5 - Determinação do Sinal Elétrico Produzido Pelos Sensores

A Figura 5.7 ilustra a conexão dos sensores capacitivos em uma ponte.

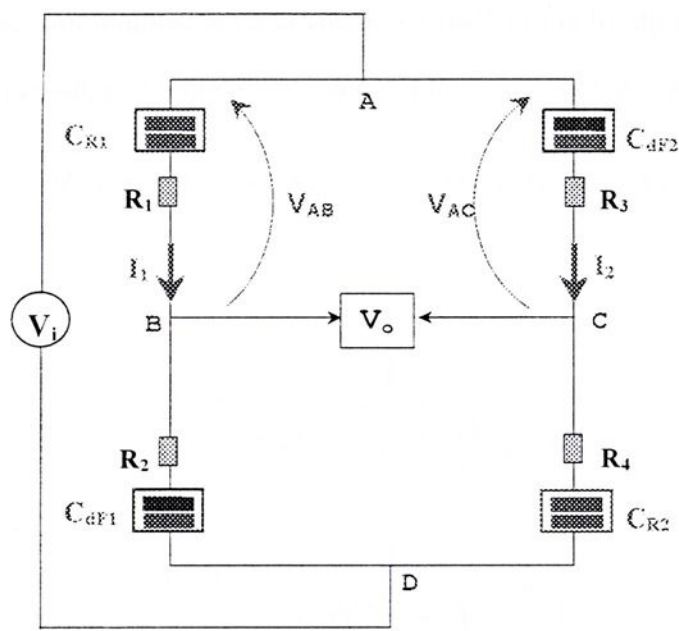


Figura 5.7 – Ponte de sensores capacitivos.

Na Figura 5.7 os seguintes componentes foram definidos:

V_i : tensão de alimentação da ponte RC; V_o : tensão de saída da ponte; C_{R1} e C_{R2} : sensores capacitivos de referência; C_{dF1} e C_{dF2} : sensores capacitivos com dielétrico de óleo e água; R_1 , R_2 , R_3 e R_4 : resistores de metal filme de 10 Ω .

A corrente I_1 é facilmente calculada:

$$I_1 = \frac{V_i}{[(R_1 + R_2) - j(XC_{R1} + XC_{dF1})]} \tag{5.27}$$

sendo XC_{R1} e XC_{dF1} as reatâncias capacitivas, respectivamente, do sensor de referência 1 e do sensor 1 com óleo contaminado com água.

A corrente I_2 também é facilmente calculada:

$$I_2 = \frac{V_i}{[(R_3 + R_4) - j(XC_{dF2} + XC_{R2})]} \quad (5.28)$$

sendo XC_{R2} e XC_{dF2} as reatâncias capacitivas, respectivamente, do sensor de referência 2 e do sensor 2 que possui, como dielétrico, óleo contaminado por água.

Como $R_1 + R_2 \ll XC_{R1} + XC_{dF1}$ e $R_3 + R_4 \ll XC_{R2} + XC_{dF2}$, obtém-se:

$$I_1 = \frac{V_i}{-j(XC_{R1} + XC_{dF1})} \quad (5.29)$$

$$I_2 = \frac{V_i}{-j(XC_{R2} + XC_{dF2})} \quad (5.30)$$

As reatâncias capacitivas são expressas por:

$$XC_{R1} = \frac{1}{2\pi f C_{R1}} \quad (5.31)$$

sendo f a frequência da tensão de alimentação da ponte e C_{R1} a capacitância do sensor de referência 1.

$$XC_{R2} = \frac{1}{2\pi f C_{R2}} \quad (5.32)$$

sendo C_{R2} a capacitância do sensor de referência 2.

$$XC_{dF1} = \frac{1}{2\pi f C_{dF1}} \quad (5.33)$$

sendo C_{dF1} a capacitância do sensor 1 sujeito à óleo contaminado.

$$XC_{dF2} = \frac{1}{2\pi f C_{dF2}} \quad (5.34)$$

sendo C_{dF2} a capacitância do sensor 2 sujeito à óleo contaminado.

A tensão na saída da ponte, V_o , é facilmente calculada através das seguintes equações:

$$V_{AB} = V_i \left(\frac{XC_{R1}}{XC_{R1} + XC_{dF1}} \right) \quad (5.35)$$

$$V_{AC} = V_i \left(\frac{XC_{dF2}}{XC_{R2} + XC_{dF2}} \right) \quad (5.36)$$

$$V_o = V_{BC} = V_{AB} - V_{AC} \quad (5.37)$$

ou seja:

$$V_o = V_i \left[\left(\frac{XC_{R1}}{XC_{R1} + XC_{dF1}} \right) - \left(\frac{XC_{dF2}}{XC_{R2} + XC_{dF2}} \right) \right] \quad (5.38)$$

As capacitâncias dos sensores são dadas por:

$$C_{R1} = \xi_o \frac{A}{D} \quad (5.39)$$

$$C_{R2} = \xi_o \frac{A}{D} \quad (5.40)$$

$$C_{dF1} = \xi_{dF1} \frac{A}{D} \tag{5.41}$$

$$C_{dF2} = \xi_{dF2} \frac{A}{D} \tag{5.42}$$

Quando se considera a influência da temperatura, as permissividades dos sensores capacitivos são descritas por:

$$\xi_{R1} = \xi_{R2} = \xi_O \pm \Delta\xi_{OT} \tag{5.43}$$

$$\xi_{dF1} = (\xi_O \pm \Delta\xi_{OT}) + m_1 [\xi_A \pm \Delta\xi_{AT} - (\xi_O \pm \Delta\xi_{OT})] \tag{5.44}$$

$$\xi_{dF2} = (\xi_O \pm \Delta\xi_{OT}) + m_2 [\xi_A \pm \Delta\xi_{AT} - (\xi_O \pm \Delta\xi_{OT})] \tag{5.45}$$

sendo:

$\Delta\xi_{OT}$: variação da permissividade do óleo provocado pela temperatura;

$\Delta\xi_{AT}$: variação da permissividade da água provocada pela temperatura.

Normalmente,

$$\Delta\xi_{OT} \neq \Delta\xi_{AT} \tag{5.46}$$

Define-se as variáveis m_1 e m_2 por:

$$m_1 = \frac{V_{A1}}{V_d} \tag{5.47}$$

$$m_2 = \frac{V_{A2}}{V_d} \tag{5.48}$$

sendo V_{A1} o volume de água no dielétrico do sensor C_{dF1} e V_{A2} o volume de água no dielétrico do sensor C_{dF2} .

A partir da equação (5.38), pode-se escrever a equação (5.49) da tensão de saída da ponte, em função das permissividades elétricas:

$$V_o = V_i \left[\frac{\xi_{dF1}}{\xi_{dF1} + \xi_{R1}} - \frac{\xi_{R2}}{\xi_{dF2} + \xi_{R2}} \right] \tag{5.49}$$

A tensão de saída, V_o , varia com a temperatura de acordo com a seguinte expressão:

$$V_o = V_i \left[\frac{m_l (\xi_A - \xi_o) \pm m_l \Delta \xi_{EQ}}{2 \xi_o} \right] \tag{5.50}$$

na qual

$$\Delta \xi_{EQ} = (\pm \Delta \xi_{AT} \mp \Delta \xi_{OT}) \tag{5.51}$$

A Figura 5.8 apresenta os resultados de simulações, realizadas com o programa Mathlab 5.3, utilizando a equação (5.49) e considerando os seguintes valores de permissividades dielétricas:

$$\xi_{vacuo} = 8,854188 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}.$$

$$\xi_o = 8 \xi_{vacuo} \text{ (óleo)}$$

$$\xi_A = 80 \xi_{vacuo} \text{ (água)}$$

Considerou-se desprezíveis as variações das permissividades do óleo e da água produzidas pela variação de temperatura, ou seja

$$(\pm \Delta \xi_{AT} = \pm \Delta \xi_{OT}) = 0 \tag{5.52}$$

Dois casos foram simulados:

Caso 1 - Os volumes de água são idênticos nos sensores C_{dF1} e C_{dF2} , de modo que $m_1 = m_2$.

Caso 2 - Há água no dielétrico do sensor C_{dF1} , mas não no dielétrico de C_{dF2} de modo que $m_1 \neq 0$ e $m_2 = 0$.

A Figura 5.8 mostra que para os dois casos, a resposta do sensor é linear com a concentração em volume de água, no óleo, e que o sensor apresenta elevada sensibilidade.

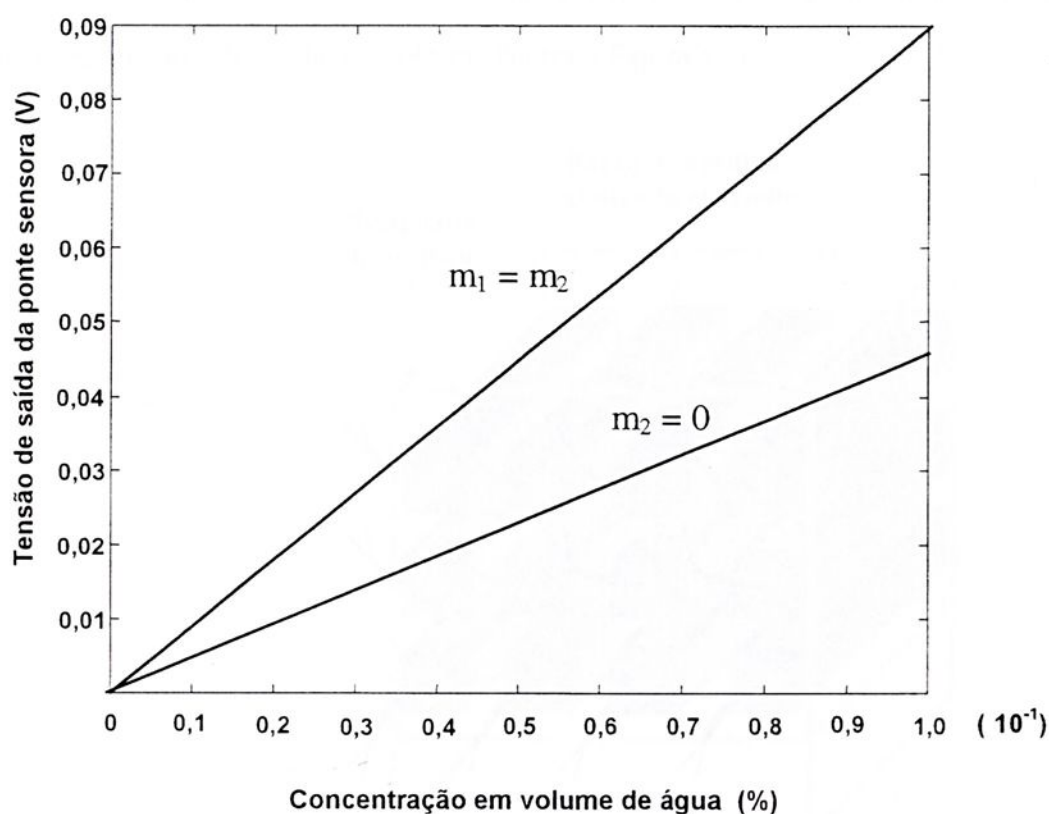


Figura 5.8 – Resultado de simulações do sensor capacitivo.

5.3 - Metodologia e Materiais

5.3.1 - Estrutura Mecânica do Sensor Capacitivo

A Figura 5.9 mostra o desenho da estrutura do sensor capacitivo implementado, constituído basicamente por 12 barras de acrílico onde foram colados eletrodos de aço inox, através das quais se constituem 8 sensores capacitivos horizontais e 9 verticais. A estrutura apresentada possui grande flexibilidade, uma vez que os sensores podem ser conectados em ponte, de muitas maneiras diferentes.

O espaçamento entre os eletrodos pode ser variado devido a um rebaixamento numa extremidade da barra de acrílico, conforme ilustra a Figura 5.10.

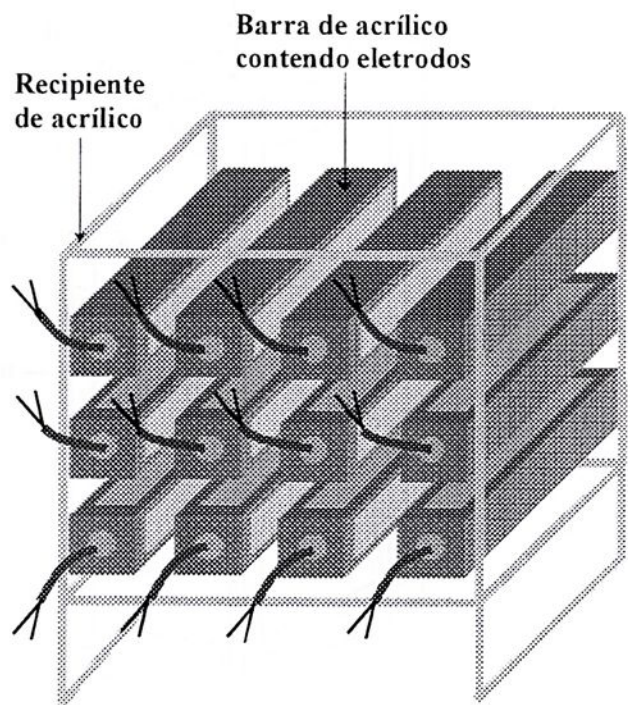


Figura 5.9 - Estrutura do sensor capacitivo implementado.

O acrílico foi escolhido para a construção da barra por ser de fácil usinagem e, principalmente, porque é bom isolante elétrico para o nível de tensão de eletrodo ($V_{PP} = 24$ V) utilizado. A barra de acrílico possui dimensões de 130 mm x 32 mm x 32 mm. O rebaixamento A, em cada face da barra, de 1 mm de profundidade, 28 mm de largura e 128

mm de comprimento, foi desenvolvido para acomodar o eletrodo de aço inox. O orifício *B* serve para a passagem do fio soldado ao eletrodo. O orifício *C* é conectado ao orifício *B* de cada face da barra, sendo desenvolvido para possibilitar a saída dos fios conectados nos eletrodos. O rebaixamento *D* tem a finalidade de melhor acomodar os fios, pois a barra é posicionada sob pressão nas duas faces laterais. O aço inox foi o material utilizado para confeccionar os eletrodos, porque não oxida na presença de água. A oxidação altera a capacitância e, conseqüentemente, torna o sensor pouco confiável. Cada eletrodo mede 118 mm x 28 mm x 0,3 mm. A conexão do fio de cobre com o eletrodo metálico foi realizada com utilização de solda a ponto.

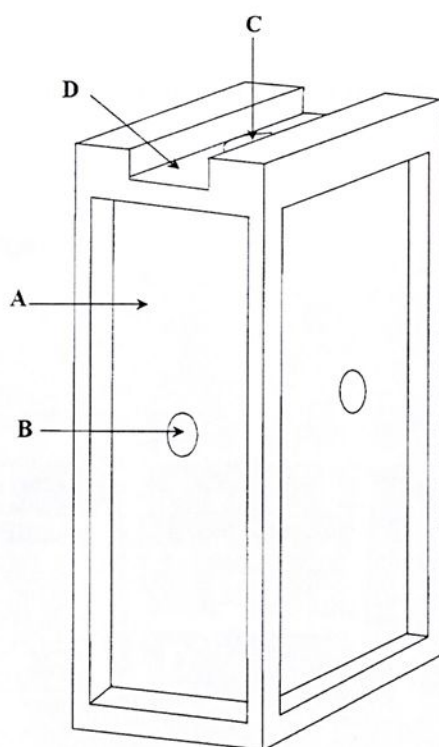


Figura 5.10 – Desenho da barra de acrílico.

A foto da Figura 5.11 mostra a barra de acrílico *A*, com eletrodos e fios conectados, e uma caneta esferográfica *B*, visando fornecer informação sobre o tamanho da barra.

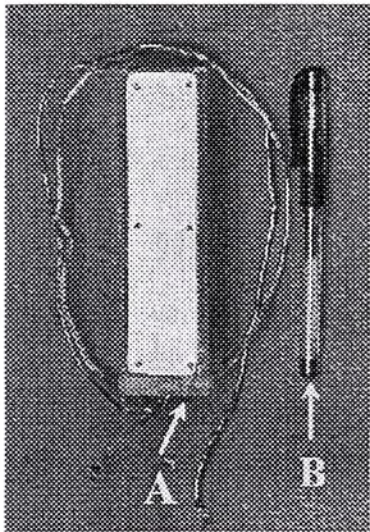


Figura 5.11 – Foto da barra de acrílico.

A foto da Figura 5.12 mostra outras estruturas de acrílico que também fazem parte do sensor capacitivo.

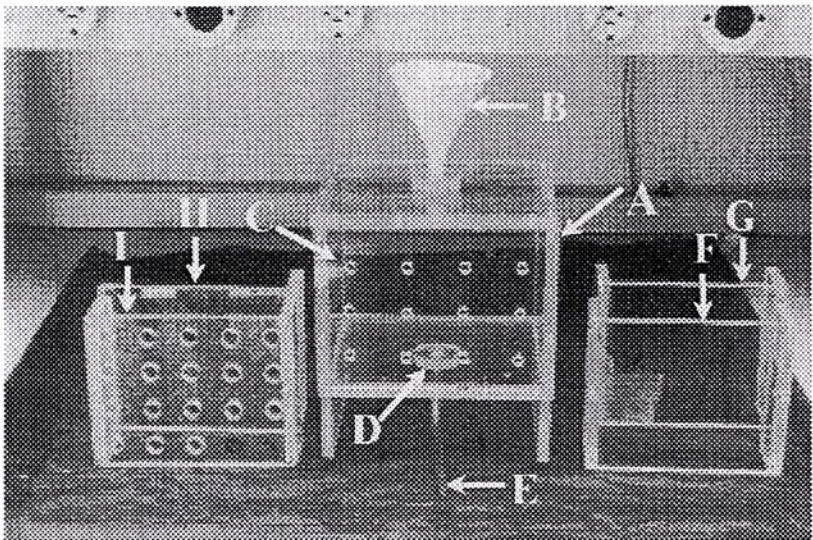


Figura 5.12 – Fotos dos suportes e recipiente de acrílico.

O recipiente A, com dimensões internas de 130 mm x 144 mm x 170 mm, tem a função de abrigar as barras de acrílico e armazenar o óleo. Para se realizar as ligações externas dos sensores puxou-se os fios para fora do recipiente A, passando os mesmos através dos orifícios C localizados em uma parede lateral. Foi aplicado Flexite (resina de

silicone para vedação de roscas) nos orifícios da parede lateral para evitar vazamento de óleo. Na tampa do recipiente *A* pode-se acoplar um funil *B* para se inserir óleo no recipiente. Através do orifício *D* o óleo escoa pela mangueira *E*.

Os suportes (*F*, *G* e *H*), idênticos, foram construídos com a finalidade de fixar as placas do circuito eletrônico de condicionamento de sinais nas laterais do recipiente *A*.

O suporte *I* tem a finalidade de posicionar e fixar os conectores *RCA* responsáveis pela ligação de cada sensor capacitivo ao circuito eletrônico de condicionamento de sinais.

Foi construída uma caixa de alumínio que serve para abrigar o sensor capacitivo e o circuito eletrônico de condicionamento de sinais e para blindar o sistema contra ruídos eletromagnéticos externos.

5.3.2 – Circuito de Condicionamento de Sinais

O circuito eletrônico de condicionamento de sinais implementado é simples e de baixo custo.

A Figura 5.13 apresenta o diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.

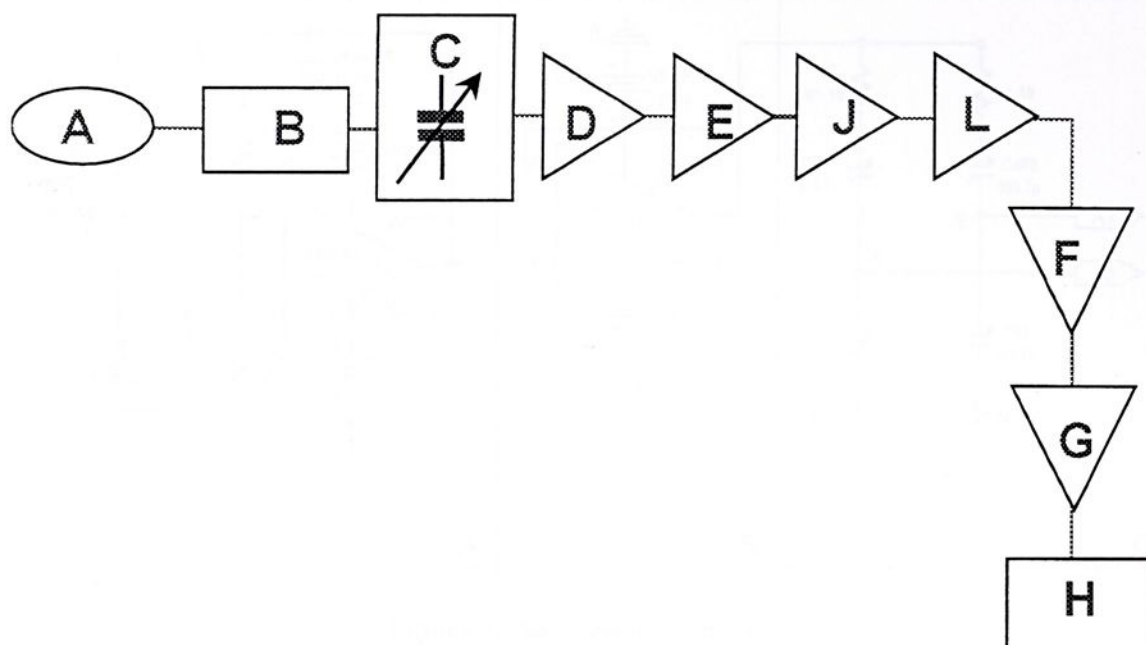


Figura 5.13 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinais.

Os blocos que compõem o diagrama são os seguintes:

A: oscilador em Ponte de Wien ; B: *buffer*, C: ponte de sensores capacitivos; D: amplificador diferença + filtro passivo; E: amplificador inversor; F: amplificador inversor; G: *buffer*, H: detector de pico; J: filtro passa-faixa de segunda ordem; L: filtro passa-faixa de segunda ordem.

A figura 5.14 apresenta o circuito de condicionamento de sinais.

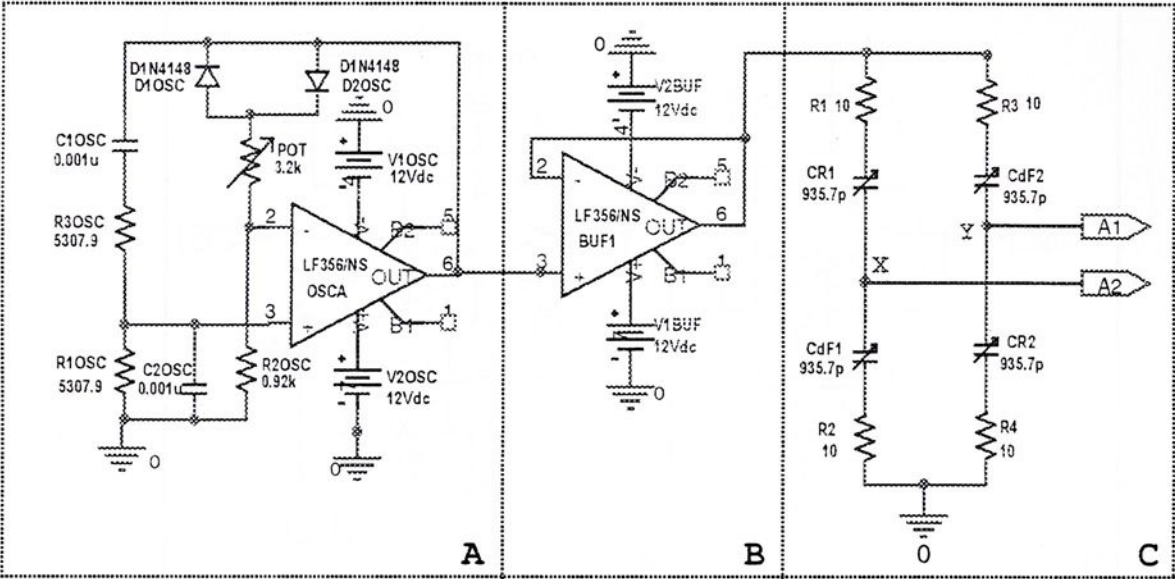


Figura 5.14a - Blocos A, B e C.

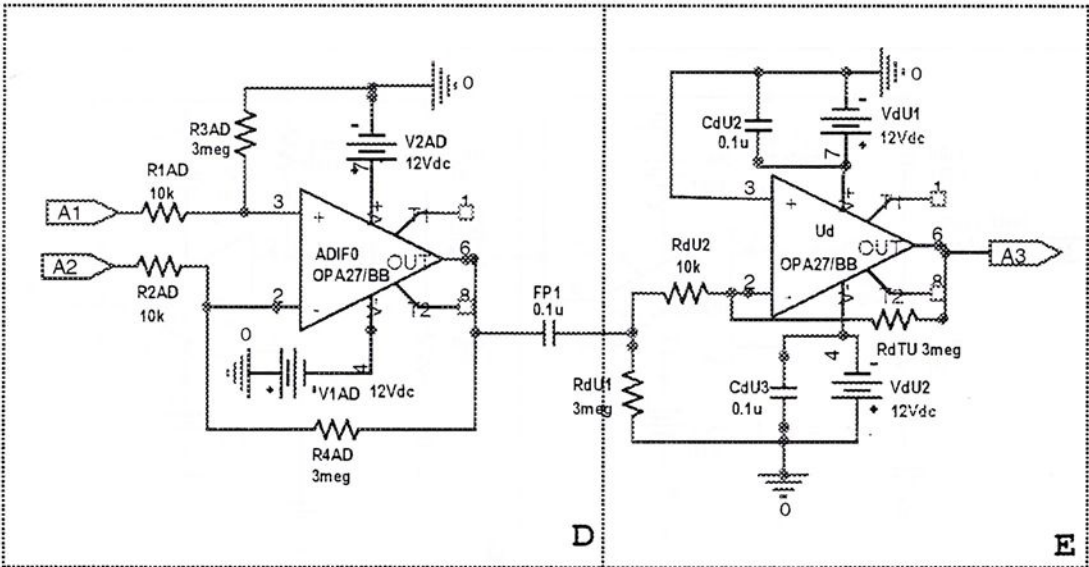


Figura 5.14b - Blocos D e E.

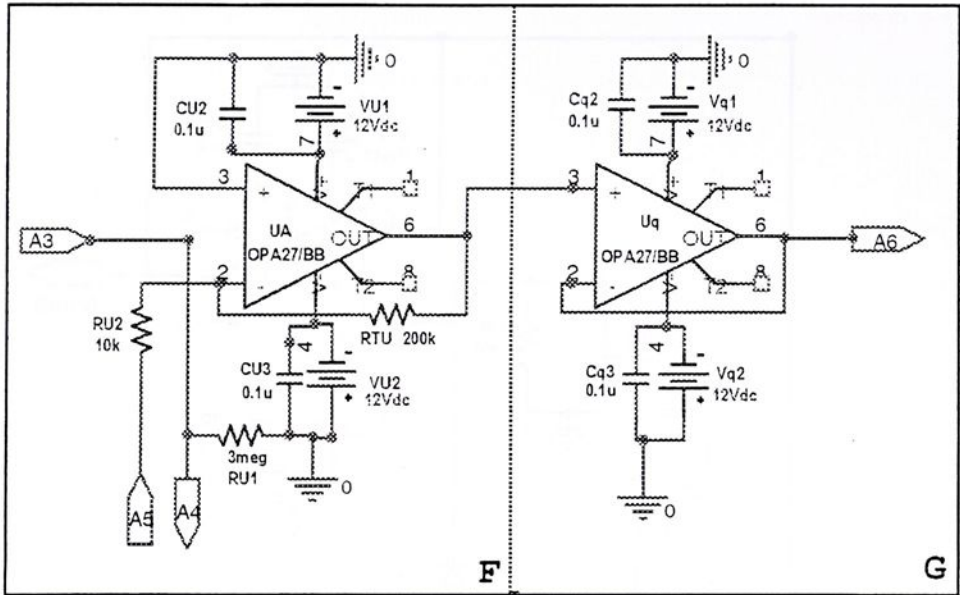


Figura 5.14c - Blocos F e G.

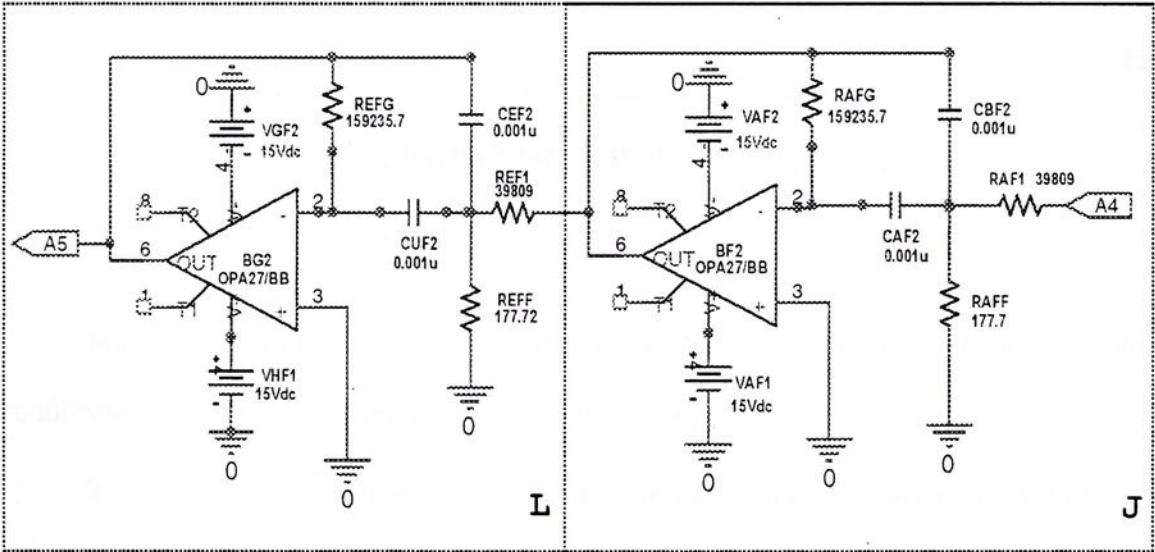


Figura 5.14d - filtro ativo passa-faixa.

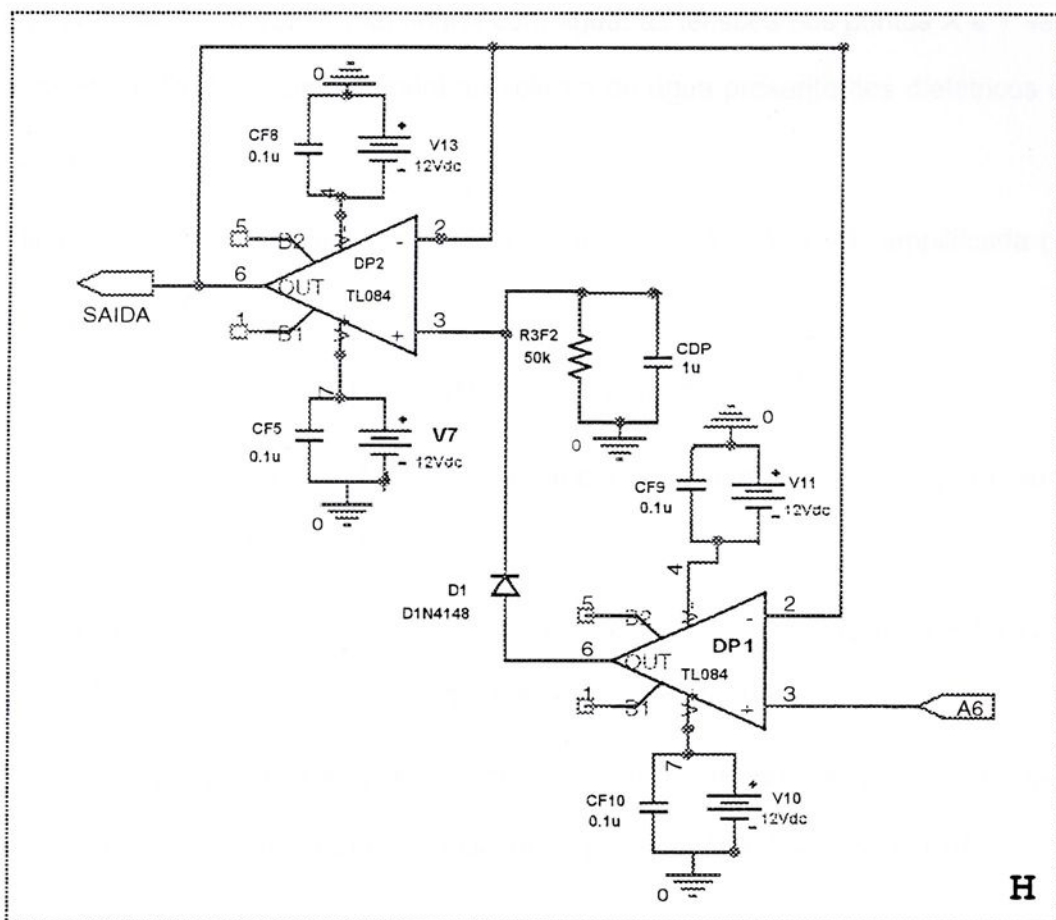


Figura 5.14e – Detector de Pico.

Foi implementado o oscilador em Pontes de Wien A que gera tensão senoidal na frequência de 30 KHz e amplitude de 20 V de pico a pico.

A Ponte de Wien A foi isolada dos demais estágios devido ao *buffer* B que alimenta a ponte de sensores capacitivos C.

As duas saídas da ponte de sensores capacitivos C são conectadas às duas entradas (inversora e não inversora) do amplificador diferença D que compara e amplifica a diferença (caso exista) entre as tensões dos pontos X e Y da ponte de sensores C.

No caso em que o óleo lubrificante dos dielétricos dos sensores capacitivos C_{d1} e C_{d2} , não forem contaminados com água, as tensões de saída da ponte C indicada nos pontos X e Y serão idênticas e a tensão de saída do amplificador diferença D será nula.

Entretanto, se o óleo for contaminado com água, as tensões nos pontos X e Y serão diferentes, sendo a diferença proporcional ao volume de água presente nos dielétricos dos sensores capacitivos C_{dF1} e C_{dF2} .

A diferença de potencial entre as tensões nos pontos X e Y será amplificada pelo amplificador diferença D .

O ganho de tensão do amplificador diferença D é $3 \cdot 10^2$.

Os sensores capacitivos $CR1$ e $CR2$ permanecem submetidos ao óleo puro sendo chamados de sensores de referência.

A saída do amplificador diferença D foi conectado um filtro passivo $FP1$ visando eliminar nível DC provocado por instabilidade dos circuitos integrados.

Para maximizar a sensibilidade, conectou-se um amplificador inversor E na saída do filtro passivo $FP1$ constituído por um capacitor de poliéster metalizado de $0,1 \mu F$.

O ganho de tensão do amplificador inversor E é $3 \cdot 10^2$.

Na saída do amplificador inversor E , conectou-se o filtro ativo JL , passa-faixa de quarta ordem, com ganho de tensão 4.

O filtro JL foi sintonizado para frequência de 30 KHz.

Na saída do filtro passa-faixa JL , conectou-se um amplificador inversor F que amplifica a tensão oriunda do filtro com ganho 20.

Com a finalidade de isolar os estágios, conectou-se na saída do amplificador inversor F o buffer G .

A tensão de saída do buffer G foi conectada ao detector de pico H .

O projeto do circuito de condicionamento utilizou três tipos de circuitos integrados, OPA 27 (Burr-Brown), LF 356 N (National Semiconductor) e TL084.

O ganho de tensão total do circuito é de $7,2 \cdot 10^6$.



A simulação indica que o circuito é capaz de medir variações de capacitância a partir de 10^{-5} pF.

5.4 – Conclusões

Utilizando a teoria do capacitor de placas paralelas, obteve-se um modelo teórico que mostra, a partir de simulações realizadas, que o sensor capacitivo proposto apresenta sensibilidade adequada para medir teor de água em óleo, com resolução melhor que 0,1%. Os resultados obtidos com o desenvolvimento teórico e com a simulação computacional indicam que o sensor poderá ter dimensões inferiores às utilizadas no protótipo implementado, uma vez que as mesmas não influenciam a sensibilidade do sensor.

O protótipo é robusto e de fácil construção. O próximo passo da pesquisa será efetuar medições em laboratório visando avaliar, na prática, as características e limitações do sistema implementado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Delforge, Daniel Ivan Martin. Óleos Lubrificantes. 200?, Apostila de curso, digitada.

Higuti, Ricardo Tokio. "Caracterização de Líquidos por Ultra-Som". São Paulo, Brasil, 2001. pp.1 a 4. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo - USP.

CY, L.; GB, L. "Micromachine-based humidity sensors with integrated temperature sensors for signal drift compensation". Journal of Micromechanics and Microengineering, v. 13, n. 5, pp. 620-627, Sept. 2003.

Arregui, F. J.; Ciaurriz, Z.; Oneca, M.; Matías, I. R. "An experimental study about hidrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors". Sensors and Actuators B: Chemical, v. 96, Issues 1-2, pp. 165-172, 15 Nov. 2003.



Wang, J.;Wu, F. Q.; Shi, K.H.; Wang, X. H.; Sun, P.P. "Humidity sensitivity of composite material of lanthanum ferrite/polimer quaternary acrylic resin", Sensors and Actuators B: Chemical, v.. 99, Issues 2-3, pp. 586-591, May 2004.



Capítulo 6

Conclusões

6.1 – Conclusões

O trabalho propiciou o desenvolvimento de cinco novos sensores, dois visando aplicações industriais, dois outros visando aplicações biomédicas e um de uso geral.

6.1.1- Sensores para Aplicações Industriais

Foi desenvolvido o inclinômetro que pode medir ângulos de inclinação com resolução de $0,08^\circ$, na faixa de -6° a $+6^\circ$, em duas direções ortogonais, é robusto, de baixo custo e apresenta resposta linear. Poderá ser utilizado em dispositivos de verificação da segurança de sistemas estruturais verticais, tais como edifícios, torres e pontes.

Foi desenvolvido um modelo teórico para o sensor implementado com o objetivo de determinar concentração de água em óleo lubrificante. Os resultados da simulação mostram que o sensor apresenta resposta linear e sensibilidade suficiente para medir concentração de água em óleo com resolução inferior a $0,1\%$.

6.1.2 - Sensores para Aplicações Biomédicas

O dinamômetro construído com extensômetros resistivos apresenta boas características ergonômicas, facilidade de utilização, possibilidade de armazenamento de informações, resposta linear, acurácia de $0,9\text{ N}$, precisão de $99,3\%$, faixa dinâmica de 200 N , tempo de resposta de 7 ms , resposta independente do ponto de aplicação da força. Suas características são plenamente adequadas para utilização em Engenharia e Medicina de Reabilitação, Fisioterapia e Biomecânica.



Pela primeira vez, utilizou-se extensômetros capacitivos para se construir um dinamômetro biomédico. O dinamômetro pode medir forças exercidas pelos dedos e pelas mãos na faixa de 0 a 200 N, com acurácia de 1 N, precisão de 98,7% e resposta também independente do ponto de aplicação da força.

6.1.3 – Sensor de Aplicação Geral

O extensômetro (*strain gage*) capacitivo implementado apresentou sensibilidade 820 vezes maior que a do extensômetro convencional. Pode medir forças com resolução de 9 mN. A teoria desenvolvida mostra que a resposta do sensor independe da temperatura. A histerese de 2,7% é razoavelmente elevada, mas pode ser sensivelmente melhorada otimizando-se alguns aspectos construtivos.

6.2 – Resumo de Contribuições

Foi desenvolvido o primeiro inclinômetro com extensômetros resistivos. A utilização de extensômetros resistivos aumenta a versatilidade e a confiabilidade do inclinômetro.

O sensor para determinar a quantidade de água em óleo lubrificante possui estrutura robusta e simples. A teoria indica que o sensor possui sensibilidade suficiente para medir concentração de água em óleo com resolução inferior a 0,1%.

Em relação aos dinamômetros biomédicos desenvolvidos, a segurança do usuário foi aumentada significativamente com o desenvolvimento de estrutura isolante de acrílico, bem como foi diminuída as dimensões dos dinamômetros com a eliminação de uma segunda barra metálica, que existia nas versões de dinamômetros anteriormente desenvolvidas.

6.3 – Pesquisas Futuras

Sugere-se a diminuição significativa das dimensões do inclinômetro bem como a substituição do duralumínio por outro metal que apresente menor módulo de elasticidade



(Young). Tais sugestões visam tornar o inclinômetro mais sensível com a inclinação e com dimensão mais adequada para outras finalidades.

Para trabalhos futuros sugere-se que o sensor desenvolvido para determinar água em óleo lubrificante seja caracterizado em laboratório. Além disso, sugere-se o desenvolvimento de sensor para determinar água em óleo lubrificante com dimensões reduzidas, uma vez que a teoria desenvolvida mostra que não haverá a diminuição da sensibilidade do dispositivo.

O sensor de determinação de água em óleo lubrificante também poderá ser utilizado para outra finalidade como determinar o teor de gordura no leite.

Em relação ao extensômetro capacitivo sugere-se a redução de suas dimensões tornando mais versátil para aplicações em que se dispõe de pouco espaço.



Publicações Decorrentes deste Trabalho

Publicados

Da Silva, J. G., De Carvalho, A. A., Rodrigues, R. O., "High Sensitivity Low Cost Capacitive Strain Gage", Instrumentation and Measurement – IMTC 2004, Como Itália, pp. 358 – 362.

Aceitos

- 1) Da Silva, J. G., De Carvalho, A. A., Salomão, R., "Dinamômetro Ergonômico Microcontrolado Para Aplicações Biomédicas", III Congreso Iberdiscap 2004 de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, Costa Rica, 8 Mar. 2004.
- 2) Da Silva, J. G., De Carvalho, A. A., "Desenvolvimento de Dinamômetro Eletrônico Utilizando Strain Gages Capacitivos". III Congreso Iberdiscap 2004 de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, Costa Rica, 8 Mar. 2004.
- 3) Da Silva, J. G., De Carvalho, A. A., Salomão, R. "Dinamômetro Ergonômico Microcontrolado Para Aplicações Biomédicas", IV Induscon 2004, Joinville, Santa Catarina, Brasil, 14 de Junho de 2004.
- 4) Da Silva, J. G., De Carvalho, A. A., Rodrigues, R. O., Menezes, M. A., "Inclinômetro de Baixo Custo para Estruturas de Grande Porte". IV Induscon 2004, Joinville, Santa Catarina, Brasil, 14 de Junho de 2004.



Submissão à Revista

Title of Paper: **High Sensitivity Low Cost Capacitive Strain Gage**

List of Authors: Josivaldo Godoy da Silva, Aparecido Augusto de Carvalho, and Rogério de Oliveira Rodrigues

IEEE Publication Title (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement)

Solicitação de Patentes

1) UNESP. Departamento de Engenharia Elétrica (Ilha Solteira, SP) . Josivaldo Godoy da Silva, Aparecido Augusto de Carvalho e Rogério Salomão. **Disposições Construtivas em Dinamômetro Eletrônico com Aplicações Biomédicas**. BR n. Protocolo 003291, 18 de Julho de 2003.

2) UNESP. Departamento de Engenharia Elétrica (Ilha Solteira, SP) . Josivaldo Godoy da Silva, Aparecido Augusto de Carvalho. **Dispositivo Medidor de Ângulo (unidirecional) de Inclinação de Estruturas de Grande Porte**. BR n. Protocolo 006577, 26 de Dezembro de 2003.

3) UNESP. Departamento de Engenharia Elétrica (Ilha Solteira, SP) . Josivaldo Godoy da Silva, Aparecido Augusto de Carvalho, Rogério de Oliveira Rodrigues, Miguel Ângelo de Menezes. **Dispositivo Medidor de Ângulo (bidirecional) de Inclinação de Estruturas de Grande Porte**. Aguardando parecer do INPI.





**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

**Campus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 - Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br**

