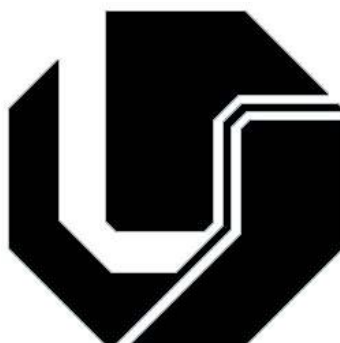


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE E
INTERFACEAMENTO PARA UM MACROINDENTADOR PORTÁTIL
PARA AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS
BASEADO EM TECNOLOGIAS DSP E WIRELESS**

JEOVANE VICENTE DE SOUSA

Uberlândia, Março de 2011.

JEOVANE VICENTE DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE E
INTERFACEAMENTO PARA UM MACROINDENTADOR PORTÁTIL
PARA AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS
BASEADO EM TECNOLOGIAS DSP E WIRELESS**

Dissertação apresentada por Jeovane Vicente de Sousa ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciências**.

Orientador: Alcimar Barbosa Soares

**Uberlândia
2011**

JEOVANE VICENTE DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE E
INTERFACEAMENTO PARA UM MACROINDENTADOR PORTÁTIL PARA
AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS BASEADO EM
TECNOLOGIAS DSP E WIRELESS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciências**.

Aprovado em, 25 de março de 2011 pela Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Alcimar Barbosa Soares – FEELT - UFU

Co- Orientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco – FEMEC - UFU

Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys – UFG

Prof. Dr. Adriano Alves Pereira – FEELT - UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

- S725d Sousa, Jeovane Vicente de, 1983-
 Desenvolvimento de um sistema de controle e interfaceamento para um
 macroindentador portátil para avaliação de propriedades mecânicas de
 dutos baseado em tecnologias DSP e Wireless [manuscrito] / Jeovane
 Vicente de Sousa. - 2011.
 117 f. : il.
- Orientador: Alcimar Barbosa Soares.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Progra-
 ma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.
1. Sistemas de controle - Teses. I. Soares, Alcimar Barbosa, 1965- II.
 Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 681.5

*Aos meus pais João e Maria do Carmo, à minha
irmã Cínthia, e à minha namorada, noiva e atual esposa
Patrícia, pelo apoio, carinho e incentivo.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus criador de tudo, que me deu inteligência e capacidade para a concretização deste trabalho.

À minha família que me apoiou, mesmo sem entender ao certo o que eu estava fazendo.

À minha esposa e companheira Patrícia que compreendeu a minha ausência.

Ao Prof. Alcimar Barbosa Soares que me deu a oportunidade de crescer como pesquisador, me apoiando sempre desde a iniciação científica até a conclusão deste trabalho de mestrado.

Ao Prof. Sinésio Domingues Franco, coordenador da equipe de trabalho da Faculdade de Engenharia Mecânica, pelo apóio que sempre me foi dado.

Aos mestres Francisco Francelino Ramos Neto e Flávia Cristina Cardoso cujos trabalhos me serviram de apoio para a continuidade deste projeto.

A toda a equipe de trabalho da Faculdade de Engenharia Mecânica, desde o antigo LTM ao atual LTAD, que me ajudaram de forma direta ou indireta, cujos nomes não irei citar evitando cometer a injustiça de esquecer-me de alguém.

À Petrobrás que apoiou este projeto.

Ao CNPq pelo apoio financeiro com o pagamento da bolsa sempre em dia.

Aos amigos do Biolab dos tempos remotos e atuais: Prof.'s e padrinhos Selma e Adriano, Ailton, Alessandro, Aline, Ângela, Bruno Caliu, Cynthia, Daniel Furtado, meu quase irmão Éder, Prof. Eduardo L., Guilherme Cavalheiro, Guilherme Cunha, minha madrinha Iraídes, Kheline, Laíse, Lílian, Lucas, Mafê, Nayara, Nicolai, Prof. Sérgio R., Rodrigo, Tati, e outros que não caberiam nesta folha de papel, que contribuíram de alguma forma, para a realização deste trabalho, dos quais levarei sempre boas recordações.

“Não está na natureza das coisas que o homem realize um descobrimento súbito e inesperado;
a ciência avança passo a passo e cada homem depende do trabalho de seus predecessores.”

Ernest Rutherford

Resumo

O conhecimento das propriedades mecânicas de dutos metálicos é de fundamental importância para sua utilização segura e otimizada, principalmente quando consideramos um número relevante de linhas cuja documentação é imprecisa ou inexistente. Convencionalmente, essas propriedades são obtidas a partir de ensaios destrutivos, como, por exemplo, ensaios de tração, impacto e fadiga. Recentemente, a macroindentação tem surgido como uma boa alternativa para determinação das propriedades mecânicas de materiais metálicos por meio de ensaios não destrutivos, com a vantagem de ser realizada "In-Situ". A macroindentação instrumentada é um ensaio baseado em múltiplas indentações num mesmo local de penetração. Desta forma, com o monitoramento constante da carga e da profundidade de indentações e, a partir de correlações entre esses dados e determinadas equações-modelo, pode-se estimar diversas propriedades mecânicas, tais como: o limite de escoamento, o limite de resistência, a dureza, a curva tensão x deformação, o coeficiente de resistência e o expoente de encruamento. Este trabalho destaca o projeto e o desenvolvimento de um sistema de controle e interfaceamento para um equipamento de macroindentação baseado em tecnologias de transmissão de dados sem-fio e controle computacional via processadores digitais de sinais (DSP), permitindo a realização dos ensaios de forma mais rápida, segura e totalmente automatizada.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação e Controle, Indentação Instrumentada, Propriedades Mecânicas, Wireless, DSP.

Abstract

Obtaining mechanical properties of pipelines has fundamental importance to optimize their use. This fact is more relevant in lines where documentation is not precise or nonexistent. Commonly, the obtainment of these properties is performed through destructive tests such as tensile, impact and fatigue tests. However, the ball indentation technique, a recent methodology to determine mechanical properties of metallic materials, appears as a good alternative. The ball indentation test has the advantage of being a nondestructive test and can be performed “in-situ “. The ball indentation test is based in multiple indentations at the same place. Thus, with the constant monitoring of the indentation load and depth, a characteristic curve of the assay is determined. Through the correlation between the gotten points from the evaluated curve (stress vs. strain) and the equation-model, it is possible to determine the mechanical properties, such as: yield strength, ultimate tensile strength, hardness, stress x strain curve, strength coefficient and strain hardening exponent. This work highlights the design and development of a control, instrumentation and interfacing system to a ball indentation equipment based on wireless data transmission technology and embedded control by digital signal processors (DSP). The final system will allow the accomplishment of the test quicker, totally automated, safer and accurate.

KEY-WORDS: Instrumentation and Control, Instrumented Indentation, Mechanical Properties, Wireless, DSP

Lista de Ilustrações

Figura 1.1- Primeiro protótipo de Macro Indentador Portátil desenvolvido.	4
Figura 1.2 - Macroindentador portátil MIP-I em operação no campo, mostrando: a), vista geral e b) Destaque do macroindentador portátil.	4
Figura 1.3 – Vista geral do PropInSitu 1, desenvolvido no primeiro projeto, e do PropInSitu 2, desenvolvido posteriormente.	5
Figura 2.1 - Representação esquemática do ensaio de tração em um corpo de prova.....	10
Figura 2.2 - Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura, ponto F. O limite de resistência à tração, σ_r , está indicado no ponto M. Os detalhes nos círculos representam a geometria do corpo de prova deformado em vários pontos ao longo da curva (Callister, 1991).....	11
Figura 2.3 - Uma comparação entre os comportamentos típicos <i>tensão-deformação de engenharia</i> e <i>tensão-deformação verdadeira</i> em tração. A estricção começa no ponto M na curva de engenharia, que corresponde ao ponto M' na curva verdadeira. A curva <i>tensão-deformação verdadeira "corrigida"</i> leva em consideração o estado de tensão complexo no interior da região da estricção, adaptada de (Callister, 1991).....	13
Figura 2.4 - Representação gráfica da relação entre carga e deslocamento em um ensaio de indentação instrumentada real, observando alguns ciclos de indentação e aproximação por segmentos de reta.....	17
Figura 2.5. Perfil típico da indentação quando utilizando um penetrador esférico, adaptada de (Haggag, 1993).	18
Figura 2.6 – Variáveis utilizadas para o cálculo da área de contato considerando a deflexão elástica e o empilhamento plástico adaptada de (Jang et al., 2005).....	20
Figura 2.7 – Representação esquemática da expansão da zona plástica durante a indentação esférica (J. Ahn & D Kwon, 2001).....	24
Figura 2.8 – Curvas de carregamento versus profundidade de indentação para diferentes respostas do material (a) elástica, (b) elástica-plástica, (c) plástica, assumindo um penetrador Vickers (OLIVER & PHARR, 1992).....	25

Figura 2.9 – Representação esquemática do empilhamento plástico (J. Ahn & D Kwon, 2001).....	27
Figura 2.10: a) SSM-B4000 TM - Equipamento com configuração para ensaios em laboratório, utilizando uma câmara de aquecimento, uma mesa posicionadora X-Y, câmara de vídeo e monitor. b) SSM-M1000 TM – Modelo portátil para ensaios em campo (ATC, 2010).	29
Figura 2.11: Equipamentos para macroindentação da empresa Frontics, à esquerda o AIS2100, à direita o AIS300 (Frontics, 2010).....	31
Figura 3.1 - Cadeia de medição e atuação	35
Figura 3.2 – Representação esquemática do processo de digitalização de um sinal.	37
Figura 3.3 – Exemplo de uma cadeia de atuação	39
Figura 3.4 - Diferença entre microcontrolador e microprocessador. Microprocessadores (MPU): CPUs que se conectam a memória e periféricos externos. Microcontroladores (MCU): tem CPU memória, E/S e periféricos integrados no mesmo chip (<i>on-chip</i>).....	40
Figura 3.5 – Exemplo de Topologia do 802.11 - Infra-estruturada- Basic Service Set (BSS) – com apenas um Access Point (AP) e uma Basic Service Area (BSA)	42
Figura 3.6 - Organização típica de uma rede 802.11, com vários APs.	43
Figura 3.7 - Exemplo de rede Bluetooth. Modificado de (BLUETOOTH SIG, 2009).....	44
Figura 3.8 - Topologias de rede ZigBee.	47
Figura 4.1. Equipamento de indentação instrumentada – esquema conceitual.	49
Figura 4.2 unidade principal de indentação montada sobre base fixa para ensaios em laboratório, e detalhes da célula de carga, sensor de posição e penetrador esférico em WC-Co,.....	51
Figura 4.3 - Diagrama de blocos destacando as interconexões entre os módulos principais do MIP-II.	53
Figura 4.4 - Fotos de cada unidade do MIP-II: a) <i>Drivers</i> dos motores e <i>hub</i> , b) Unidade de condicionamento e digitalização de sinais Spider8 – painéis frontal e traseiro e suas conexões, c) Conjunto da mesa X.	54
Figura 4.5 – Detalhe do projeto mostrando: penetrador e sensor de deslocamento.	55
Figura 4.6. Comparação dos diagramas representativos do equipamento de macroindentação. Na parte superior do desenho está a representação do hardware já desenvolvido, na parte inferior o novo sistema proposto. Em destaque pode-se observar quais unidades serão modificadas pelo novo sistema.....	58

Figura 4.7. Diagrama representativo do software do equipamento de macroindentação.....	60
Figura 5.1 - Diagrama de blocos do <i>Hardware</i> para o sistema proposto.	62
Figura 5.2 - Diagrama do controlador do motor (Applied Motion Products Inc., 1998).	63
Figura 5.3 - a) Célula de carga modelo U2B da empresa HBM. b) Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone (HBM, 2009a).	65
Figura 5.4 - a) Representação esquemática das dimensões do sensor de deslocamento. b) foto do sensor de deslocamento indutivo utilizado (HBM, 2009b).....	66
Figura 5.5 - Esquema de ligação do sensor de deslocamento.	67
Figura 5.6 - Foto do sistema desenvolvido destacando os módulos e componentes principais.	68
Figura 5.7. Diagrama de blocos do condicionador de sinais analógico.	69
Figura 5.8 - Diagrama de ligação do CI oscilador senoidal AD2S99.	70
Figura 5.9 - Circuito do oscilador senoidal AD2S99 montado em placa de circuito impresso.....	70
Figura 5.10 - Amplificador de potência e interface dos sensores.....	71
Figura 5.11 - a) Esquema genérico de ligação dos sensores. b) Foto do sensor de deslocamento conectado à interface.	71
Figura 5.12 - Circuito de amplificação, retificação e filtragem.....	72
Figura 5.13 - Módulo de condicionamento de sinal.	73
Figura 5.14. Módulo Bluetooth (KC Wirefree, 2009) utilizado para a comunicação wireless entre o hardware de controle e condicionamento e o computador.	74
Figura 5.15 - Esquema de ligação do módulo <i>Bluetooth</i>	75
Figura 5.16 - Montagem do módulo DSP contendo o DSPIC33FJ128MC706.	76
Figura 5.17 - Placa principal e suas conexões	77
Figura 5.18 - Diagrama de blocos funcional do conversor A/D (ANALOG DEVICES, 2010).....	78
Figura 5.19 - Diagrama de ligação simplificado do conversor A/D.....	79
Figura 5.20- Fluxograma da unidade de software responsável pelo ensaio.	81
Figura 5.21 - Disposição do sensor de deslocamento e do penetrador.....	82
Figura 5.22 - Curva característica de um ensaio de macroindentação, destacando os pontos mais importantes para início dos cálculos das propriedades mecânicas.....	83
Figura 5.23 - Interface principal da unidade de execução de ensaios.	85
Figura 5.24 - Fluxograma do software do computador Host.....	86

Figura 5.25 - Dimensões das principais placas desenvolvidas.....	88
Figura 5.26 - Placa principal antes da montagem e suas principais conexões.	88
Figura 5.27 - (a) Condicionador de sinais antes e (b) depois da montagem dos componentes.....	89
Figura 5.28 - Adaptador para módulo Bluetooth: antes (a) e depois da montagem da montagem dos componentes (b).....	89
Figura 5.29 - Montagem final do protótipo. (a) - vista frontal. (b) - vista traseira. (c) - vista superior.	90
Figura 6.1 - a) Sinal em rampa utilizado b)Interface do programa com resultados do experimento.	92
Figura 6.2 - Interface de aquisição do software de teste, exibindo os resultados da coleta do sinal em 200Hz	94
Figura 6.3 - Exibição dos resultados da coleta do sinal em 200Hz obtidos pelo osciloscópio.	94
Figura 6.4 - Diagrama de blocos do esquema de teste do módulo de condicionamento de sinais, destacando as formas de onda em cada estágio e sua respectiva equação.	95
Figura 6.5 - Gráfico da tensão de saída x tensão de entrada para o canal 1.	96
Figura 6.6 - Gráfico da tensão de saída x tensão de entrada para o canal 2.	97
Figura 6.7 – Comparação entre o sinal real e o sinal simulado. a) sinal simulado. b) sinal proveniente do sensor de deslocamento, medido pelo osciloscópio.	98
Figura 6.8 - Interface de teste apresentando a média dos valores amostrados para 65535 amostras.	98
Figura 6.9 - Gráfico dos valores medidos da célula de carga.....	99
Figura 6.10- Aparato de verificação da célula de carga.	99
Figura 6.11 - Aparato de teste do sensor de deslocamento, destacando apalpador.....	100
Figura 6.12 - Gráfico dos valores medidos do sensor de deslocamento.	101

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Valores para a sensibilidade à taxa de deformação (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989b)	21
Tabela 2.2: Valores típicos da constante (βm) do tipo de material (HAGGAG et al., 1990).....	23
Tabela 2.3 – Comparação entre os modelos de Haggag e Kwon modificado de (KANIA, R et al., 2003).	28
Tabela 3.1 - Gerações Wi-Fi.....	43
Tabela 3.2 - Classes de potência do sistema Bluetooth.	44
Tabela 3.3 - Principais características das especificações Bluetooth.	45
Tabela 3.4 - Comparação entre os padrões wireless discutidos.	48
Tabela 6.1 – Resultado dos testes com o gerador de sinais	93
Tabela 6.2 - Ajuste de ganhos para os amplificadores de instrumentação.....	96
Tabela 6.3 - Valores medidos da célula de carga.	99
Tabela 6.4 - Valores medidos do sensor de deslocamento.	100

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - Alternating Current

A/D - Analog to Digital

ASM - American Society for Materials

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATC - Advanced Technology Corporation

BioLab - Laboratório de Bioengenharia e Automática

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello

DC - Direct Current

FAU - Fundação de Apoio Universitário

FEELT - Faculdade de Engenharia Elétrica

FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

IEI - Indentação Esférico-Instrumentada

LVDT - Linear Variable Displacement Transducer

MIP - Macroindentador Portátil

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Lista de Símbolos

F - força

l_0 - comprimento inicial do corpo de prova

A_0 - área inicial da seção transversal de um corpo de prova

l - comprimento final do corpo de prova

σ - tensão

ε - deformação

Δl - variação do comprimento do corpo de prova

E - módulo de elasticidade do material

σ_e - limite de escoamento

σ_r - limite de resistência

σ_{rup} - limite de ruptura

WC-Co - carboneto de tungstênio-cobalto

h_p - profundidade plástica

h_e - profundidade elástica

h_t - profundidade total

d_p - diâmetro plástico

σ_v - tensão verdadeira

ε_v - deformação verdadeira

K - coeficiente de resistência

n - expoente de encruamento

D - diâmetro da esfera

δ - parâmetro que depende da flexibilidade do material e da tensão de indentação

E_a - módulo de elasticidade do material da amostra

E_i - módulo de elasticidade do material da esfera

φ - constante

$\delta_{máx}$ - valor máximo para δ

τ - constante

α_m - fator de restrição, que depende da sensibilidade á taxa de deformação do material de teste

e - número de Euler = 2,71828182

d_t – diâmetro total

m - coeficiente de Meyer

A - parâmetro de teste do material

β_m - coeficiente de deformação

HB - dureza Brinell

$F_{máx}$ - força máxima

d_f - diâmetro final

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE	8
2.1. Propriedades mecânicas	8
2.1.1. Ensaio de tração	9
2.1.2. Ensaio de Indentação	14
2.2. Ensaio de Macroindentação como alternativa para os ensaios de tração	15
2.2.1. Método de Haggag et al. para a determinação das propriedades mecânicas	19
2.2.2. Método de Kwon et al (2000 – 2003) para a determinação das propriedades mecânicas	23
2.3. Equipamentos comerciais para a macroindentação in situ	29
2.4. Conclusão	32
CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO, PROCESSAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS.	34
3.1. Introdução	34
3.2. Sistemas de medição e atuação.....	34
Sensores	35
Condicionamento de Sinais	36
Conversão Analógico/Digital (A/D).....	37
Sistemas de Atuação	38

3.3. Sistemas computacionais embarcados e Processadores Digitais de Sinais (DSP).....	39
Microprocessadores	39
Microcontrolador	40
Processador digital de sinais	40
3.4. Tecnologias de Transmissão de dados Sem-fio em sistemas de medição	41
3.4.1. Wi-Fi (IEEE 802.11x)	42
3.4.2. Bluetooth	43
3.4.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)	46
3.4.4. Comparação entre os padrões	47

CAPÍTULO 4. PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE E INTERFACEAMENTO DE UM MACROINDENTADOR PORTÁTIL UTILIZANDO TECNOLOGIAS DSP E WIRELESS 49

4.1. Introdução	49
4.2. Descrição geral do PropInSitu 2	50
4.2.1. Estruturas mecânicas	51
4.2.2. Instrumentação e hardware de controle	53
4.2.3. Software de controle, aquisição e processamento dos dados.....	56
4.3. Proposta de um novo sistema <i>Hardware/Software</i> para controle do equipamento MIP-II	57
Condicionador de sinais e Conversor A/D.....	58
Unidade de Controle (<i>DSP</i>)	59
Módulo de comunicação sem-fio (<i>Wireless</i>)	60
Software de configuração e monitoramento do computador <i>host</i>	61

CAPÍTULO 5. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DAS UNIDADES DE HARDWARE E SOFTWARE DE CONTROLE. 62

5.1. Introdução	62
5.1.1. O motor e o <i>Driver</i>	62
5.1.2. O sensor de carga	64
5.1.3. Sensor de deslocamento	65
5.2. Projeto do <i>hardware</i> de controle e instrumentação.....	67
5.2.1. Módulo Condicionador de sinais	68
Módulo Bluetooth.....	73

5.2.2. Placa Principal.....	77
Conversor A/D.....	77
5.3. Desenvolvimento do software.....	80
5.3.1. Software de controle.....	80
Seqüência de ensaio, conforme diagrama apresentado na Figura 5.20:.....	80
5.3.2. Software do Computador Hospedeiro	84
5.4. O protótipo	87
 CAPÍTULO 6. EXPERIMENTOS E AVALIAÇÕES.....	 91
6.1. Introdução	91
6.2. Avaliação do sistema de transmissão	92
6.3. Avaliação dos sistemas de condicionamento e aquisição	93
6.3.1. Análise do sistema de condicionamento com um sinal senoidal	95
6.3.2. Avaliação do condicionamento e aquisição dos dados dos sensores	97
Sensor de Força	98
Sensor de deslocamento.....	100
 CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	 102
7.1. Conclusões	102
7.2. Trabalhos Futuros.....	103
7.3. Publicações	104
 ANEXO I - DIAGRAMAS DE HARDWARE	 105
 ANEXO II.....	 111
 REFERÊNCIAS.....	 112

Capítulo 1.

Introdução

1.1. Motivação

O aumento da produção de petróleo, derivados e gás natural traz como consequência a necessidade de aumento do escoamento da produção e da distribuição de combustíveis. Com isso, a indústria de transporte dutoviário verá, cada vez mais, crescer suas oportunidades de negócio. Segundo o Anuário Estatístico 2010 da ANP, a extensão de dutos em operação no Brasil, em 31/12/2009, era de quase 18 mil km (ANP, 2010).

Com a previsão de aumento significativo na produção de petróleo e gás natural nas bacias marítimas brasileiras nos próximos anos, e com o potencial crescimento do mercado de exportação de etanol, é clara a necessidade de se investir no transporte dutoviário, não só pelas vantagens técnico-econômicas, mas também pelo aspecto estratégico de interligação entre as diversas regiões produtoras e consumidoras do país e do mundo.

De acordo com Cardoso (2004), o sistema de dutos é o meio mais seguro e econômico de se transportar petróleo e seus derivados, interligando regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos, parques de estocagem e centros consumidores. Quase todos os dutos são construídos por tubos metálicos de aço carbono, e podem ser instalados no mar ou em terra, operando continuamente. Para garantir a segurança deste sistema e sua operação contínua é preciso criar mecanismos para garantir a integridade mecânica dos dutos e sua confiabilidade operacional.

Neste sentido, a segurança do transporte dutoviário no mundo tem se tornado cada vez mais importante. No Brasil, o desenvolvimento de tecnologias para o sistema dutoviário, tendo por finalidade o aumento da confiabilidade, da vida útil, e da redução dos custos e riscos envolvidos tem sido objetivo estratégico da Petrobrás, principalmente após a criação do PROTRAN - Programa Tecnológico de Transporte - em 1998, cujos principais desafios são (Petrobras, 2010):

- Aumentar a capacidade operacional e a vida útil da malha existente;

- Ampliar sua confiabilidade;
- Desenvolver novos métodos e equipamentos para inspeção de dutos;
- Minimizar os riscos de vazamentos, impactos ao meio ambiente e perdas de capacidade de transporte;
- Detectar emissões fugitivas nos meios de transporte;
- Reduzir os custos operacionais e de investimentos;
- Reduzir o tempo de reparo;
- Ampliar as funções dos sistemas de controle supervisionado e de aquisição de dados;

Pode-se observar que a maior parte destes desafios está intimamente relacionada à garantia da integridade mecânica dos dutos. A determinação da integridade de qualquer estrutura metálica é importante tanto para garantir que falhas não ocorrerão durante sua utilização, quanto para avaliar o tempo de vida da estrutura e suas condições de operação. Para avaliar a integridade destas estruturas submetidas a acidentes ou condições de serviço severas, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas do material (RAMOS NETO; FRANCO, 2002).

Portanto, o conhecimento das propriedades mecânicas de dutos metálicos é de fundamental importância, principalmente para sua utilização segura e otimizada, ainda mais quando consideramos um número relevante de linhas cuja documentação não é precisa e/ou inexistente.

Convencionalmente, essas propriedades são obtidas a partir de ensaios destrutivos, como, por exemplo, ensaios de tração, impacto e fadiga. Nas últimas décadas, a macroindentação tem sido sugerida como uma boa alternativa para determinação das propriedades mecânicas de materiais metálicos por meio de ensaios não destrutivos e com a possibilidade de ser realizada "*In-Situ*" (CARDOSO, 2004).

A macroindentação instrumentada é um ensaio baseado em múltiplas indentações em um mesmo local de penetração. Desta forma, com o monitoramento constante da carga e da profundidade de indentação determina-se uma curva característica do ensaio e, a partir de correlações entre essa curva e determinadas equações-modelo, pode-se estimar diversas propriedades mecânicas, tais como: limite de escoamento, limite de resistência, dureza, curva tensão x deformação, coeficiente de resistência e expoente de encruamento (RAMOS NETO; FRANCO, 2002).

Desta forma, a macroindentação instrumentada permite obter as propriedades mecânicas de dutos em operação, de maneira não destrutiva, a partir de ensaios realizados na própria estrutura (*in situ*), sem a interrupção do fluxo de produto nas linhas de transmissão.

Em 2001, o então LTM - Laboratório de Tribologia e Materiais da FEMEC - UFU, em parceria com o Biolab - Laboratório de Engenharia Biomédica e Automática da FEELT - UFU, com apoio financeiro da FINEP e da PETROBRAS, iniciou um projeto de P&D denominado "Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada". O projeto, como o próprio nome sugere, visava desenvolver um equipamento nacional capaz de realizar ensaios de indentação instrumentada em dutos metálicos para avaliação das propriedades mecânicas de linhas de transmissão de óleo e gás em operação, sem a necessidade de paralisar o funcionamento da mesma, reduzindo drasticamente os prejuízos com os lucros cessantes e a necessidade de recorrer a empresas estrangeiras que realizassem este tipo de serviço a preços exorbitantes.

A primeira etapa deste projeto, concluída em 2004, deu origem a um protótipo de equipamento denominado MIP - Macroindentador Portátil, construído com *know-how* totalmente nacional e a um custo de desenvolvimento equivalente a praticamente metade do valor de um equipamento importado, patenteado pelo Petrobrás sob o número de registro BR_PIO505085-5. O equipamento desenvolvido (Figura 1.1 e Figura 1.2) apresentou resultados bastante animadores, conseguiu-se com ele realizar os ensaios de indentação instrumentada de forma segura e satisfatória, e a partir deste ensaio determinar as propriedades mecânicas, com um erro percentual médio menor que 12% em relação ao ensaio de tração.

A Figura 1.1 apresenta o MIP-I, suas principais estruturas e componentes mecânicos e eletrônicos: as estruturas mecânicas, o motor, os sensores, a unidade de controle do motor e condicionamento de sinal. A Figura 1.2 apresenta o mesmo equipamento em operação, as unidades de controle do motor e condicionamento de sinais que estão acomodadas na caixa destacada como eletrônica associada, e o microcomputador portátil responsável pelo controle e análise dos dados. Percebe-se nesta foto a quantidade de cabos necessários para interligar o equipamento com sua eletrônica de controle.

Durante os ensaios em campo perceberam-se certas dificuldades de operação do equipamento, principalmente com relação ao método fixação e reposicionamento do equipamento na peça a ser ensaiada, que era feito por meio de parafusos e correntes. Visando suprir estas dificuldades e aperfeiçoar o protótipo desenvolvido, foi iniciada em 2005 uma segunda etapa deste projeto, que culminou com um novo equipamento em 2007 que ficou conhecido como MIP-II.

Dentre as melhorias apresentadas pelo MIP-II podemos destacar: a implementação de um sistema de engate rápido, facilitando a fixação e o reposicionamento do equipamento; a

possibilidade de realização de vários ensaios ao longo de determinada direção de maneira automatizada, utilizando um sistema para deslocamento horizontal; a monitoração da temperatura do material durante o ensaio; a visualização da região ensaiada com a utilização de uma micro-câmera; a implementação de uma nova metodologia de cálculo das propriedades mecânicas possibilitando a utilização dos dois métodos de cálculo de propriedades mecânicas por macroindentação instrumentada existentes, que serão apresentados posteriormente. A Figura 1.3 mostra os dois equipamentos desenvolvidos fixados no duto de teste, percebe-se na figura a presença de muitos cabos.

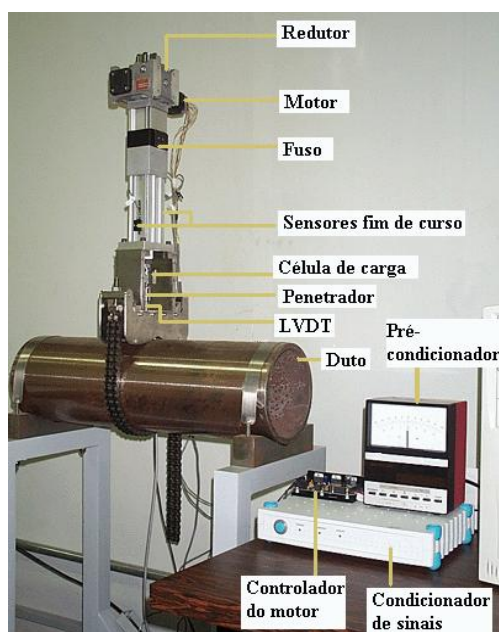
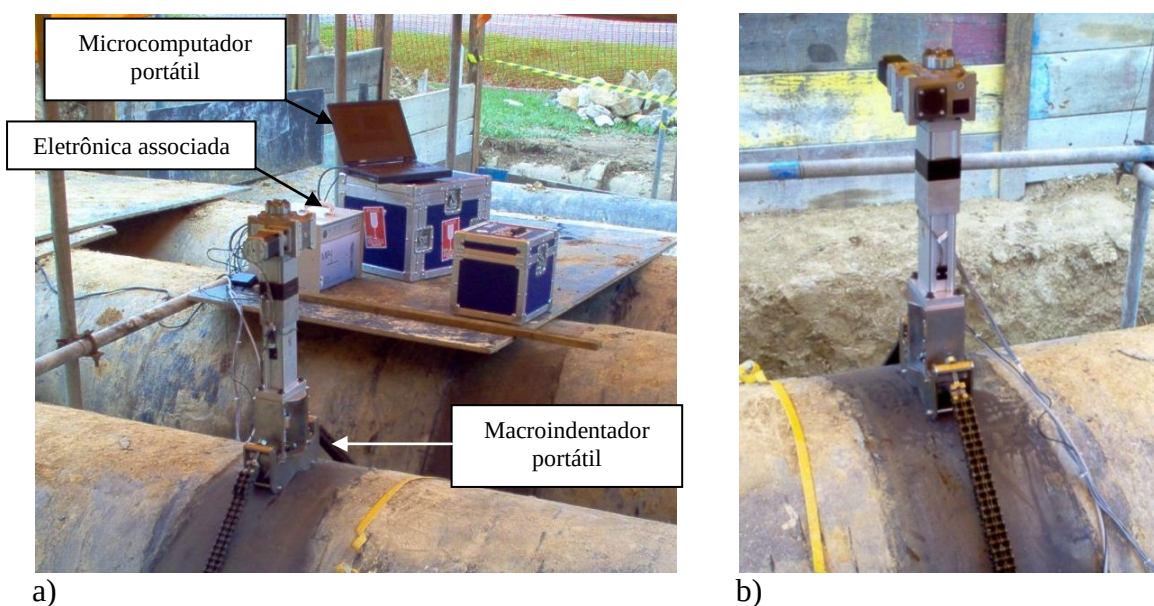


Figura 1.1- Primeiro protótipo de Macro Indentador Portátil desenvolvido.



a) b)
Figura 1.2 - Macroindentador portátil MIP-I em operação no campo, mostrando: a), vista geral e b) Destaque do macroindentador portátil.

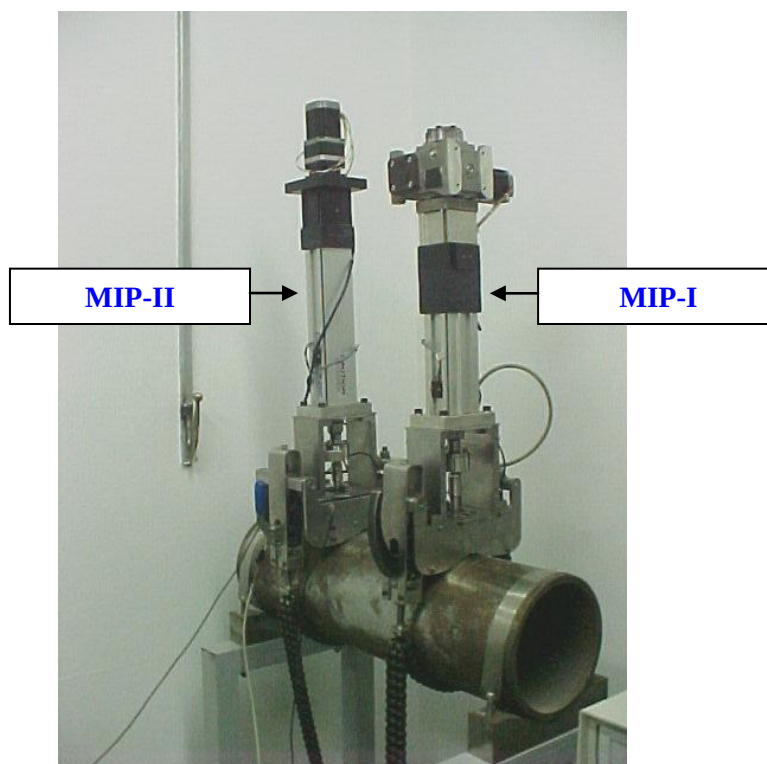


Figura 1.3 – Vista geral do PropInSitu 1, desenvolvido no primeiro projeto, e do PropInSitu 2, desenvolvido posteriormente.

Ambos os protótipos foram desenvolvidos utilizando tecnologias de controle e aquisição de sinais de uso geral, de vários fabricantes, interconectados e controlados por um computador pessoal de propósito geral utilizando o sistema operacional Windows[®] e linguagens de programação de alto nível. Entretanto, a necessidade de vários cabos interconectando os diversos dispositivos, e o uso de unidades com características distintas produzidas por fabricantes diferentes poderiam acarretar em erros inesperados no processo de indentação devido a um eventual rompimento de cabos, falha de comunicação entre os dispositivos, ou travamento de software.

Embora ambos os equipamentos tenham alcançado seus objetivos gerais, percebeu-se nos ensaios realizados em campo, que poderiam ser feitas melhorias nestes protótipos a fim de reduzir o peso total do equipamento, a quantidade de cabos utilizados nas interconexões, e aumentar a velocidade e a segurança na execução dos ensaios, por meio de um hardware de controle dedicado.

1.2. Objetivos

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de projetar e construir um novo sistema de controle, instrumentação e interfaceamento para o equipamento de

macroindentação MIP-II, baseado em tecnologias de transmissão de dados sem-fio (wireless) e controle computacional embarcado via processadores digitais de sinais (DSP) de última geração, melhorando assim a transportabilidade, o tempo e a complexidade da montagem do equipamento, a velocidade de execução do ensaio, reduzindo os requisitos de hardware do computador host e aumentando o determinismo na execução do ensaio, podendo ser controlado à distância pelo operador, permitindo a realização dos ensaios de forma mais rápida e totalmente automatizada, agregando segurança na operação do equipamento.

Para possibilitar o desenvolvimento do novo sistema de controle, instrumentação e interfaceamento associados ao equipamento, as principais metas propostas foram:

- Estudo do estado da arte das metodologias utilizadas para determinação de propriedades mecânicas de materiais de maneira não-destrutiva.
- Definição dos aprimoramentos e funcionalidades requeridas pelos equipamentos.
- Estudo dos principais tipos de transmissão remotos existentes e sua aplicabilidade.
- Estudo dos principais processadores digitais de sinal e sua utilização
- Projeto e Desenvolvimento de novas unidades de instrumentação, controle e interfaceamento do MIP-II, mais leves, compactas e com menos cabos de conexão, utilizando hardware dedicado, capaz de ser comandado remotamente, com transmissão de dados sem-fio.

1.3. Estrutura da dissertação

As metodologias utilizadas para atingir os objetivos citados anteriormente estão descritas em cada um dos capítulos deste trabalho. Estruturalmente, esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresentação da motivação, dos objetivos e metas e da estrutura do trabalho.
- Capítulo 2: Apresentação do estado da arte da técnica a ser aplicada para obtenção das propriedades mecânicas de materiais.
- Capítulo 3: Apresenta conceitos fundamentais relacionados a Sistemas de medição, controle e transmissão de dados importantes para os desenvolvimentos em tela.
- Capítulo 4: Proposta de um sistema de controle e interfaceamento de um Macroindentador portátil utilizando DSP e tecnologia wireless.

- Capítulo 5: Desenvolvimento do sistema proposto, detalhando seu funcionamento.
- Capítulo 6: Avaliação do protótipo, com descrição dos resultados obtidos.
- Capítulo 7: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2.

Estado da arte

2.1. Propriedades mecânicas

A determinação e/ou conhecimento das propriedades mecânicas é muito importante para a escolha do material a ser usado em determinada aplicação, bem como para avaliar o "tempo de vida" da estrutura. As propriedades mecânicas definem o comportamento do material quando sujeito a esforços mecânicos, pois estas estão relacionadas à capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços aplicados sem romper e sem se deformar de maneira incontrolável.

As principais propriedades mecânicas são: Resistência à tração (tensão máxima que o material aceita), Elasticidade (deformação que o material suporta, com a aplicação de uma determinada tensão, retornando às características originais após a retirada desta tensão), Ductilidade (o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura), Fluência (deformação ao longo do tempo de um material submetido a uma carga ou tensão constante), Fadiga (resistência a esforços repetitivos), Dureza (resistência a deformações permanentes) e Tenacidade (energia total para provocar fratura). A determinação destas propriedades é feita através de ensaios mecânicos, porém, a melhor maneira de avaliar o desempenho de um material é colocá-lo sob condições reais de operação, mas infelizmente, por razões técnicas e econômicas, na maioria das vezes, isto não é praticável. Desta maneira, é importante que existam formas mais rápidas, menos onerosas de se avaliar da melhor maneira possível o comportamento destes materiais em condições reais de operação.

Apesar do objetivo principal dos ensaios mecânicos ser a determinação de propriedades, os materiais também são analisados visando, dentre outros aspectos, a substituição e a melhoria de componentes e valores para projeto.

Os diversos ensaios geralmente não determinam as propriedades mecânicas de uma maneira absoluta, no sentido de que os valores obtidos sejam imutáveis e determinem totalmente o comportamento das peças em serviço. Como nem sempre é possível realizar o

ensaio em toda a peça ou estrutura, este é efetuado em uma parte da mesma ou em partes dos materiais com que foi fabricada (amostras). Estas amostras, que terão formas e dimensões padronizadas, recebem o nome de corpos de prova, os quais, para garantir que os resultados sejam comparáveis, são confeccionados seguindo normas técnicas editadas por entidades tais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Society for Materials* (ASM) (CARDOSO, 2004).

Segundo (RASLAN, 1982) os ensaios mecânicos seguem a seguinte classificação.

Quanto à integridade do material:

- **Destrutivos:** implicam na inutilização parcial ou total da peça (Tração, Fadiga, Dureza, Fluência, Torção, Tenacidade à Fratura, etc.).
- **Não destrutivos:** não comprometem a integridade da peça (Raios-x, Ultra-Som, Microdureza, Indentação, etc.).

Quanto à velocidade de aplicação de carga:

- **Estático:** quando a carga é aplicada durante um tempo relativamente curto, mas de maneira suficientemente lenta, de tal forma que a velocidade de aplicação de carga torna-se desprezível, mantendo-se os estados de equilíbrio (Tração, Compressão, Flexão, Dureza, Indentação, etc.).
- **Dinâmico:** quando a carga é aplicada rapidamente ou então ciclicamente, de maneira que surgem respostas associadas à inércia e ao tempo de ensaio (Impacto, Fadiga, etc.).
- **Carga Constante:** quando a carga é aplicada durante um longo período (Fluência, etc.)

Um dos ensaios mecânicos mais usuais e importantes é o de tração, pois permite obter informações sobre a resistência dos materiais e pode definir critérios de aceitação para especificação de materiais, controle dos métodos de fabricação, auxílio no desenvolvimento de novos materiais e avaliação das propriedades mecânicas para uso em projetos (CARDOSO, 2004).

2.1.1. Ensaio de tração

No ensaio de tração, um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma carga ou força de tração uniaxial, paulatinamente crescente, que tende a esticá-lo ou alongá-lo, promovendo uma deformação progressiva de aumento de comprimento (ABNT, 2002).

Durante o ensaio, são medidas a força e o alongamento correspondente. Em geral, o ensaio é realizado até a ruptura do corpo de prova. Como a curva *Força x Alongamento* resultante é dependente das dimensões do corpo de prova, os resultados devem ser ajustados

para eliminar tal dependência, assim, é conveniente transformar a curva força *versus* alongamento obtida do registro da máquina de ensaio de tração em uma curva tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia. A tensão de engenharia (σ) é a resistência do corpo de prova à força aplicada por unidade de área da seção transversal da amostra, e a deformação de engenharia (ε) é a variação de uma dimensão qualquer do corpo por unidade da mesma dimensão (PADILHA, 1997). A forma e a magnitude desta curva dependem da composição do material, do tratamento térmico, da deformação plástica anterior, da taxa de deformação e da temperatura. A Figura 2.1 representa um corpo de prova submetido ao ensaio de tração, onde F é a força aplicada e l_0 , l e A_0 são respectivamente o comprimento inicial, o comprimento durante o ensaio e a área inicial do corpo de prova. A Figura 2.2 apresenta um gráfico esquemático do comportamento típico da curva *tensão-deformação* de engenharia em tração, até o rompimento (fratura), para um metal típico.

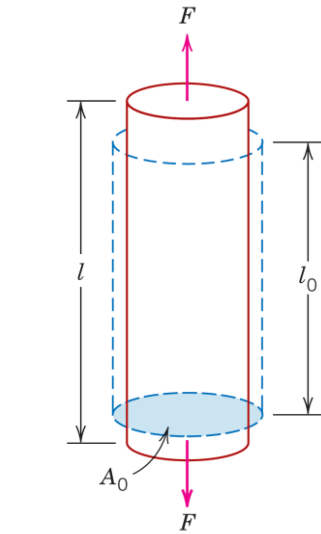


Figura 2.1 - Representação esquemática do ensaio de tração em um corpo de prova.

Matematicamente, a tensão de engenharia, σ , é definida como:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Onde F é a força em cada ponto e A_0 é a área inicial da secção transversal do corpo de prova.

O alongamento, ou deformação, de engenharia, ε , é definido como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

Onde l_0 é o comprimento inicial do corpo de prova e l é o comprimento do corpo de prova durante o ensaio, e Δl é obtido pela diferença entre l e l_0 . O valor de σ é dado em Kgf/mm^2 e o de ε em %. As grandezas F , A_0 e l_0 estão representadas na Figura 2.1, que apresenta conceitualmente um corpo de prova submetido ao ensaio de tração.

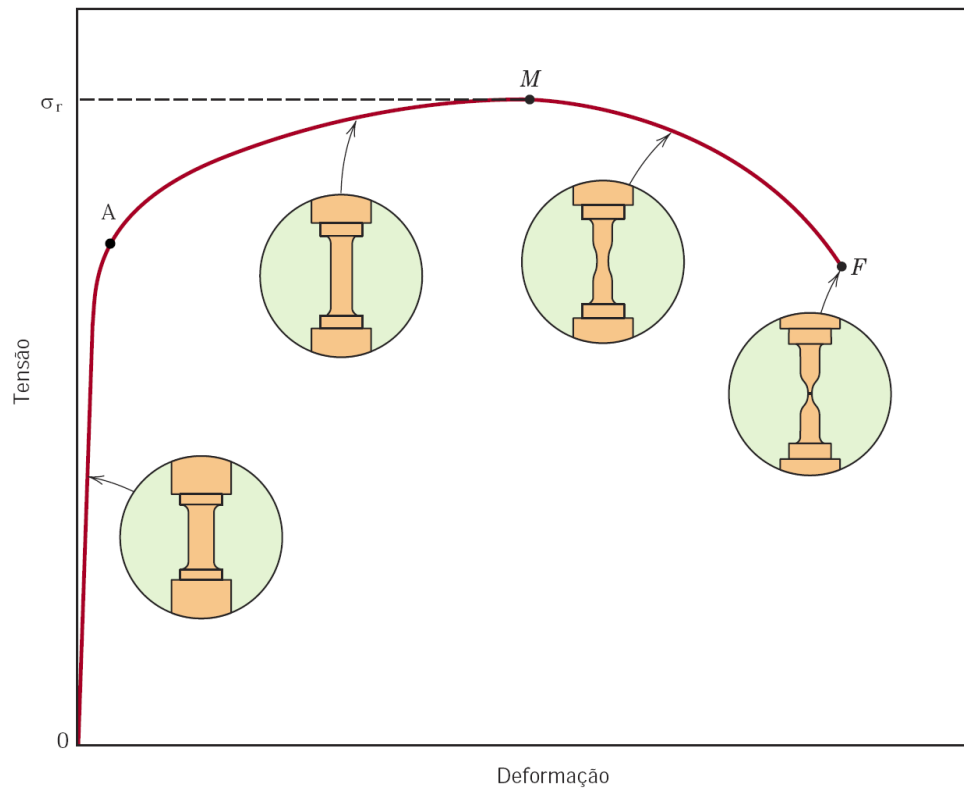


Figura 2.2 - Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura, ponto F. O limite de resistência à tração, σ_r , está indicado no ponto M. Os detalhes nos círculos representam a geometria do corpo de prova deformado em vários pontos ao longo da curva (CALLISTER, 1991).

No diagrama tensão *versus* deformação da Figura 2.2 pode-se distinguir duas regiões: elástica (0-A) e plástica (A-F).

Na **região elástica**, caso o esforço aplicado seja retirado, o corpo de prova retorna às suas dimensões originais. Esta propriedade de um material é denominada elasticidade. Alguns materiais, como os aços, apresentam uma região elástica relativamente grande, enquanto em materiais como o ferro fundido esta região é bastante reduzida. Nesta fase, as tensões são proporcionais às deformações, ou seja, o material obedece à Lei de Hooke, equação (2.3):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

Onde E é uma constante chamada de módulo de elasticidade e é dada pela inclinação do segmento **0A**, aproximado por uma reta. Esta propriedade do material indica a medida de rigidez do mesmo, ou seja, a capacidade do material resistir às deformações na fase elástica. Portanto, quanto maior o módulo de elasticidade de um material mais rígido ele será.

Na **região plástica**, quando a carga é retirada, em qualquer ponto, o material não retorna às suas dimensões originais, ou seja, ocorrem deformações permanentes. Do ponto de vista atômico, a deformação plástica é irreversível porque é resultado do deslocamento

permanente dos átomos e, portanto, não desaparece quando a tensão é removida. A maioria das estruturas são projetadas para assegurar que apenas deformações elásticas irão ocorrer quando uma tensão for aplicada. Torna-se então desejável conhecer o nível de tensão onde a deformação plástica tem início, fenômeno conhecido como escoamento (CALLISTER, 1991).

Da curva tensão-deformação de engenharia, apresentada anteriormente na Figura 2.2, podemos destacar três pontos característicos que definem parâmetros importantes dos materiais, são eles o ponto **A** - limite de escoamento, o ponto **M** - limite de resistência e o ponto **F** - tensão de ruptura.

O **limite de escoamento** (σ_e), também chamado de tensão de escoamento, é uma das propriedades mais importantes a ser avaliada, pois ela determina a tensão limite a partir da qual a deformação não é mais reversível, ele é definido como sendo a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação, se houver algum acréscimo de tensão o material começa a sofrer deformação plástica.

Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,5%. À medida que o material é deformado além deste ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (a lei de Hooke, Eq. 6.5, deixa de ser válida), ocorrendo então uma deformação permanente e não recuperável (deformação plástica) (CALLISTER, 1991).

O **limite de resistência à tração** (σ_r) é a tensão no ponto máximo da curva *tensão-deformação* de engenharia, ponto M. Este corresponde à tensão máxima que o material sob tração pode suportar antes de sua ruptura, ou seja, se essa tensão for aplicada e mantida, o resultado será uma fratura. Quando a tensão aplicada atinge o valor dessa tensão máxima, uma pequena constrição (afinamento), ou pescoço, começa a se formar em algum ponto da região estreita do corpo de prova, e toda a deformação subsequente fica confinada neste pescoço, como indicado pelas representações esquemáticas do corpo de prova mostradas nos detalhes da Figura 2.2. Esse fenômeno é conhecido por “estricção”, onde ao final ocorrerá a fratura (CALLISTER, 1991).

A **tensão de ruptura** (de engenharia) (σ_{rup}), de um material, corresponde à tensão aplicada quando da ocorrência da fratura, também chamada de resistência à fratura (CALLISTER, 1991; PADILHA, 1997).

A curva de *tensão x deformação engenharia ou convencional*, mostrada anteriormente, não apresenta uma informação real das características tensão e deformação porque se baseia somente nas características dimensionais iniciais do corpo de prova ou amostra e que na verdade são continuamente alteradas durante o ensaio, ela não leva em consideração a redução

na área da seção reta do corpo de prova durante o ensaio, na região da estricção, por isso os valores de tensão obtidos a partir da equação (2.1) ficam menores do que os valores reais. A tensão real (ou verdadeira) é um valor instantâneo de tensão, portanto independente das dimensões originais do corpo de prova. Em algumas situações pode-se fazer mais sentido usar um esquema baseado em *tensão real (ou verdadeira) x deformação real (ou verdadeira)*. Para maiores informações sobre ensaio de tração, tensão verdadeira e de engenharia consultar CALLISTER, 1991 e PADILHA, 1997.

Uma comparação esquemática dos comportamentos tensão-deformação de engenharia e verdadeira é feita na Figura 2.3. Pode-se parecer, pela curva tensão x deformação de engenharia, que o valor da tensão necessária para manter uma deformação crescente está diminuindo após o ponto M - limite de resistência à tração, onde tem início a estricção, o que não é verdade como pode-se perceber pela curva tensão x deformação verdadeira.

Paralelamente à formação do pescoço está a introdução de um estado de tensão complexo na região da estricção (isto é existência de outros componentes de tensão em adição à tensão axial). Como consequência, a tensão (axial) correta na região da estricção é ligeiramente inferior àquela calculada a partir da carga aplicada e da área da seção reta da estricção. Isto leva à curva “corrigida” mostrada em linha tracejada na Figura 2.3 (CALLISTER, 1991).

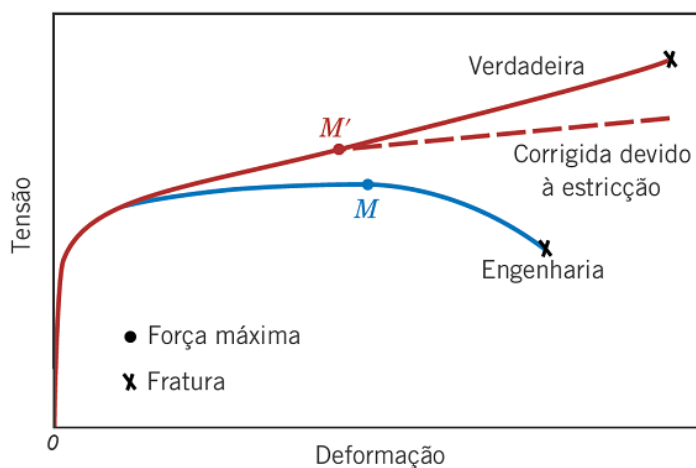


Figura 2.3 - Uma comparação entre os comportamentos típicos *tensão-deformação de engenharia* e *tensão-deformação verdadeira* em tração. A estricção começa no ponto M na curva de engenharia, que corresponde ao ponto M' na curva verdadeira. A curva *tensão-deformação verdadeira "corrigida"* leva em consideração o estado de tensão complexo no interior da região da estricção, adaptada de (CALLISTER, 1991).

Apesar da curva de engenharia não ser a mais precisa ela é a mais utilizada, pois a partir dela pode-se definir, de maneira mais fácil, o Limite de escoamento; Limite de resistência; e a Tensão de ruptura.

Como visto, o ensaio de tração é uma ferramenta muito útil para a determinação de propriedades mecânicas de materiais, no entanto, por se tratar de um ensaio destrutivo, com necessidade de extração de um corpo de prova do material a ser ensaiado, existem diversas situações nas quais sua utilização não é recomendável, seja por inviabilidade técnica ou econômica. Para tais situações pode-se utilizar o ensaio de indentação instrumentada, que apresenta a vantagem de ser não-destrutivo e ainda poder ser realizado *in-situ*, na estrutura do material a ser ensaiado, sem interferir na utilização desta estrutura.

2.1.2. Ensaio de Indentação

Os ensaios de indentação, ou penetração, são outra forma de determinar as propriedades mecânicas de materiais, sendo conhecidos na literatura desde 1943 e utilizados principalmente para a medição da dureza e da tenacidade à fratura (GAHR, 1987). Estes ensaios consistem na aplicação de uma força a penetradores de diferentes geometrias (cônica, piramidal, esférica, etc.), nos quais mede-se a força aplicada e a área deixada pela impressão na superfície da amostra, caracterizando a dureza do material.

Quando o ensaio é realizado controlando e registrando os valores da carga aplicada e da profundidade de penetração, por meio de sensores, este é conhecido como indentação instrumentada.

A indentação instrumentada é uma técnica muito versátil, pois pode ser utilizada para medir propriedades elásticas e plásticas de materiais em geral. Ela tem sido utilizada, nos últimos anos, para avaliação de propriedades mecânicas, tais como o limite de escoamento, de resistência à tração, dentre outras, de forma não destrutiva (HAGGAG, 2001). É uma ferramenta útil para medir propriedades mecânicas de materiais com superfícies modificadas, filmes finos ou revestimentos (MIKOWSKI, 2008). A indentação instrumentada permite, também, determinar parâmetros viscoelásticos de polímeros, utilizando o carregamento sob força constante e medindo a taxa de deformação (AZEVEDO et al., 2009).

A norma ISO/DIS 14577, que regulamenta os ensaios de indentação instrumentada, para a obtenção da dureza e outros parâmetros, como o módulo de elasticidade, em materiais metálicos, classifica os ensaios de acordo com a escala da impressão deixada pelo indentador, subdividindo-os em (ISO 14577, 2003):

- i. Macro: para a cargas aplicadas entre 2 N e 30 kN;
- ii. Micro: para forças de teste menores que 2 N e profundidade de penetração maior que 200 nm; e
- iii. Nano: para profundidades de penetração menores ou iguais a 200 nm.

2.2. Ensaios de Macroindentação como alternativa para os ensaios de tração

A Macroindentação instrumentada, como alternativa para os ensaios de tração na obtenção de propriedades mecânicas tais como o limite de escoamento, resistência à tração, entre outros, foi desenvolvida a partir da técnica convencional do ensaio de dureza, e tem sido estudada e utilizada desde a década de 1980 por *Fahmy M. Haggag* (HAGGAG, 1980) e posteriormente por *Dongil Kwon* em 2000 (AHN, J. H. et al., 2000), apresentando excelentes resultados e uma alta repetibilidade. No entanto, apenas recentemente, em 2008, foi publicada a norma ISO/TR 29381:2008, regulamentando este tipo de ensaio.

A norma ISO/TR 29381:2008 descreve métodos para avaliar as propriedades de tração de materiais metálicos (curva tensão-deformação verdadeira e parâmetros derivados), utilizando um teste de indentação instrumentada.

Os intervalos de aplicação dos testes de indentação instrumentada estão em consonância com a classificação da ISO 14577-1:2002, mas a escala da força recomendada é de 2 N a 3 kN.

A ISO/TR 29381:2008 inclui os três métodos seguintes, que apresentam princípios sólidos e são capazes de serem utilizados na prática (ISO /TR 29381:2008, 2008).

- Método 1: tensão e deformação representativa;
- Método 2: análise inversa por aplicação de Modelagem por Elementos Finitos;
- Método 3: Aplicação de redes neurais.

Em cada método, as curvas de tração são derivadas da curva de indentação (força-profundidade) medida experimentalmente, a partir da qual as propriedades de tração, por ensaio indentação, são avaliadas. Todos os três métodos necessitam de diferentes estratégias e habilidades dos utilizadores para obter as propriedades de tração por indentação. As informações necessárias são diferentes para cada método, e são descritas em detalhe pela norma.

Para os três métodos, a principal hipótese é a ausência de tensões residuais na peça de teste. A existência de tensões residuais pode afetar a estimativa das propriedades de tração por indentação. Um procedimento de avaliação de tensões residuais utilizando um teste de indentação instrumentada é dado como referência na norma.

O método discutido nesta dissertação será o Método 1: tensão e deformação representativa, que procura obter as propriedades mecânicas de uma forma analítica, utilizando equações modelo baseadas na geometria do indentador, que relacionam a curva de

indentação com os parâmetros do teste de tração, que vem sendo estudado desde 2001 pelo grupo de pesquisas formado pelo Biolab em parceria com o atual Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), e que já foi implementado e testado com sucesso em desenvolvimentos anteriores.

A grande vantagem em se utilizar o ensaio de macroindentação instrumentada para a avaliação de propriedades mecânicas em relação aos métodos convencionais é que a macroindentação, para efeitos práticos, pode ser considerada um ensaio não destrutivo, além de poder ser realizado na própria estrutura a ser testada sem a necessidade de paralisar o processo, por exemplo, em um duto de condução de óleo ou gás em operação, bastando apenas que a superfície a ser ensaiada seja uma superfície com baixa rugosidade, preferencialmente polida e livre de oxidação. Quando realizado em laboratório as amostras para este teste podem ser muito pequenas e vários testes podem ser realizados em um único exemplar, desde que a zona plástica de uma indentação não coincida com zona plástica de uma indentação vizinha (TRICHY, 2005).

Um processo típico de Indentação Esférico-Instrumentada (IEI) para avaliação de propriedades mecânicas envolve ciclos repetidos de carregamento, descarregamento e recarregamento, em um mesmo local de penetração na superfície metálica. A Figura 2.4, que será detalhada posteriormente, mostra uma representação gráfica da relação entre carga e deslocamento em um ensaio típico de macroindentação instrumentada. Os ensaios são feitos, geralmente, utilizando uma esfera de WCCo (Carconeto de Tungstênio-Cobalto) como penetrador, pois este material apresenta alta dureza em comparação com os tipos de aços comumente ensaiados. A carga e a profundidade de indentação são medidas continuamente durante o ensaio. Estes dois parâmetros formam os dados experimentais não processados a partir dos quais outros parâmetros mecânicos de importância como o diâmetro da deformação plástica, a tensão verdadeira, a deformação verdadeira e o expoente de encruamento, dentre outros, serão calculados (HAGGAG, 1993; HAGGAG; SERVER, 1993; HAGGAG et al., 1997; RAMOS NETO; FRANCO, 2002).

Em um processo de indentação esférica, a similaridade geométrica não é mantida com o aumento da penetração nas indentações sucessivas (ciclos), conseqüentemente a pressão média (ou dureza) aumenta com o aumento da carga. Este princípio constitui a base para o teste de indentação esférica. Durante o ensaio, à medida que fazemos várias indentações, a carga e a geometria da indentação variam progressivamente. Assim, cada ciclo de indentação pode ser associado a um valor particular de *tensão verdadeira* e *deformação plástica verdadeira*. A tensão verdadeira e a deformação plástica em cada ciclo de indentação ajudam

a formar a curva de escoamento (TRICHY, 2005). Através da análise da curva de escoamento gerada a partir do ensaio de indentação, parâmetros como o limite de escoamento, limite de resistência, o coeficiente de resistência, o expoente de encruamento, a dureza e a tenacidade à fratura entre outros podem ser avaliados (HAGGAG, 1993; HAGGAG et al., 1990; HAGGAG; NANSTAD; MARRIOT; et al., 1989c; HAGGAG; WONG; ALEXANDER; et al., 1989d; MATHEW et al., 1999).

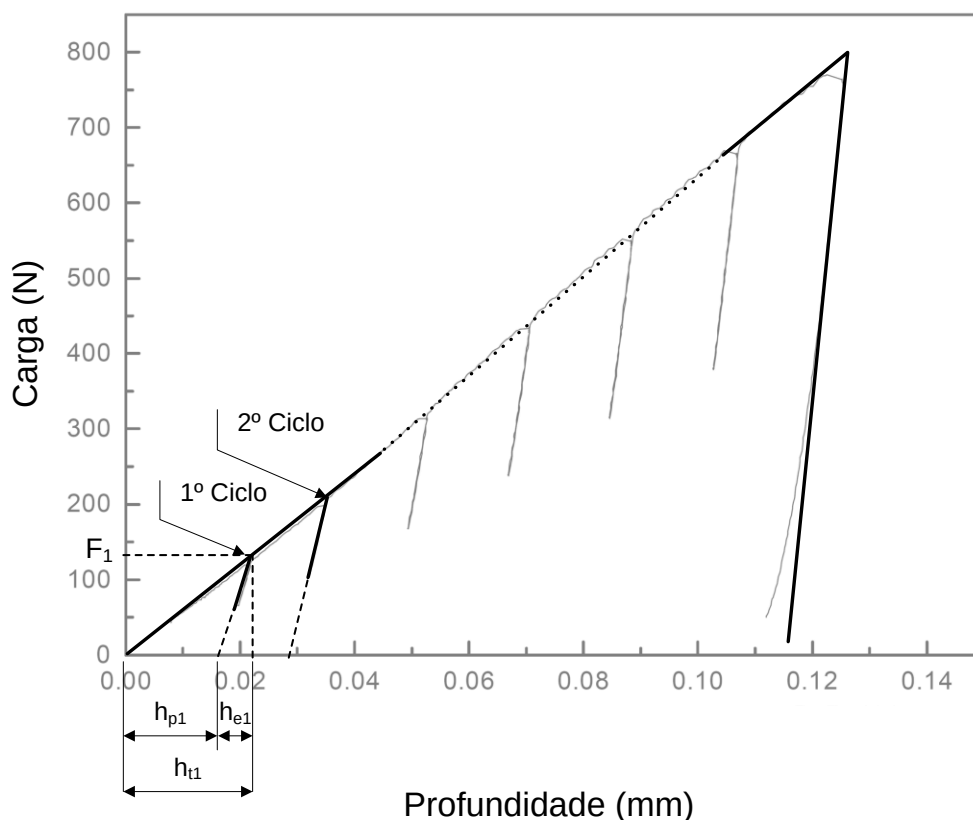


Figura 2.4 - Representação gráfica da relação entre carga e deslocamento em um ensaio de indentação instrumentada real, observando alguns ciclos de indentação e aproximação por segmentos de reta.

Em um ensaio de tração uniaxial, a deformação é geralmente confinada a um volume constante da seção da amostra. Assim, após a conclusão do carregamento elástico/linear de uma amostra de metal, o escoamento plástico e o encruamento se iniciam e continuam até a ocorrência da estricção. Em contraste, no ensaio IEI, as deformações elásticas e plásticas não são distinguidas (separadas) como no ensaio de tração. Com o aumento da profundidade de penetração, um volume crescente do material de teste é forçado a fluir sob compressões multiaxiais causadas pelo avanço do penetrador. Assim, em uma IEI, ambas as deformações elásticas e plásticas ocorrem simultaneamente durante todo o ensaio sem um ponto único e definido de escoamento (porque não há uma deformação constante do volume em um ensaio

de IEI). Conseqüentemente, a determinação do limite de escoamento deve ser baseada na curva carga versus profundidade obtida pela IEI (HAGGAG et al., 1997).

Nos múltiplos ciclos de indentação ocorrem processos consecutivos de encruamento, tanto do material anteriormente deformado quanto do material novo (ainda não deformado) (NETO, F. F. R.; FRANCO, 2002). Assim, a análise do limite de escoamento nos ensaios de IEI deve levar em conta essa ocorrência simultânea de escoamento e encruamento do material em teste sob condições de compressão multiaxial (HAGGAG et al., 1997).

A Figura 2.4 mostra uma curva típica de um ensaio de IEI, a partir dela podemos perceber que os gráficos carga versus profundidade normalmente apresentam-se como segmentos que podem ser aproximadas por polinômios de primeiro grau (CARDOSO, 2004). A razão para a relação aproximadamente linear da carga de indentação versus profundidade é devido a processos não-lineares duplos ocorrendo em sentidos opostos (ou seja, o aumento não-linear da carga versus profundidade devido à geometria do penetrador esférico está sendo compensado pelo comportamento em leis-de-potência do encruamento do material metálico ensaiado). Assim, os ensaios de IEI não apresentam o comportamento tradicional segmentado com duas fases (linear elástica seguida por uma não linear com encruamento do material), característico do ensaio de tração (HAGGAG et al., 1997).

A partir destas curvas determinam-se os valores da força máxima (F) e das profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e máxima (h_t) de cada ciclo, conforme representado na Figura 2.5. Estes valores serão utilizados para cálculo das propriedades mecânicas do material ensaiado, conforme o equacionamento a ser apresentado posteriormente.

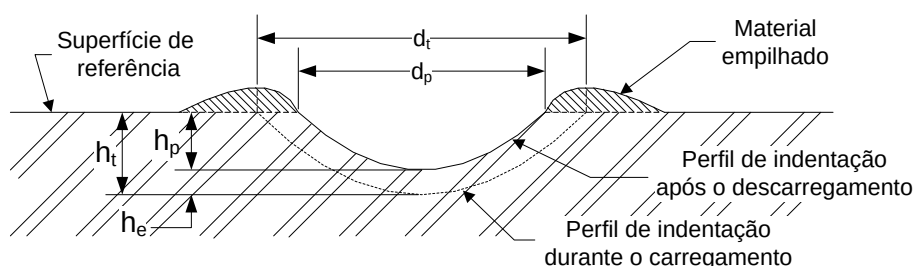


Figura 2.5. Perfil típico da indentação quando utilizando um penetrador esférico, adaptada de (HAGGAG, 1993).

A revisão da literatura disponível sobre o assunto mostra que as duas principais técnicas utilizadas para determinação das propriedades mecânicas de um material, a partir de ensaios de indentação instrumentada são: a técnica proposta por **Haggag et al (1989)** e a técnica proposta por **Kwon et al (2000)**.

A técnica proposta por Haggag é baseada em relações semi-empíricas e constantes que dependem da classe de material a ser analisada e não considera efeito da deformação da superfície causada pelo indentador (*pile up/ sink in*), esta técnica, apesar dos esforços da equipe proponente, ainda não tem uma norma que a regule. A técnica proposta por Kwon utiliza parâmetros de contato para a avaliação das propriedades de tração sem necessidade de utilização de constantes dependentes do tipo de material ensaiado, considerando os efeitos do afundamento (*sink in*)/empilhamento (*pile up*) plástico ao redor do indentador, este método serviu de base para elaboração da norma ISO/TR 29381:2008, que trata sobre este tipo de ensaio.

2.2.1. Método de Haggag et al. para a determinação das propriedades mecânicas

O grupo de pesquisadores liderados por M. Fahmy Haggag (HAGGAG; WONG; ALEXANDER; et al., 1989d; MURTY, K. L. et al., 1998), no Oak Ridge National Laboratory desenvolveu um método de indentação esférica instrumentada (IEI) para determinação da curva tensão-deformação. Seu sistema Stress-Strain Microprobe (SSM) é capaz de determinar a deformação de tração e propriedades de fratura baseados em IEI. Uma série de equações foram obtidas para relacionar os dados de indentação com os parâmetros da curva tensão-deformação. As análises da IEI são baseadas principalmente em teorias de elasticidade e plasticidade e algumas correlações empíricas, tal como descrito à seguir.

A correlação entre dureza e deformação durante a indentação esférica, e os testes de tração uniaxial foi, primeiramente, esclarecida por Tabor em 1951 (TABOR, 1951). Seus cálculos/explicações foram baseados em três premissas importantes:

- (i) Curvas monotônicas tensão-deformação plástica verdadeiras obtidas dos ensaios de tração e compressão uniaxial são razoavelmente semelhantes;
- (ii) A deformação da indentação correlaciona-se com a deformação plástica verdadeira em ensaios de tração;
- (iii) A dureza ou pressão média de indentação correlaciona-se com a tensão verdadeira em ensaios de tração.

Estas premissas são bem estabelecidas para vários materiais (HAGGAG, 1993). Nota-se que para a primeira premissa, as curvas de tensão *versus* deformação (de engenharia) correlacionam-se somente até o limite de resistência, desde que não haja mudança na área de seção transversal do corpo de prova (estricção).

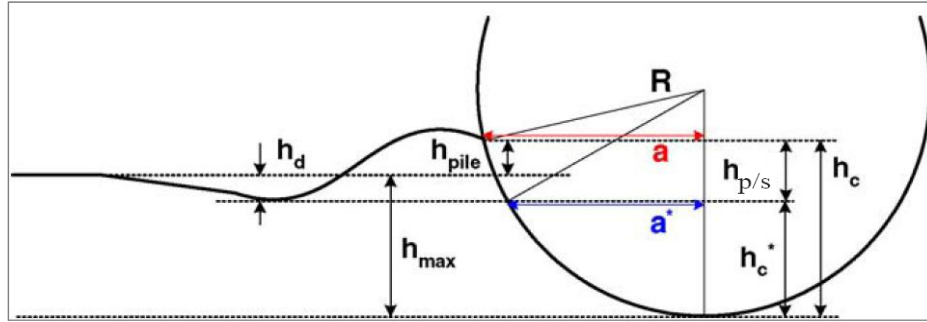


Figura 2.6 – Variáveis utilizadas para o cálculo da área de contato considerando a deflexão elástica e o empilhamento plástico adaptada de (JANG et al., 2005).

Na Figura 2.6 estão representadas as profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e total (h_t) do material durante e depois de um ensaio típico de indentação. O diâmetro plástico (d_p) pode ser determinado a partir de h_p desde que não haja ocorrência pronunciada de material empilhado (*pile up*) ou rebaixado (*sink in*) em torno da indentação (MOK, 1966).

Cálculo das propriedades de tração

A tensão e a deformação verdadeiras podem ser resolvidas a partir das equações (2.4) e (2.5), respectivamente. Todas essas equações são interdependentes, o que sugere que a solução seja realizada de forma iterativa por meios computacionais.

A máxima deformação que pode ser medida através da Indentação Esférica Instrumentada (IEI) é 20%, quando $d_p = D$ (MURTY, K.; MATHEW, 2004). Usando a equação de Hertz (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989), a profundidade plástica (h_p) pode ser estimada a partir do descarregamento da amostra e então convertido em diâmetro plástico da indentação (d_p), usando a eq. (2.6). A teoria de Hertz para contato normal elástico entre dois sólidos é usada na análise da deformação que ocorre no início do teste de indentação (TIMOSHENKO; GOODIER, 1970).

$$\varepsilon_v = 0,2 \cdot \frac{d_p}{D} \quad (2.4)$$

$$\sigma_v = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_p^2 \delta} \quad (2.5)$$

Onde: F - carga de indentação; d_p - diâmetro plástico da impressão (eq. (2.6)); ε_v - deformação plástica verdadeira; σ_v - tensão verdadeira e δ - é um parâmetro que depende do estágio de desenvolvimento da zona plástica sob o indentador e da tensão de indentação (τ) eq. (2.7).

O cálculo de d_p é dado pela equação a seguir:

$$d_p = \sqrt[3]{2,735 \cdot F \cdot D \cdot \left(\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_i} \right) \cdot \left(\frac{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2}{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2 - h_p \cdot D} \right)} \quad (2.6)$$

Onde: E_a - módulo de elasticidade do material da amostra; E_i - módulo de elasticidade do material do penetrador; D - diâmetro da esfera; h_p - profundidade plástica da impressão.

O valor de δ pode ser obtido da equação (2.7):

$$\delta = \begin{cases} 1,12 : & \phi \leq 1 \\ 1,12 + \tau \cdot \ln \phi : & 1 < \phi \leq 27 \\ \delta_{máx} : & \phi > 27 \end{cases} \quad (2.7)$$

Os valores de ϕ , $\delta_{máx}$ e τ são obtidos a partir das equações (2.8), (2.9) e (2.10):

$$\phi = \frac{\varepsilon_v \cdot E_a}{0,43 \cdot \sigma_v} \quad (2.8)$$

$$\delta_{máx} = 2,87 \cdot \alpha_m \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{\delta_{máx} - 1,12}{\ln(27)} \quad (2.10)$$

Onde: α_m - fator de restrição que depende da sensibilidade à taxa de deformação do material de teste (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).

Segundo Haggag (1989), os valores propostos para α_m estão dentro do intervalo de 0,5 e 1,0 conforme apresenta a Tabela 2.1. Mathew (1999) propõe que o valor da sensibilidade à taxa de deformação esteja entre 0,9 e 1,25 e que um valor típico para materiais com baixa sensibilidade é igual a 1,0.

Tabela 2.1: Valores para a sensibilidade à taxa de deformação (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989b)

Sensibilidade à taxa de deformação	α_m
Baixa	1,0
Média	$0,5 < \alpha_m < 1,0$
Alta	$\alpha_m < 0,5$

A faixa de escoamento plástico da curva de tensão verdadeira (σ_v) versus deformação plástica verdadeira (ε_v) pode ser representada por uma função de potência, equação (2.11).

$$\sigma_v = K \cdot \varepsilon_v^n \quad (2.11)$$

Onde: K e n - coeficiente e expoente de encruamento, respectivamente; σ_v - tensão verdadeira (equação (2.5)) e ε_v - deformação plástica verdadeira (equação (2.4)).

Os dados calculados das equações (2.4) e (2.5) são ajustados à equação (2.11) através de uma regressão, onde se obtém os valores do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K). Logo, o limite de ruptura (σ_r - de engenharia) é calculado a partir da equação (2.12).

$$\sigma_r = K \cdot \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (2.12)$$

Onde: e - número de Euler = 2,7182...

Para cada ciclo do ensaio de indentação, a profundidade total (h_t) é medida enquanto a carga é aplicada e, usando a relação de área projetada do penetrador esférico, o diâmetro total (d_t) pode ser calculado (eq. (2.13)):

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{(h_t \cdot D - h_t^2)} \quad (2.13)$$

Os pontos de todos os ciclos de carregamento até $d_t/D=1,0$ são ajustados por uma análise de regressão linear à relação de Meyer, expressa como:

$$\frac{F}{d_t^2} = A \cdot \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad (2.14)$$

Onde: F - carga aplicada; m - coeficiente de Meyer e A - parâmetro de teste do material.

A partir da regressão dos dados de d_t/D versus P/d_t^2 os valores de A e m são obtidos e o parâmetro de teste do material (A) pode então ser usado para calcular o limite de escoamento (σ_e) do material, usando a seguinte relação:

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (2.15)$$

Onde: β_m é o coeficiente de deformação, uma constante dependente do tipo de material (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989a).

A Tabela 2.2 apresenta os valores de β_m usados na literatura para dois tipos de aço. Na equação (2.15) acima, as unidades de A e σ_e devem ser as mesmas.

Tabela 2.2: Valores típicos da constante (β_m) do tipo de material (HAGGAG et al., 1990)

Material	β_m
Aços-Inoxidáveis	0,1910
Aços-Carbono (todos)	0,2285

Esta aproximação mais simplificada para obtenção do limite de escoamento elimina a determinação do material empilhado, exceto para avaliação das tensões residuais, reduzindo significativamente o tempo e o custo do teste (HAGGAG et al., 1990).

A dureza Brinell (HB) também pode ser determinada a partir do ensaio de indentação instrumentada com penetrador esférico. O cálculo é feito usando a carga máxima ($F_{máx}$ em kgf), o diâmetro final da impressão (d_f em mm) e o diâmetro da esfera (D em mm), usando a seguinte equação (proveniente do ensaio de dureza Brinell padronizado - ASTM E 10-84):

$$HB = \frac{2 \cdot F_{máx}}{(\pi \cdot D \cdot (D - (D^2 - d_f^2)^{0,5}))} \quad (2.16)$$

Onde: $F_{máx}$ - Carga máxima [kgf]; D - diâmetro da esfera [mm] e d_f - diâmetro final da impressão [mm].

Para maiores detalhes sobre o equacionamento utilizado pelo método de Haggag, consulte as seguintes referências: HAGGAG et al., 1990, RAMOS NETO; FRANCO, 2002 e CARDOSO, 2004.

2.2.2. Método de Kwon et al (2000 – 2003) para a determinação das propriedades mecânicas

Como alternativa à proposta de Haggag, que utiliza um modelo baseado em relações semi-empíricas, Known e colaboradores propuseram um método para cálculo das propriedades, no qual a tensão verdadeira e a deformação verdadeira são calculadas tomando-se por base parâmetros de contato da indentação, ou seja, profundidade de contato h_c , raio de contato α e/ou ângulo de contato γ entre a amostra e o indentador, (Figura 2.6 e Figura 2.9). Para maiores detalhes com relação ao equacionamento proposto por Kwon devem ser consultadas as referências (AHN, J. H. et al., 2000) e (AHN, J.; KWON, D, 2001). O contato real entre o indentador e a amostra é determinado considerando tanto a deflexão elástica quanto o enpilhamento (*pile-up*) ou afundamento (*sink-in*) na região da indentação.

A resposta do material durante a indentação esférica pode ser dividida em três

regimes: elástico, elástico-plástico, e totalmente plástico (FIELD; SWAIN, 1995; FRANCIS, 1976; TABOR, 1951), como ilustrado na Figura 2.7. À medida que o indentador esférico penetra na amostra, a deformação média sob o indentador aumenta, assim como a pressão média de contato. Este aumento torna possível a obtenção das propriedades de tração do material através do ensaio de indentação esférica instrumentada.

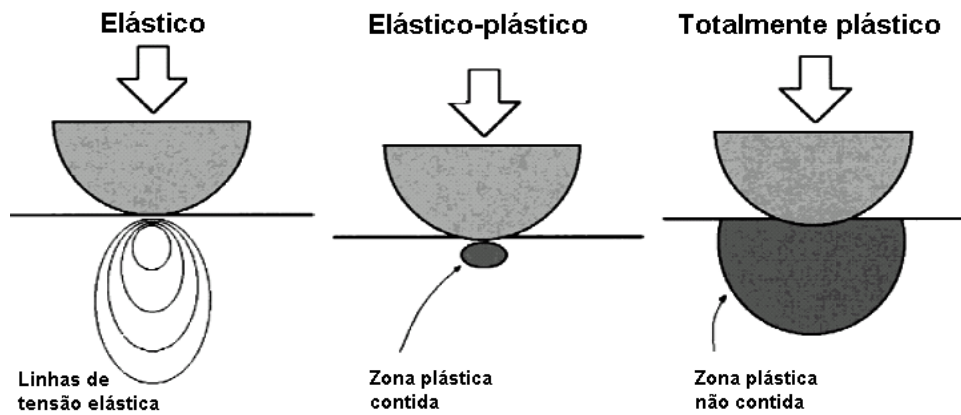


Figura 2.7 – Representação esquemática da expansão da zona plástica durante a indentação esférica (AHN, J.; KWON, D, 2001).

Análise da curva carga-profundidade de indentação

A profundidade de contato h_c entre o indentador e o material num dado carregamento tem sido obtida através do cálculo da deflexão elástica h_d a partir da curva de descarregamento (DOERNER; NIX, 1986; OLIVER; PHARR, 1992), equação (2.17).

$$h_C^* = h_{\max} - h_d \quad (2.17)$$

Onde: $h_{\max}$ é a profundidade máxima de indentação, h_d é a profundidade da deflexão elástica e o sobrescrito (*) significa que os efeitos da deflexão ou empilhamento não estão incluídos.

Porém, a equação acima não considera o empilhamento, devendo ser modificada para (equação (2.18)):

$$h_C = h_{\max} - h_d + h_{p/s} \quad (2.18)$$

Onde: $h_{p/s}$ representa a mudança da profundidade de contato devido à deflexão ou empilhamento.

A curva de carga *versus* profundidade é mostrada esquematicamente na Figura 2.8. Nesta curva, h_d é calculado analisando-se a curva de descarregamento, onde o declive inicial S é a rigidez. Extrapolando esta tangente até a linha de carga nula encontra-se h_i .

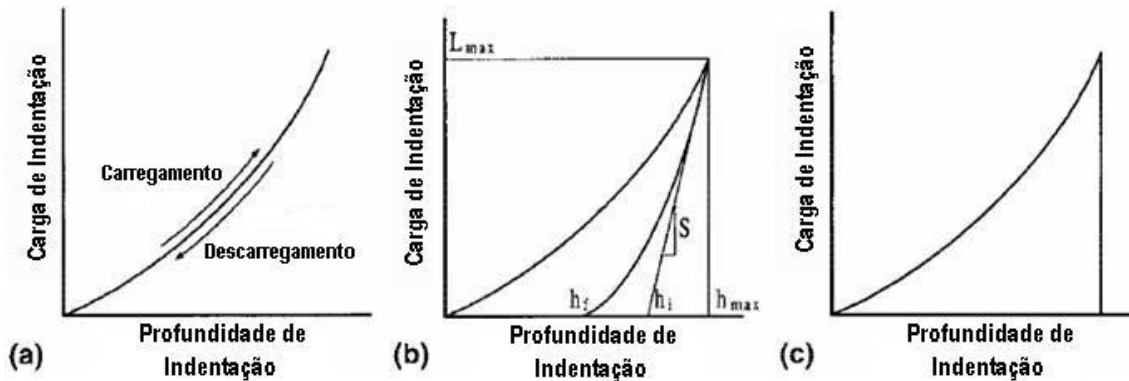


Figura 2.8 – Curvas de carregamento versus profundidade de indentação para diferentes respostas do material (a) elástica, (b) elástica-plástica, (c) plástica, assumindo um penetrador Vickers (OLIVER; PHARR, 1992).

Se não houver mudanças na área de contato durante o descarregamento, h_d será $h_{max} - h_i$ (DOERNER; NIX, 1986). Considerando a geometria do indentador (OLIVER; PHARR, 1992), tem-se:

$$h_d = \omega (h_{max} - h_i) \quad (2.19)$$

Esta relação foi derivada da análise de Sneddon (1965) para um indentador rígido, e ω é uma constante que depende da geometria do indentador: 1 para indentador plano, 0,72 para indentador cônico.

O comportamento da deflexão ou empilhamento ao redor da indentação altera a área de contato real (HILL et al., 1989; MATTHEWS, 1980; TALJAT et al., 1998). Se houver empilhamento, a área de contato será maior do que a esperada, e se houver deflexão, a área de contato será menor.

O tamanho deste empilhamento/deflexão é determinado por uma constante adimensional c para metais com baixo limite de escoamento (HILL et al., 1989):

$$c^2 = \frac{a^2}{a^{*2}} = \frac{5(2-n)}{2(4+n)} \quad (2.20)$$

Onde: a é o raio de contato, a^* é o raio de contato desconsiderando empilhamento/deflexão, e n é o expoente de encruamento da amostra.

Esta equação é baseada na teoria de elasticidade não linear. Ela mostra que o fator de influência dominante na forma e no tamanho da zona plástica durante a indentação dos metais é relacionado às características de encruamento.

Se a zona plástica abaixo do penetrador for grande para um n pequeno, a zona elástica ao redor não consegue acomodar a mudança de volume causada pela penetração do indentador, então ocorre o empilhamento.

Utilizando a relação geométrica $a^{*2} = 2Rh_c^* - h_c^{*2}$ para indentações esféricas, a equação abaixo pode ser estabelecida para a determinação da área real de contato entre o indentador e a amostra através da curva carga *versus* profundidade:

$$a^2 = \frac{5(2-n)}{2(4+n)}(2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (2.21)$$

Onde: R representa o raio do indentador. A equação (2.21) mostra que para determinar o raio de contato real através da curva de indentação é necessário predizer um valor para n ou para qualquer outro valor relacionado ao empilhamento/deflexão.

Obtenção da curva tensão verdadeira-deformação verdadeira

A distribuição da deformação sob o indentador pode ser calculada utilizando o deslocamento na direção da profundidade u_z :

$$u_z = h - \left(R - \sqrt{R^2 - r^2} \right) \quad (2.22)$$

Diferenciando, tem-se:

$$\varepsilon_{zr} = \frac{\partial u_z}{\partial r} = - \frac{1}{\sqrt{1 - (r/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2.23)$$

Esta distribuição de deformações é uma primeira aproximação, pois a distribuição de pressão para deformação elástica-plástica de materiais encruáveis desvia-se significativamente da Hertziana (HILL et al., 1989). ε_R pode ser então definido considerando $r = a$ e multiplicando por uma constante α .

$$\varepsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R} = \alpha \cdot \text{tg} \gamma \quad (2.24)$$

Onde: $\text{tg} \gamma$ é a deformação de cisalhamento na borda de contato e é esperado que a seja uma constante que independe do material. Ela é determinada empiricamente para trazer uma correlação entre ε_R e σ_R .

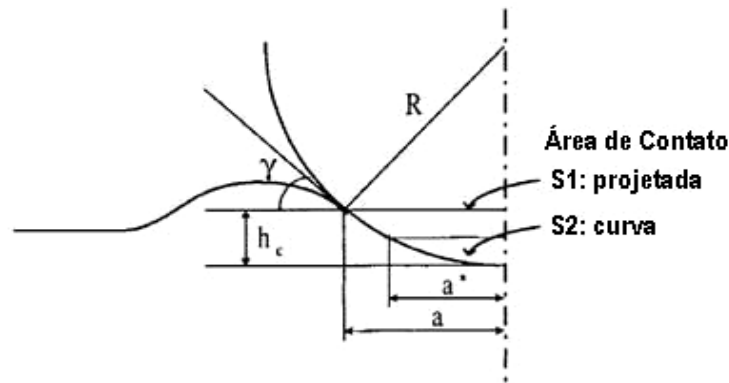


Figura 2.9 – Representação esquemática do empilhamento plástico (AHN, J.; KWON, D, 2001).

A tensão σ_R pode ser obtida através da pressão de contato P_m , obtida pela equação (2.25) em função da carga máxima (L_{max}) e da área de contato através da relação apresentada na equação (2.26). No regime elástico, o valor da razão P_m/σ_R aumenta linearmente até aproximadamente 1,1. Ele aumenta gradualmente no regime elástico-plástico e é quase constante no regime totalmente plástico (FRANCIS, 1976; TABOR, 1951).

$$P_m = \frac{L_{max}}{\pi a^2} \quad (2.25)$$

$$P_m / \sigma_R = \psi \quad (2.26)$$

É esperado que esta razão tenha alguma relação com a expansão da zona plástica; ou seja, os valores de deformação de escoamento e expoente de encruamento. O máximo valor de ψ é aproximadamente 3 para a deformação totalmente plástica, Johnson (1985).

Antes do teste de macroindentação instrumentada já são conhecidos os parâmetros R (raio do indentador) e os módulos de elasticidade do indentador e do material.

A profundidade de indentação (h_{max}) é medida por um sensor de deslocamento e a carga de indentação (F) por uma célula de carga.

A partir da equação (2.19) é encontrado o valor de h_d , que corresponde à profundidade de indentação relacionada à deflexão elástica. h_i é calculado através da curva de descarregamento, conforme mencionado anteriormente.

Inserindo o valor de α^{*2} na Eq. (2.20) e assumindo um valor inicial para o expoente de encruamento é obtido o valor do raio de contato a que é utilizado para calcular a tensão e deformação real nas equações (2.24) e (2.26)

Posteriormente o valor de n é modificado utilizando-se a equação de Hollomon

(1945), dada por:

$$\sigma_R = K \varepsilon_R^n \quad (2.27)$$

De tal forma que $\varepsilon_R < n$, até que o n inicial seja igual ao n final.

O valor ajustado de n é novamente inserido na equação de Hollomon e é calculado o valor do coeficiente de resistência K através de regressão logarítmica.

Considerando o valor de $\varepsilon_R = 0,002$ na mesma equação é obtido o valor do limite de escoamento.

O limite de ruptura é calculado a partir da Eq. (2.28)

$$\sigma_{UTS} = K n^n \quad (2.28)$$

E finalmente a curva tensão *versus* deformação é ajustada com as constantes α e ψ .

As principais características desses métodos são sumarizadas na Tabela 2.3, apresentada a seguir.

Tabela 2.3 – Comparação entre os modelos de Haggag e Kwon modificado de (KANIA, R et al., 2003).

Item	Haggag	Kwon
Efeitos de pile-up/sink-in	Não considerado	Analisado quantitativamente
Definição de deformação	$\varepsilon_R = 0.2dp / D$ onde dp é o diâmetro da deformação plástica calculado pela equação (2.6) e D é o diâmetro do indentador.	$\varepsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R}$ onde α é uma constante, a e R estão representados na Figura 2.6.
Análise da curva de descarregamento	Supõe curva de descarregamento linear	Supões curva segundo lei de potência
Procedimento de análise	Requer a entrada de parâmetros: δ , α_m , β_m e m .	Utiliza relação de Hollomon; não necessita de entrada de parâmetros empíricos dependentes do material ensaiado.

2.3. Equipamentos comerciais para a macroindentação *in situ*

Atualmente as duas únicas empresas que fornecem, comercialmente, equipamentos desenvolvidos especificamente para realização de macroindentação *in situ* para obtenção de propriedades mecânicas são a empresa norte americana Advanced Technology Corporation e a coreana Frontics Inc.

SSM-M1000TM, SSM-B4000TM - ATC

Estes equipamentos foram desenvolvidos utilizando-se o modelo proposto por Haggag, descrito anteriormente. O SSM-M1000TM é um modelo em tamanho reduzido (portátil) para realização de testes a temperatura ambiente em estruturas metálicas localizadas em campo. O sistema é energizado através de um pacote portátil de baterias.

Este equipamento realiza testes não destrutivos e os resultados são obtidos imediatamente após o teste. A força de indentação máxima é de 4,5 kN. Para dutos e vasos de pressão, são utilizadas bases magnéticas elétricas para montar o equipamento sobre a superfície. Um computador portátil, juntamente com o sistema de *software*, é o responsável pelo controle completo do equipamento.

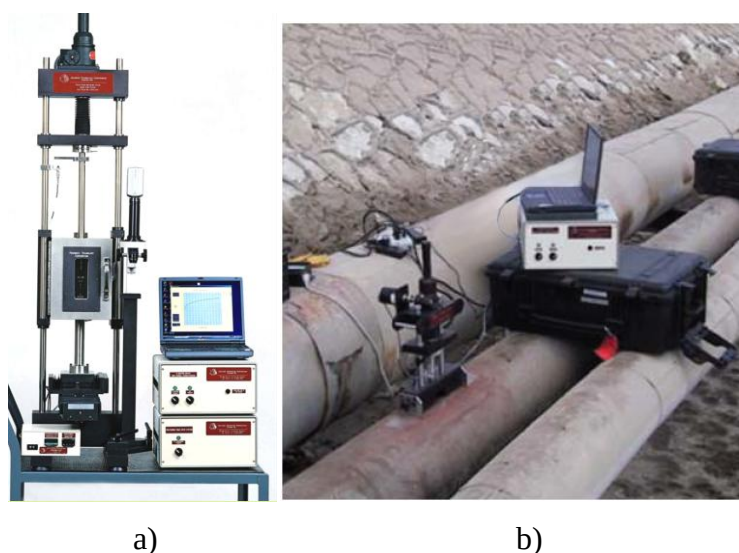


Figura 2.10: a) SSM-B4000TM - Equipamento com configuração para ensaios em laboratório, utilizando uma câmara de aquecimento, uma mesa posicionadora X-Y, câmera de vídeo e monitor. b) SSM-M1000TM – Modelo portátil para ensaios em campo (ATC, 2010).

Além do modelo apresentado acima, a empresa também possui o modelo SSM-B4000TM específico para ensaios em laboratório, bastante similar ao M1000, ele é capaz de trabalhar com cargas de até 17,8 kN, como acessórios, ele possui uma mesa posicionadora X-

Y, câmera de vídeo e monitor, e utilizando uma câmara de aquecimento este equipamento pode realizar testes em amostras a temperaturas entre -157° a $+427^{\circ}\text{C}$. A Figura 2.10, apresenta estes equipamentos.

O *software* utilizado para a realização dos testes é comum a ambos os modelos de equipamento. Além desse *software*, outro programa é fornecido para posicionamento do indentador para testes em amostras.

O pacote de *software* fornecido pela ATC para a realização dos ensaios foi desenvolvido utilizando a linguagem gráfica LabView[®] e possui as seguintes características:

- controle do sistema de indentação, que opera em malha fechada tanto para carga quanto para deslocamento,
- verifica se as grandezas de deslocamento máximo e carga máxima não ultrapassam os limites de operação, de modo a prevenir a danificação dos sensores (célula de carga, transdutor de deslocamento), da amostra ou da estrutura de teste e do indentador,
- controle completo das movimentações do motor e descarregamento total no final do teste,
- taxa máxima de aquisição de dados de 500 amostras por segundo,
- *display* gráfico, atualizado em tempo real, dos sinais de carga e deslocamento durante o teste,
- arquivos de resultados do ensaio podem ser impressos ou armazenados no computador.

O módulo de indentação esférica automatizada realiza testes com um ou mais ciclos de indentação, e determina:

- o limite de escoamento,
- os pares de dados tensão verdadeira e deformação verdadeira até 20% de deformação,
- o ajuste das propriedades de escoamento à função de potência, de modo a calcular o expoente de encruamento e o coeficiente de resistência,
- uma estimativa do limite de resistência a partir do ajuste dos resultados à uma função de potência,
- a dureza Brinell para o tamanho de esfera utilizado.

AIS2100 e AIS3000 – Frontics

Estes equipamentos utilizam o modelo de Kwon, descrito anteriormente, são sistemas portáteis para indentação *in situ*, com avaliação não-destrutiva das propriedades de tração e de dureza. Os equipamentos obtêm continuamente os dados de carga e deslocamento. A curva carga *versus* profundidade de indentação pode ser convertida em várias propriedades de tração como curva de escoamento, limite de escoamento, limite de resistência, expoente de encruamento, coeficiente de resistência e dureza Vickers, Rockwell e Brinell. Os procedimentos necessários para obtenção destes dados são realizados por um *software* dedicado instalado no computador. Os equipamentos podem ser vistos na Figura 2.11.

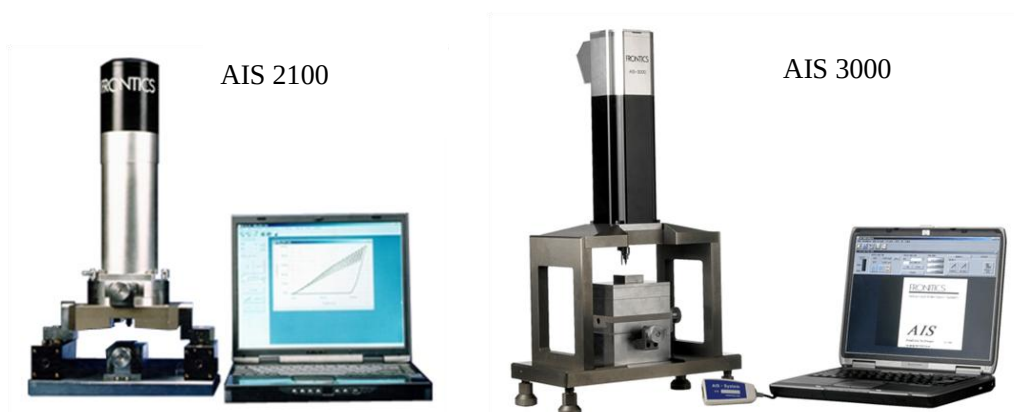


Figura 2.11: Equipamentos para macroindentação da empresa Frontics, à esquerda o AIS2100, à direita o AIS300 (Frontics, 2010).

Dentre as vantagens destes equipamentos podemos citar a não necessidade de entrada de dados relativos ao material (constantes empíricas utilizadas pelo método de Haggag) para que seja realizado o ensaio e a existência de vários sistemas de fixação para teste *in situ* de materiais em operação.

O *hardware* principal dos equipamentos possui as seguintes características:

• Modelo:	AIS2100	/	AIS3000
• Tamanho (peso):	180x180x430 mm (14kg)	/	180x180x430 mm (14kg)
• Carga Máxima:	300 kgf	/	300 kgf
• Resol. (Carga / Prof.):	100 gf / 0,2 um	/	5,6 gf / 0,1 um
• Deslocamento total:	40 mm	/	40 mm
• Taxa de carregamento:	0,05~30 mm/min	/	0,05~60 mm/min
• Comunicação:	RS-422	/	RS422/ módulo <i>wireless</i>
• Taxa de aquisição de dados:	30/seg	/	100/seg

Além disso, o *hardware* destes equipamentos possui controles de velocidade, carga e profundidade. Utiliza ainda um LVDT para medição de posição e permite vários tipos de indentadores (mini esfera, Rockwell, Vickers), em uma única peça, e esferas de vários diâmetros (0,5 a 1 mm).

As características principais do *software* de operação do equipamento são:

- condições de testes ajustáveis;
- sobreposição de curvas para comparação;
- avaliação de vários tipos de dureza: Brinell, Rockwell e Vickers.

As propriedades medidas pelo software são:

• Modelo:	AIS2100	/	AIS3000
• Propriedades de tração:	Sim	/	Sim
• Tensão Residual:	N/A	/	Sim
• Dureza:	(opcional)	/	(opcional)
• Tenacidade à fratura:	(opcional)	/	(opcional)

2.4. Conclusão

Este capítulo apresentou o estado da arte da metodologia para obtenção das propriedades mecânicas por meio da indentação instrumentada, as técnicas e equipamentos utilizados. Pode-se concluir das informações apresentadas que os métodos de cálculo discutidos possuem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas quando da obtenção das propriedades mecânicas.

Para o método proposto por Kwon uma das vantagens é que não existe a necessidade de utilização de constantes empíricas, relacionadas ao tipo de material que está sendo ensaiado, as constantes necessárias neste método estão associadas ao equipamento utilizado e uma vez determinadas não precisam ser alteradas, independente do material ensaiado ao contrário do método de Haggag, no qual, existe a necessidade de determinação destas constantes antes do ensaio, exigindo que o operador conheça ou pelo menos tenha idéia de qual material está sendo analisado. O método de cálculo proposto por Kwon foi normatizado pela norma ISO/TR 29381:2008.

O método proposto por Haggag, embora ainda não tenha uma norma específica, apresenta resultados muito bons, segundo a literatura, e tem sido utilizado por várias empresas para a determinação das propriedades mecânicas (ATC, 2010).

Com relação aos equipamentos existentes, não se pode, a priori, definir qual é o melhor, seja o da ATC ou da Frontics, uma vez que ambos apresentam vantagens e desvantagens inerentes aos métodos de obtenção das propriedades mecânicas utilizados.

Para aproveitar o melhor de ambos foi desenvolvido pela equipe do Biolab e do LTAD um equipamento que apresenta características semelhantes à dos equipamentos citados e que implementa os dois métodos de cálculo apresentados.

O próximo capítulo apresenta conceitos fundamentais relacionados a Sistemas de medição, controle e transmissão de dados importantes para os desenvolvimentos em tela.

Capítulo 3.

Sistemas de medição, processamento e transmissão de dados.

3.1. Introdução

A área de instrumentação e controle teve um grande desenvolvimento nos últimos anos e atualmente os sistemas de medição e controle automáticos estão presentes em quase todas as máquinas e equipamentos utilizados pelo Homem, inclusive na vida doméstica. Este desenvolvimento somente foi possível graças à utilização de sistemas digitais para o controle e o tratamento dos dados medidos. Entender os conceitos fundamentais relacionados a sistemas de medição, controle e transmissão de dados é de fundamental importância para o correto dimensionamento e seleção dos componentes do sistema. Este capítulo pretende apresentar alguns conceitos básicos necessários para o entendimento deste trabalho.

3.2. Sistemas de medição e atuação

A função de um sistema de medição é o de atribuir um valor numérico a uma propriedade ou qualidade de um objeto ou evento de forma a possibilitar sua quantificação. Dentro deste contexto, um sistema de medição pode ser visto como tendo dois objetivos principais:

- Monitoração de processos (ex. medição da temperatura do corpo humano).
- Controle de processos em malha fechada (ex. controle da temperatura no interior da geladeira).

Podemos notar que o controle, ao contrário da monitoração de processos, não envolve somente um sistema responsável pela quantificação de uma determinada propriedade, mas também um sistema de atuação responsável pela alteração de um parâmetro qualquer do processo em questão. A Figura 3.1 ilustra, de forma genérica, os sistemas de medição e

atuação, dentro do conceito de controle automático, que podem estar associados a um processo.

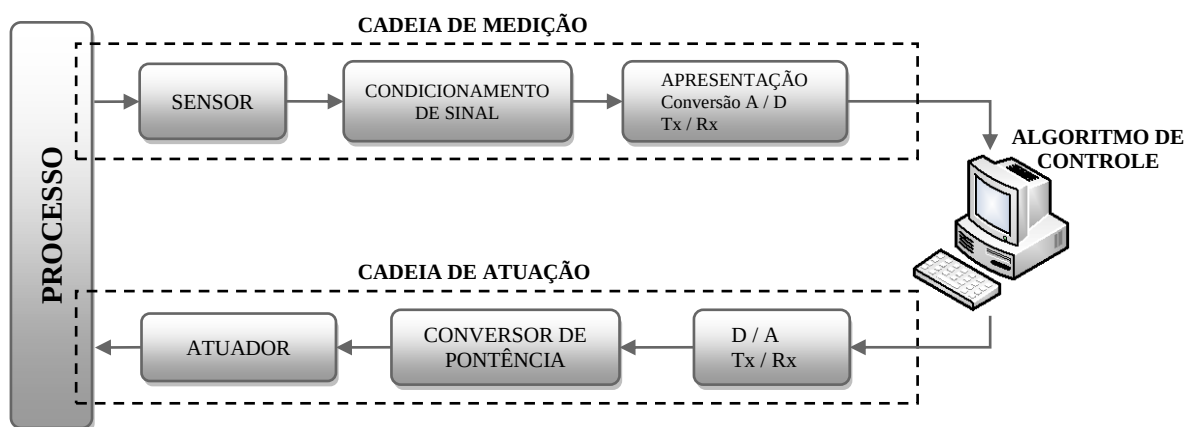


Figura 3.1 - Cadeia de medição e atuação

Sensores

Quando pensamos em medição, naturalmente pensamos no registro de algum fenômeno físico, que, na maioria das vezes, não pode ser coletado diretamente, sendo necessário algum tipo de dispositivo que permita o tratamento deste.

De maneira geral, um sensor é, basicamente, um dispositivo que altera suas características sob a ação de uma grandeza física (efetivamente, a variável de interesse), convertendo, direta ou indiretamente, suas variações em sinais que possam ser medidos, geralmente elétricos. Os sensores de operação indireta alteram suas propriedades, como a resistência, a capacitância ou a indutância, sob ação de uma grandeza, de forma mais ou menos proporcional (PALLAÁS-ARENY; WEBSTER, 2001).

Um transdutor tem um sentido ligeiramente diferente de sensor, ele é basicamente um conversor de um tipo de energia em outro, independente de para qual tipo de energia foi transformado, no entanto é comum percebermos na literatura o uso indiscriminado dos termos sensor e transdutor.

No decorrer do presente texto, um sensor será definido como sendo um dispositivo que, quando submetido à ação de uma quantidade física, não necessariamente elétrica, apresenta uma característica de natureza elétrica na saída (ex. tensão, corrente ou impedância).

Ao se trabalhar com sensores, é importante analisar os seguintes parâmetros (OLIVEIRA; INMETRO, 2008):

- **Linearidade:** É o grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física.
- **Exatidão:** o quanto a medição se aproxima do valor real.
- **Precisão:** dispersão das respostas quando submetido ao mesmo estímulo, sobre condições idênticas, independentemente do erro entre o valor medido e o real (Repetitividade).
- **Resolução:** representa a menor grandeza que o sensor pode determinar
- **Faixa de Operação:** uma expressão da extensão total dos possíveis valores de medição.
- **Sensibilidade:** relação entre a variação da saída do sensor e a variação correspondente da grandeza a medir.
- **Histerese:** diferença entre os sinais de saídas de um sensor para determinado sinal de entrada, quando este é obtido medindo-se a grandeza de forma crescente e decrescente.

Os sensores podem ser ativos ou passivos.

- **Sensor ativo:** É um sensor que requer uma fonte externa de excitação, como os LVDTs e as Células de carga.
- **Sensor passivo:** É um sensor que não requer uma fonte de excitação, como os termopares ou fotodiodos.

Para um sensor funcionar como agente de medida é fundamental a existência de um modelo, curva ou tabela de calibração que permita fazer uma correspondência biunívoca entre os sinais de entrada e saída. Este modelo pode ser uma função que relacione o sinal de entrada com o de saída, de forma que para toda entrada $a \neq b$ se tenha uma saída $f(a) \neq f(b)$ (SALGADO; BOAVENTURA, 1996).

Condicionamento de Sinais

Os sinais provenientes dos sensores, geralmente, não podem ser utilizados diretamente pelo estágio seguinte da cadeia de medição (processamento, transmissão ou apresentação do valor medido), por possuírem, por exemplo, amplitude muito baixa, interferências, ou não-linearidades, por isso para serem utilizados eles precisam passar por uma etapa de condicionamento de sinais que irá adequar este sinal de forma que ele possa ser utilizado pelo estágio seguinte.

Os condicionadores de sinais são dispositivos que adaptam o sinal proveniente dos

sensores de forma a torná-los úteis para o estágio seguinte da cadeia de medição, são compostos na maioria dos casos, por amplificadores, processadores e filtros analógicos, assim sendo o circuito de condicionamento de sinal executa normalmente uma ou mais das seguintes operações (REGTIEN, 2005):

- **Conversão de sinal:** converte um tipo de sinal em outro, ex. impedância/frequência, impedância/tensão, tensão/frequência, frequência/tensão, RMS/DC, etc.
- **Manipulações aritméticas e não-lineares:** linearização ou compensação de grandezas de influência, ex. multiplicação/divisão de um sinal por outro, conversão logaritma, etc.
- **Filtragem:** eliminação de sinais interferentes, ex. eliminação da f.e.m. induzida pelos 60Hz da rede elétrica, filtragem anti-aliasing eliminando ruídos de alta frequência que possam atrapalhar a reconstrução do sinal digitalmente amostrado.
- **Amplificação:** alteração da amplitude do sinal, ex. Amp. Operacional, Amp. Instrumentação, Amp. Isolador.

Conversão Analógico/Digital (A/D)

Os sinais provenientes dos condicionadores são sinais analógicos, e para que estes sinais possam ser utilizados pelos processadores digitais de sinais é necessário que eles passem por um processo de digitalização, que consiste basicamente na obtenção de amostras destes sinais de tempos em tempos, atribuindo a elas um valor pré-definido que represente sua amplitude, este processo de quantização do sinal no tempo (amostragem) e na amplitude (digitalização) é chamado de conversão analógico/digital. A Figura 3.2 apresenta o esboço de um sinal após o processo de digitalização.

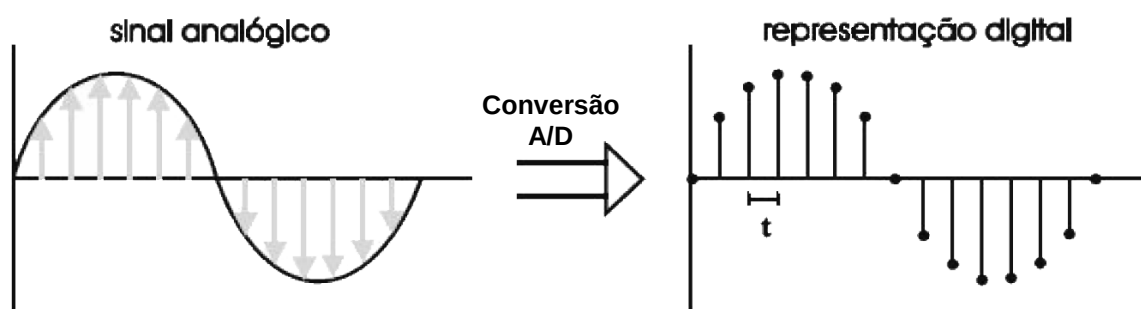


Figura 3.2 – Representação esquemática do processo de digitalização de um sinal.

O dispositivo responsável por este processo é o conversor analógico-digital (A/D). Sua função é transformar cada amostra do sinal em um valor numérico definido pela sua precisão e resolução, este valor é representado pelo número n de bits do conversor, quanto mais bits mais níveis de quantização terá o conversor, conseqüentemente maior será sua resolução para um mesmo fundo de escala. Deve-se salientar que, independente do número de bits do conversor, sempre haverá um erro de quantização inerente, devido a aproximação do valor analógico para um valor digital.

Outro fator importante é a taxa de amostragem $1/t$, onde t é o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas, que determina se o sinal poderá ser reconstruído posteriormente. Segundo o teorema de Nyquist para que o sinal possa ser reconstruído corretamente a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a maior freqüência presente no espectro deste sinal. Se o sinal é sub-amostrado ocorre a superposição dos espectros do sinal durante sua reconstrução, o que é conhecido como *aliasing*, por isso a importância de se utilizar um filtro *anti-aliasing* antes da amostragem, eliminando as altas freqüências que não são de interesse para a análise do sinal. Os valores amostrados no tempo são então quantificados em amplitude e codificados em uma seqüência de bits.

Para a determinação e escolha de qual conversor A/D é mais adequado a determinada aplicação, é preciso conhecer os parâmetros deste conversor, como por exemplo, sua máxima taxa de amostragem, método de conversão utilizado (Conversão Direta ou Flash, Aproximações Sucessivas, Delta-Sigma), desvio de linearidade, e quais suas influências no tempo e na qualidade da conversão. Maiores informações sobre conversores A/D podem ser encontradas em (ANALOG DEVICES, 2005).

Sistemas de Atuação

Um atuador é um dispositivo conversor de energia que geralmente, converte energia elétrica em um tipo de energia não elétrica, de maneira que esta energia possa alterar a grandeza física que está sendo controlada.

Um dispositivo mecânico que utiliza energia, pneumática, elétrica, ou hidráulica, e a converte em algum tipo de movimento, também pode ser considerado um atuador. Ele também pode ser usado para aplicar uma força.

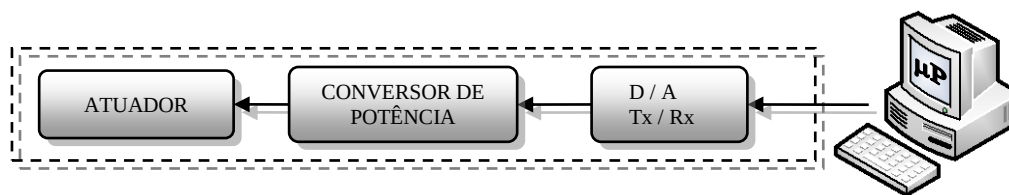


Figura 3.3 – Exemplo de uma cadeia de atuação

Na seqüência de atuação, mostrada na Figura 3.3, um microprocessador é responsável por tomar as decisões de controle, ele envia ordens de comando, sob a forma de um sinal digital, ao atuador. Este sinal é enviado ao conversor de potência cujo papel consiste na adaptação da potência do sinal de comando num sinal de potência adequada ao funcionamento do atuador. Finalmente o atuador efetua a conversão da potência elétrica na grandeza física de controle.

3.3. Sistemas computacionais embarcados e Processadores Digitais de Sinais (DSP)

Os sistemas embarcados, de uma forma geral, são sistemas computacionais especializados projetados para realizar uma tarefa específica, ao contrário dos computadores pessoais que são projetados para serem dispositivos de uso geral (HEATH, 2003).

Por se tratarem de sistemas computacionais, os sistemas embarcados necessitam de uma unidade de processamento, responsável pelas operações lógicas ou de tomada de decisão e aritméticas, por isso é importante conhecer as diferenças e aplicações de cada tipo. Dentre os principais tipos de unidades de processamento existentes, podemos destacar os Microprocessadores, os Microcontroladores, os Processadores Digitais de Sinais.

Microprocessadores

São circuitos integrados capazes de realizar operações lógicas e aritméticas, através da execução de instruções pré-definidas. O Microprocessador não possui em sua estrutura, dispositivos como memória, unidades de entrada e saída, periféricos, portanto, para seu funcionamento ele necessita que estes dispositivos sejam ligados externamente aos seus barramentos de comunicação. Por necessitarem de dispositivos externos, o hardware mínimo para o funcionamento do circuito se torna mais complexo e dispendioso. São utilizados principalmente nos computadores pessoais e em sistemas de alta complexidade, que necessitam de executar várias funções, que na maioria das vezes não estão correlacionadas.

Microcontrolador

Um microcontrolador é um pequeno sistema computacional em um único circuito integrado (CI), contendo no mesmo chip um núcleo de processamento (CPU), memória e periféricos de entrada e saída programáveis (conversores A/D, porta serial, contadores, etc.). São utilizados em dispositivos e produtos com controle automático, controles remotos, eletrodomésticos, brinquedos, etc.

Pela redução do tamanho e do custo, comparado aos projetos que utilizam processador, memória e dispositivos de E/S separados, o microcontrolador permite que cada vez mais dispositivos sejam controlados digitalmente. A Figura 3.4 mostra uma representação esquemática da diferença entre microprocessador e microcontrolador.

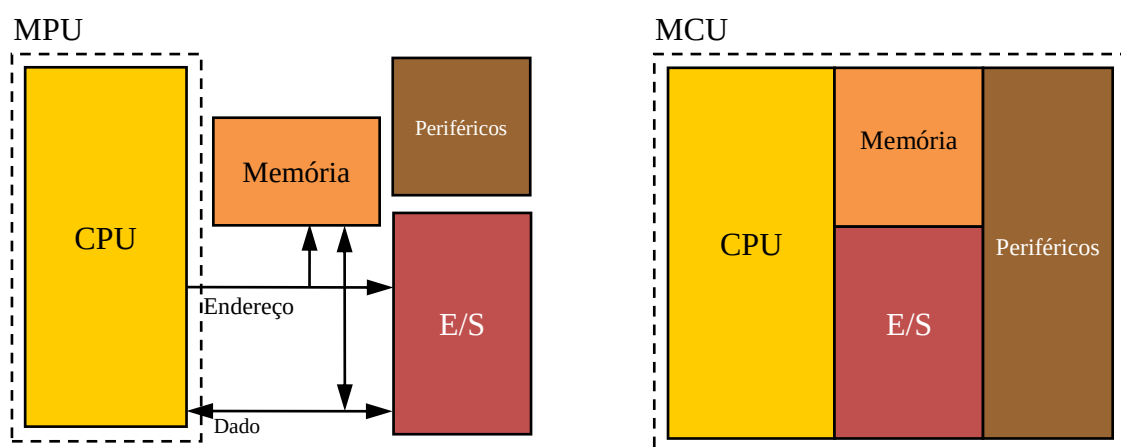


Figura 3.4 - Diferença entre microcontrolador e microprocessador. Microprocessadores (MPU): CPUs que se conectam a memória e periféricos externos. Microcontroladores (MCU): tem CPU memória, E/S e periféricos integrados no mesmo chip (*on-chip*)

Processador digital de sinais

O processador digital de sinais, comumente conhecido como DSP, é um processador especialmente projetado para aplicações que exigem processamentos digitais de sinais, ou alta velocidade de processamento. O processamento digital consiste em manipular sinais do mundo real (representado por uma sequência de números) usando ferramentas matemáticas.

A sigla *DSP* na verdade pode ser utilizada para representar o Processamento Digital de Sinais (*Digital Signal Processing*) ou Processador de sinais digitais (*Digital Signal Processor*), porem é mais comumente utilizada ao tratar-se do processador de sinais em si e não do ato de processar um sinal.

Os *DSPs* são microprocessadores programáveis, com características próprias, projetados para operarem em tempo real, com velocidades muito superiores aos

microprocessadores para aplicações genéricas. São, basicamente, um tipo de microprocessador otimizado para efetuar processamento matemático, enquanto os demais processadores são otimizados para manipulação e gerenciamento de dados. A capacidade de processar grandes quantidades de números em pouco tempo é uma das principais vantagens dos Processadores Digitais de Sinais (BRAGA, 2000; NEKOGAR; MORIARTY, 1998).

Os *DSPs* foram projetados considerando as operações mais comuns em um processamento digital, como, multiplicação e transferência de dados em memória.

A capacidade que os *DSPs* têm de repetir em extrema velocidade uma instrução complexa faz com que operações como, por exemplo, as Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) sejam resolvidas rapidamente, permitindo a implementação de filtros digitais. Além disso, a capacidade de processamento em tempo real dos *DSPs* torna este processador perfeito para aplicações onde o atraso no tempo de resposta não é tolerável.

Dependendo de como os dados são manipulados e armazenados internamente nos *DSPs*, eles podem ser classificados em processadores de ponto fixo ou flutuante.

Os processadores de ponto flutuante apresentam internamente, em hardware, unidades capazes de manipular, diretamente, dados na forma fracionária (mantissa e expoente). Estes processadores fazem a representação do número de maneira automática buscando a representação completa da mantissa, e ajustando o valor do expoente adequadamente. Os processadores de ponto fixo reservam um espaço da palavra de dados para a parte inteira e outro para a parte fracionária. Por exemplo, em uma palavra de 16 bits pode-se reservar 5 bits para a parte inteira, 10 bits para a parte fracionária e um bit para o sinal, essa operação eventualmente leva a um erro de aproximação maior, além de aumentar a complexidade da programação, quando comparado ao processador de ponto flutuante (Berkeley Design Technology Inc., 2006).

3.4. Tecnologias de Transmissão de dados Sem-fio em sistemas de medição

Dentre as principais tecnologias de transmissão de dados sem-fio utilizadas atualmente para monitoração e controle de dispositivos remotamente, podemos destacar: Bluetooth, Zigbee e Wi-fi. Estas tecnologias já estão consolidadas no mercado e são bastante utilizadas pela indústria. Elas operam na faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que compreende três segmentos do espectro: 902 MHz a 928 MHz, 2.400 MHz a 2.483,5 MHz e 5.725 MHz a 5.850 MHz. Os equipamentos que funcionam na banda ISM não dependem de licenças para

operação, mas compartilham a mesma faixa de frequências com outros dispositivos de comunicação, que podem gerar interferência entre si.

3.4.1. Wi-Fi (IEEE 802.11x)

Wi-Fi, segundo a *Wi-Fi Alliance*, é qualquer produto que implemente uma WLAN ("wireless local area network") baseada no padrão IEEE 802.11. O padrão Wi-Fi abrange uma série de sistemas de comunicação local (LANs), com funcionamento na faixa de 2.4GHz e/ou 5GHz (WI-FI ALLIANCE, 2009).

O sistema funciona de maneira similar a uma rede celular (Figura 3.5), onde os elementos componentes (dispositivos), também chamados de STA (do inglês "station"), se conectem a aparelhos que fornecem o acesso, denominados genericamente de *Access Point* (AP). Quando um ou mais STAs se conectam a um AP, tem-se, uma rede (equivalente a uma célula no sistema celular) denominada *Basic Service Set* (BSS). Por questões de segurança é importante que cada BSS receba uma identificação denominada *Service Set Identifier* (SSID) que identifica os pacotes gerados por determinada rede.

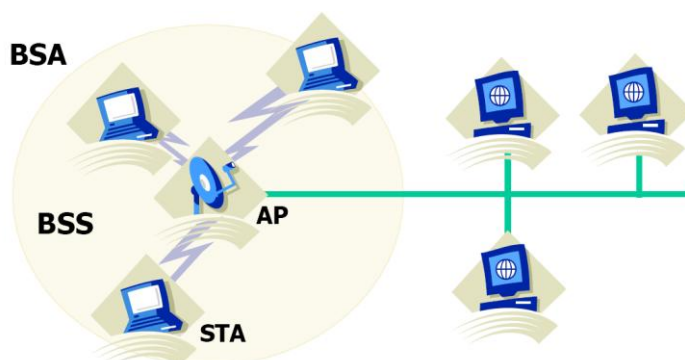


Figura 3.5 – Exemplo de Topologia do 802.11 - Infra-estruturada- Basic Service Set (BSS) – com apenas um Access Point (AP) e uma Basic Service Area (BSA)

Apesar de diversas redes práticas serem formadas por uma única célula (e, portanto, um único ponto de acesso), a maioria das instalações são formadas por várias células conectadas entre si por um sistema de distribuição (*backbone*), seja ele ethernet, fibra ótica, *wireless*, permitindo a interconexão de várias redes formando uma *Extended Service Set* (ESS). A Figura 3.6 mostra um exemplo deste tipo de rede.

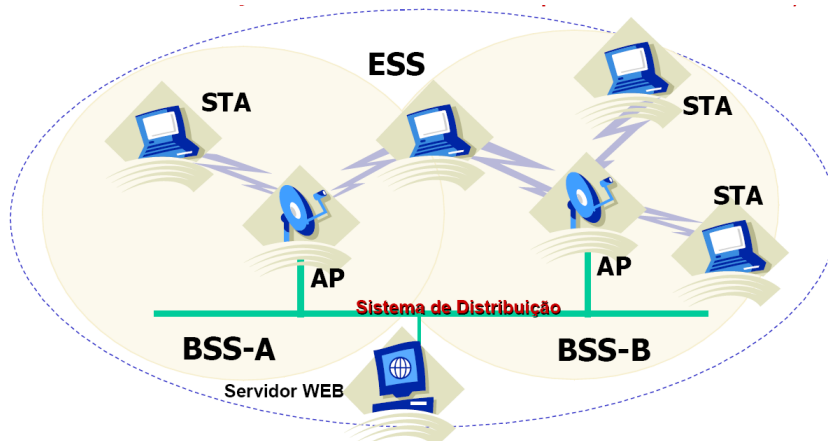


Figura 3.6 - Organização típica de uma rede 802.11, com vários APs.

O Wi-Fi é suportado por diversas aplicações e dispositivos, incluindo consoles de videogames, redes domésticas, PDAs, telefones celulares, sistemas operacionais, e outros tipos de eletrônicos de consumo, sendo utilizado principalmente para compartilhamento de dados e acesso à internet. A tabela sumariza as principais gerações do Wi-Fi, apresentando sua frequência de operação e máxima taxa de transmissão.

Tabela 3.1 - Gerações Wi-Fi

Tecnologias Wi-Fi	Banda de Frequências	Largura de banda
802.11a	5 GHz	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
802.11n	2.4 GHz, 5 GHz, 2.4 or 5 GHz (selectable), or 2.4 and 5 GHz (concurrent)	450 Mbps

3.4.2. Bluetooth

Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fios de curta distância, criada com a intenção de substituir os cabos que conectam dispositivos eletrônicos fixos e portáteis. As principais características deste sistema são robustez, baixo consumo e custo relativamente baixo.

O núcleo do sistema consiste em um transmissor RF, banda-base e uma pilha de protocolos. O sistema oferece serviços que permitem conexão de dispositivos e troca de uma variedade de classes de dados entre os mesmos. A Figura 3.7 mostra um exemplo de utilização de rede Bluetooth.

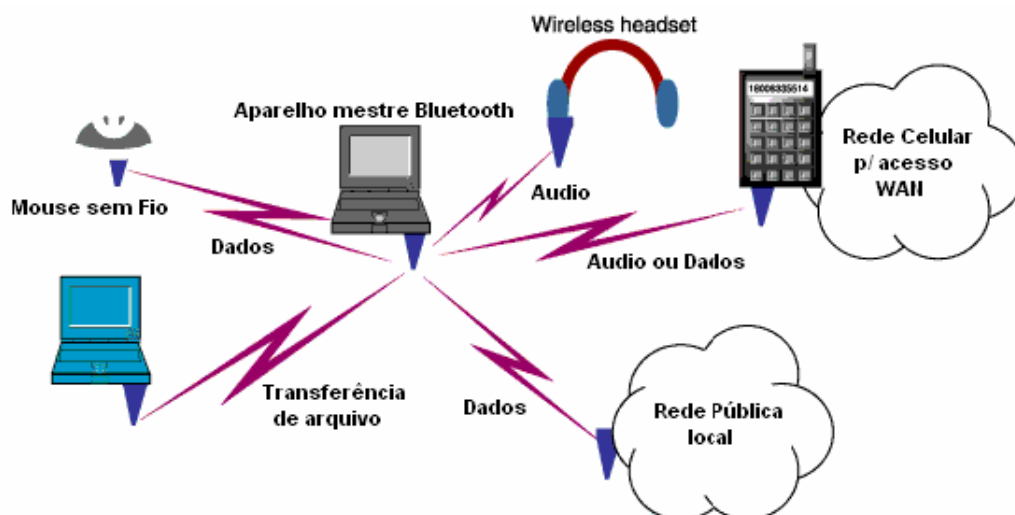


Figura 3.7 - Exemplo de rede Bluetooth. Modificado de (BLUETOOTH SIG, 2009)

O rádio Bluetooth (camada física) opera na frequência livre de 2.4Ghz. As especificações do sistema Bluetooth dividem os dispositivos em classes de operação de acordo com sua potência de transmissão (Tabela 3.2). O sistema emprega um transceptor *frequency hop* (salto de frequência) para minimizar interferências e atenuações. A operação RF utiliza uma modulação de frequência binária para minimizar a complexidade do transceptor e permite taxas de transferência de até 1 Megabit por segundo (Mbps) em modo padrão ou de até 3 Mbps através de um modo denominado *Enhanced Data Rate*. Durante uma operação típica, o canal de rádio é compartilhado por um grupo de dispositivos sincronizados a um relógio comum e um padrão de salto de frequência. Um dispositivo denominado mestre fornece a referência de sincronização, para todos os outros dispositivos, chamados escravos. Um grupo de dispositivos sincronizados deste modo formam uma piconet. Esta é a forma fundamental de comunicação para a tecnologia bluetooth.

Tabela 3.2 - Classes de potência do sistema Bluetooth.

Classe	Potência Máxima Permitida		Alcance (aproximado)
	mW	dBm	
Classe 1	100	20	~100 metros
Classe 2	2.5	4	~10 metros
Classe 3	1	0	~1 metros

Dispositivos em uma piconet usam um padrão de salto de frequência determinado por meio de um algoritmo utilizando certos campos na especificação de endereço e relógio do

mestre, o que permite que apenas estes dispositivos conheçam o padrão de salto da rede. O padrão de salto básico consiste em uma ordenação pseudo-randômica das 79 bandas de frequências contidas no espectro ISM, ele pode ser adaptado para excluir uma porção do espectro utilizado por dispositivos geradores de interferência. Esta técnica de salto adaptativo melhora significativamente a coexistência da tecnologia bluetooth com sistemas ISM estáticos em um mesmo local.

A Tabela 3.3 sumariza as principais características das diversas especificações do sistema Bluetooth e sua data de lançamento. O conhecimento das características de cada especificação é importante para entender quais funcionalidades estão implementadas nos diferentes dispositivos Bluetooth comercializados.

Tabela 3.3 - Principais características das especificações Bluetooth.

Especificação Bluetooth	Data de lançamento	Principais características da versão
1.0	Julho 1999	Versão preliminar do padrão Bluetooth
1.0a	Julho 1999	Primeira versão publicada do padrão Bluetooth.
1.0b	Dez. 1999	Pequenas atualizações para solucionar problemas menores e algumas questões
1.0b + CE	Nov. 2000	Errata crítica adicionada à versão 1.0b do padrão Bluetooth
1.1	Fevereiro 2001	Primeira versão utilizável. Foi utilizada pelo IEEE para o seu padrão IEEE 802.15.1 - 2002.
1.2	Nov. 2003	Esta versão do padrão Bluetooth adicionou novos recursos, incluindo o salto de frequência e o eSCO para o melhor desempenho de voz. Foi lançado pelo IEEE como IEEE 802.15.1 - 2005. Esta foi a última versão emitida pelo IEEE. Taxa de transmissão de dados máxima de 1Mbps, dados brutos.
2.0 + EDR	Nov. 2004	Esta versão do padrão Bluetooth adicionou a taxa de dados aprimorada (EDR - enhanced data rate) para aumentar a taxa de transmissão de dados brutos para 3,0 Mbps.
2.1	Julho 2007	Esta versão do padrão Bluetooth adicionou o <i>secure simple pairing</i> para melhorar a segurança.
3.0 + HS	Abr. 2009	Bluetooth 3 adiciona o IEEE 802.11 como um canal de alta velocidade para aumentar a taxa de dados para aproximadamente 24 Mbps.
4.0	Dez. 2009	O padrão Bluetooth foi atualizado para incluir <i>Bluetooth Low Energy</i> anteriormente conhecido como Wibree

3.4.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)

Zigbee é um padrão tecnológico baseado na especificação IEEE 802.15.4 para WPAN (*Wireless Personal Area Network*) de baixa taxa de dados na faixa ISM. A tecnologia permite aos dispositivos comunicarem entre si com um consumo de energia muito baixo, permitindo aos mesmos funcionarem por vários anos com uma única pilha comum. A taxa de transferência de dados brutos é limitada a 250 kbps na faixa ISM de 2,4GHz, 20kbps na de 868 MHz usada na Europa, e 40 kbps na faixa de 915 MHz usada nos Estados Unidos e Austrália. O padrão oferece atualmente interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10Kbps e 115Kbps, de dados úteis, e com um alcance de transmissão entre 10m e 100m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais.

O padrão ZigBee foi desenvolvido para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções mais complexas para seu controle, visando atender dispositivos que necessitam de um baixo consumo de energia, tamanho reduzido e não precisem de alta taxa de transmissão de dados (ZIGBEE ALLIANCE, 2009), reduzindo assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar. O padrão foi criado por uma organização conhecida como a ZigBee Alliance e é destinado principalmente ao controle e monitoramento remoto para aplicações em redes de sensores.

O padrão ZigBee (IEEE 802.15.4) apresenta dois estados principais de funcionamento: "active" para transmissão e recepção e "sleep", quando não está transmitindo. Em uma rede ZigBee podemos identificar dois tipos de dispositivos, os Full Function Device (FFD), e os Reduced Function Device (RFD) .

Os FFDs são dispositivos de construção mais complexa e podem funcionar em todas as topologias do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede, ou roteador, tendo acesso a todos os outros dispositivos. Os RFDs são dispositivos de construção mais simples limitados a uma configuração com topologia em estrela, não podendo atuar como um coordenador da rede, comunicando-se apenas com um coordenador de rede.

Uma rede ZigBee pode ser configurada de acordo com as seguintes topologias: estrela, agrupamento em árvore e mesh (malha). A topologia em estrela consiste de um ou mais dispositivos finais que se comunicam com apenas um coordenador. Na topologia de agrupamento em árvore, dispositivos finais podem se conectar com o coordenador ou com os

roteadores de protocolo. Por fim, na topologia em malha os FFDs podem se comunicar diretamente com outros FFDs, sem a necessidade de passar por intermediários (roteadores). A Figura 3.8 mostra uma representação das topologias de rede ZigBee.

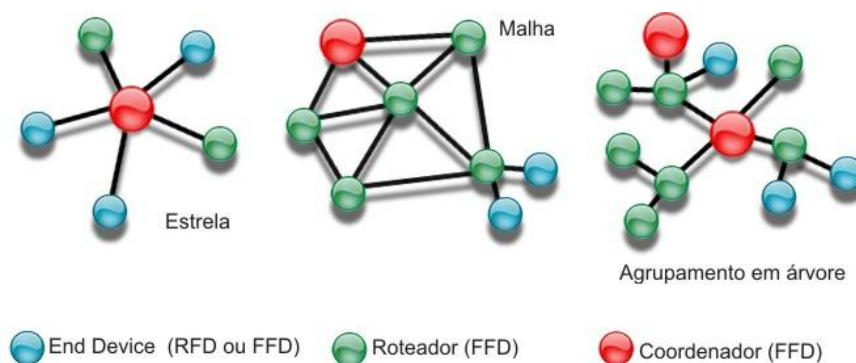


Figura 3.8 - Topologias de rede ZigBee.

Os componentes integrantes da rede são o coordenador, os roteadores e os dispositivos finais ("end devices"). O Coordenador inicia a rede definindo o canal de comunicação usado, gerencia os nós da rede e armazena informações sobre eles. Os Roteadores são responsáveis pelo encaminhamento das mensagens entre os nós da rede. Já um dispositivo final pode ser completo ou apresentar funções reduzidas (RFD), só se comunicando com outro nó da rede.

3.4.4. Comparação entre os padrões

Fazendo uma pequena comparação entre os padrões percebemos que o padrão Bluetooth e ZigBee foram feitos para servirem a aplicações bastante diferentes. Enquanto o ZigBee prioriza a otimização em consumo de energia e conexão de vários dispositivos em rede, o Bluetooth é destinado principalmente para conectividade, e substituição de cabos entre uma pequena quantidade de dispositivos. Apenas recentemente a especificação 4.0 do padrão Bluetooth começou a regulamentar dispositivos de baixo consumo. Já o padrão Wi-Fi é voltado para conexões de rede que necessitam de uma grande largura de banda e não se preocupa com economia de energia, uma vez que o foco principal é conectar dispositivos a uma infra-estrutura de rede de computadores. A Tabela 3.4 apresenta uma comparação das características mais importantes dos padrões.

Tabela 3.4 - Comparação entre os padrões wireless discutidos.

Nome de Comercial Padrão	ZigBee 802.15.4	Wi-Fi 802.11 x	Bluetooth 2.1 + EDR 802.15.1
Foco da Aplicação	Monitoramento e controle	Web, Email, Vídeo	Substituição de cabos
Taxa de transmissão	20, 40, e 250 Kbits/s	11 e 54 Mbits/s	3 Mbits/s
Alcance	10-100 metros	50-200 metros	100 metros
Tamanho da rede	Mais de 65.000 nós, com baixa latência.	Mais de 200 conexões dependendo da infra-estrutura, mas pode ocorrer perda de qualidade.	7 conexões simultâneas, alta qualidade de conexão com baixa latência garantida.
Topologia de rede	Ad-hoc, peer to peer, star, ou mesh	Point to hub	Ad-hoc, redes muito pequenas
Frequência de operação	868 MHz (Europa) 900-928 MHz (NA), 2.4 GHz (Mundo)	2.4 e 5 GHz	2.4 GHz
Complexidade (impacto do Equipamento e aplicativo)	Baixa	Alta	Moderada
Consumo de energia (opção e duração da bateria)	Muito baixo (baixo consumo é objetivo de projeto)	Alto	Moderado
Duração da bateria (dias)	100 – 1.000 +	0,5 – 5	1-7
Segurança	128 AES + segurança na camada de aplicação	Encriptação AES de 128 bit	Encriptação de 64 e 128 bit
Outras informações	Dispositivos podem se conectar a uma rede existente em menos de 30ms	A conexão de dispositivos requer de 3-5 segundos	A conexão de dispositivos requer até 10 segundos
Aplicações típicas	Controle e monitoramento Industrial, redes de sensores, automação predial, controle e automação residencial, brinquedos, jogos	Conectividade à Wireless LAN, Acesso à Internet em banda larga	Conectividade sem fio entre dispositivos como telefones, PDAs, laptops, fones de ouvido

Com base nestas características e considerando o objetivo do sistema em tela, principalmente no que se refere a taxa de transmissão, alcance e consumo de energia, que será apresentado nos capítulos posteriores, conclui-se que a tecnologia de transmissão sem-fio que mais se adéqua ao projeto é a Bluetooth.

Capítulo 4.

Proposta de um sistema de controle e interfaceamento de um Macroindentador portátil utilizando tecnologias DSP e wireless

4.1. Introdução

Os equipamentos padrão utilizados para ensaios de macroindentação instrumentada envolvem o uso de penetradores esféricos de WC-Co (0,2-1,5mm), atuadores eletromecânicos, sensores de deslocamento de alta resolução, células de carga e microcomputadores com *software* para controle, aquisição e tratamento de dados conforme ilustra o diagrama da Figura 4.1.

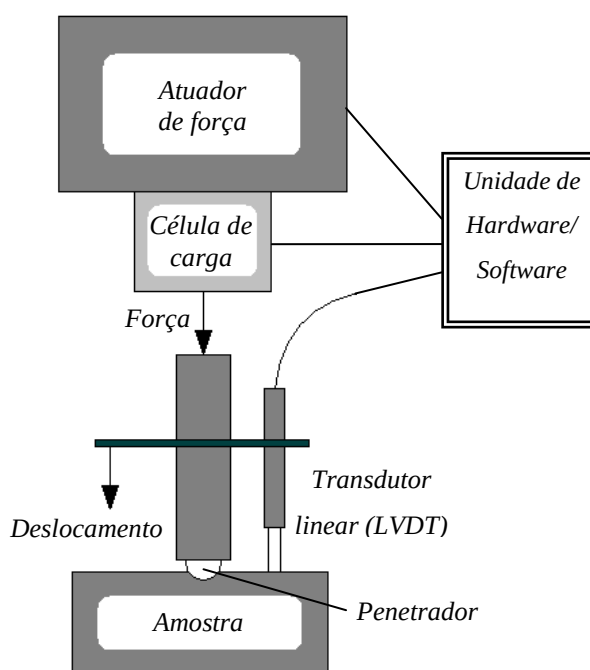


Figura 4.1. Equipamento de indentação instrumentada – esquema conceitual.

O ensaio de indentação inicia-se com o atuador de força aplicando a carga necessária durante o ensaio, o sensor de carga faz a leitura da força de indentação e, à medida que o penetrador avança, o transdutor linear faz a leitura do deslocamento. Tanto o sistema de atuação quanto os sensores são conectados à unidade de *hardware/software* (instrumentação e controle). Este sistema gera a curva força vs. profundidade e, utilizando uma das metodologias de cálculo apresentadas anteriormente, calculam-se as propriedades mecânicas do material sob ensaio.

Neste sentido, foi desenvolvido, pela equipe e associados, o protótipo de um sistema de *hardware-software*, utilizando a integração de equipamentos de aquisição e condicionamento de sinais e posicionamento de motor, fabricados por terceiros, ligados a um computador portátil responsável pelo controle do sistema. O desenvolvimento do protótipo, como será visto na próxima seção, consistiu na interligação dos vários dispositivos para controle e monitoramento, em tempo real, das grandezas fundamentais para o ensaio: velocidade de deslocamento do penetrador, carga aplicada e deslocamento no material.

Com base no protótipo desenvolvido anteriormente, denominado MIP-II, este trabalho propõe um novo sistema de *hardware-software*, buscando aperfeiçoar o sistema já existente substituindo a eletrônica envolvida no controle e interfaceamento deste protótipo por um sistema computacional embarcado desenvolvido especificamente para este fim, utilizando *hardware* de controle dedicado baseado em *DSP* e comunicação sem-fio, produzindo um sistema de alta performance e portabilidade, desenvolvido com *know-how* nacional.

4.2. Descrição geral do PropInSitu 2

O sistema de controle do equipamento de macroindentação portátil (MIP), conforme apresentado na Figura 4.1, pode ser dividido em três unidades principais: (1) estruturas mecânicas, que envolvem os elementos de apoio e fixação dos diversos dispositivos, além do sistema de aplicação de força e deslocamento; (2) instrumentação e *hardware* de controle, que compreende todo o aparato eletrônico necessário para a medição das grandezas de carga e deslocamento, controle e transmissão de dados; e (3) *software* de controle, aquisição e processamento dos dados, que é responsável pelo gerenciamento de todo o processo de indentação, monitoração e coleta de dados, além do processamento destes para obtenção das propriedades mecânicas.

4.2.1. Estruturas mecânicas

Conforme mencionado, estas estruturas foram desenvolvidas anteriormente pela equipe da Faculdade de Engenharia Mecânica (UFU), coordenada pelo Prof. Sinésio Domingues Franco.

No projeto em questão, o sistema de atuação de força é formado por um motor de passo conectado a um redutor, responsável por acionar um atuador linear (fuso de esferas recirculantes sem folga axial), o qual, por sua vez, movimenta o penetrador em direção à superfície de ensaio. Na extremidade do atuador é conectada uma célula de carga e, em sequência, é conectada a haste do porta-penetrador, que serve para distanciá-lo da célula de carga de modo que o transdutor linear possa ser posicionado ao seu lado, como mostra a Figura 4.2.

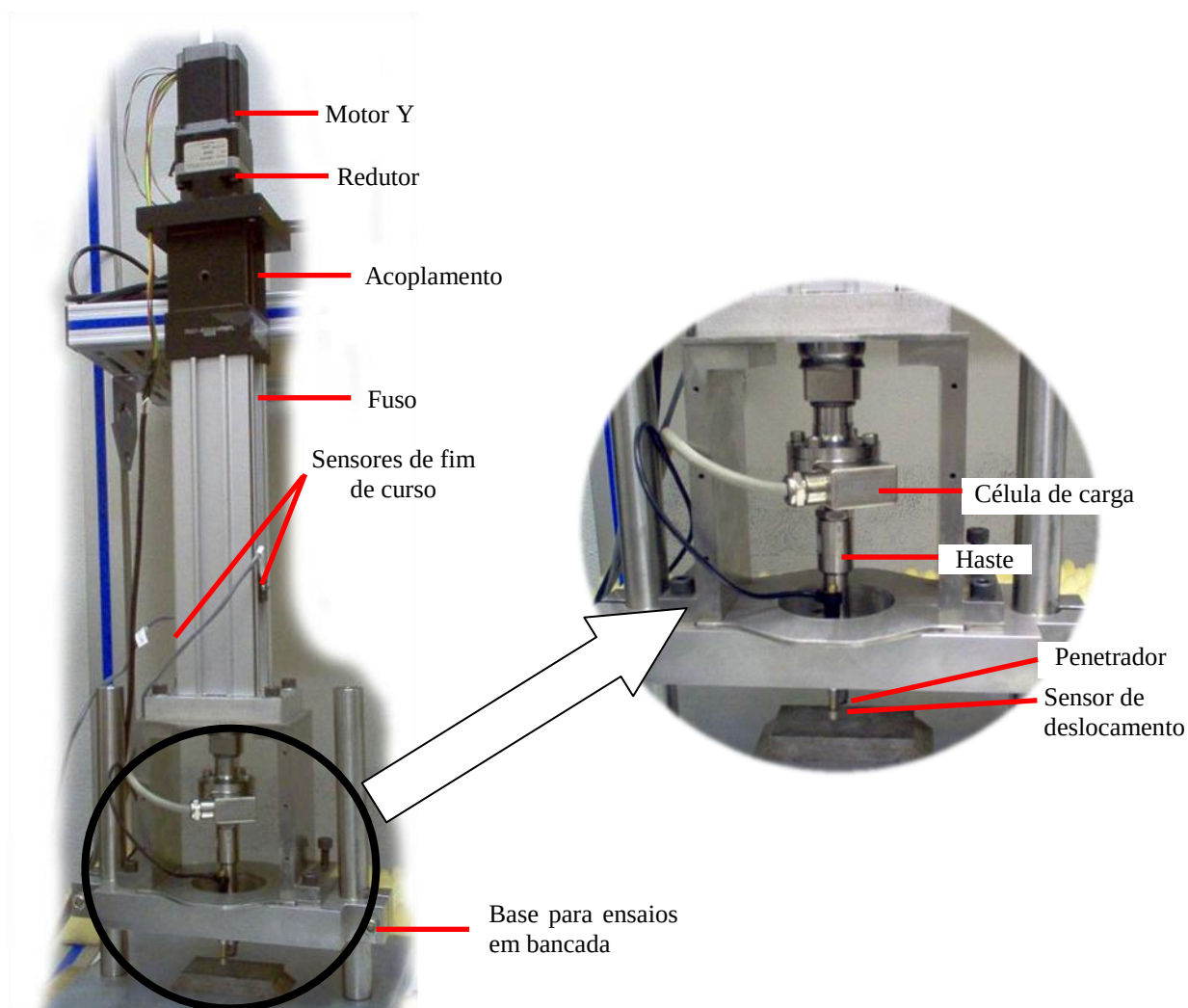


Figura 4.2 unidade principal de indentação montada sobre base fixa para ensaios em laboratório, e detalhes da célula de carga, sensor de posição e penetrador esférico em WC-Co,

O sistema de aplicação de forças foi projetado para aplicar uma força de indentação máxima de 500 kgf, limitada à capacidade da célula de carga de 5 kN. Tipicamente em materiais compostos por aço carbono, essas forças podem provocar impressões com profundidades da ordem de centenas de micro-metros. Com base na escala da impressão, determinou-se que a resolução mínima para o deslocamento do indentador deveria ser de 0,1 μ m, sendo o sistema projetado para garantir este requisito. Para que o ensaio seja realizado de maneira adequada, o conjunto do atuador linear deve garantir uma velocidade de deslocamento constante. Para tanto, o sistema foi projetado a fim de permitir velocidades de 0,76 mm/min a 1487 mm/min.

O sistema de posicionamento horizontal, chamado de *mesa-X*, é responsável por deslocar todo o sistema de indentação (atuador linear, sensor de deslocamento e carga) ao longo de determinada direção do material a ser ensaiado, com o objetivo de automatizar o ensaio, eliminando tediosas operações de reposicionamento do equipamento. Tal sistema é composto de uma base onde a estrutura de indentação é montada, trilhos rolamentados e um motor responsável pelo deslocamento, nomeado como *motor-X*. Este sistema permite, por exemplo, efetuar vários ensaios ao longo de um cordão de solda, bastando que o operador apenas informe o número de ensaios a serem executados, bem como o espaçamento entre eles.

O sistema mecânico de aplicação de força e posicionamento é constituído de:

- Um atuador linear de esferas recirculantes com castanhas pré-carregadas, capacidade dinâmica de 500 kgf, passo de 5,08 mm/rev, curso de 50 mm, velocidade máxima de 175 mm/s, lubrificado com graxa aeronáutica para toda vida, temperatura de trabalho de – 40 a + 60°C, proteção AP-65, com duas chaves de fim-de-curso, instalação por flange frontal;
- Um redutor de precisão do tipo planetário, com redução de 10:1, com folga menor que 3 arco-minutos;
- Mesa X: Fuso de esferas recirculantes, diâmetro 9,5 mm, passo de 3,17 mm/rev, com castanha simples sem flange;
- Guias lineares quadradas e patins para apoio da base do equipamento;

A Figura 4.2 apresenta uma vista geral do equipamento construído. Nela pode-se ver a base onde a coluna é montada para ensaios em laboratório e em detalhe a estrutura do indentador, célula de carga e sensor de deslocamento.

4.2.2. Instrumentação e hardware de controle

O sistema de instrumentação e controle do equipamento é composto basicamente por (Figura 4.3):

- um condicionador de sinais (Spider8);
- um sensor de deslocamento indutivo;
- uma célula de carga;
- dois motores e respectivos *drivers* de potência;
- *Hub* para a ligação dos *drivers* ao computador;
- uma mesa-X para deslocamento horizontal;

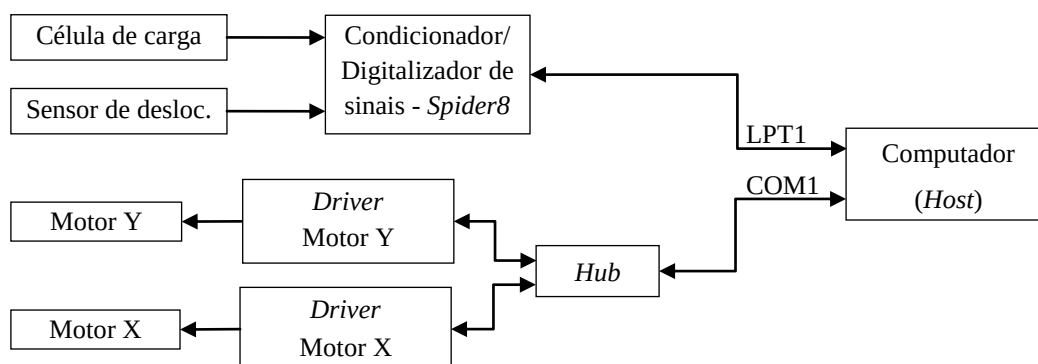


Figura 4.3 - Diagrama de blocos destacando as interconexões entre os módulos principais do MIP-II.

Os motores são controlados pelo computador, que através da interface serial envia os comandos, seja para a movimentação do penetrador (motor Y) ou da mesa X (motor X), para um *hub* o qual retransmite estes comandos aos seus respectivos *drivers*, que por sua vez comandam os motores.

A célula de carga e o sensor de deslocamento são ligados ao condicionador de sinais *Spider8* da empresa alemã *HBM*, responsável pela aquisição e digitalização destes dados, que se comunica com o computador pela porta paralela e fornece ao software as informações necessárias para o controle do sistema. A Figura 4.4 mostra as fotos de cada unidade deste sistema.

Os componentes de controle do sistema de posicionamento e atuação são apresentados na Figura 4.4.a): *drivers* de potência para acionamento do motor do penetrador (aplicação da força de teste) e da mesa X, e *hub* de distribuição dos comandos para os motores. Com a utilização do *hub*, pôde-se fazer todo controle através de uma única porta de comunicação reduzindo a complexidade e custos do sistema, isso só foi possível porque as operações de

aplicação de carga e posicionamento axial do equipamento não ocorrem simultaneamente. Ainda na mesma figura no item b), temos o condicionador de sinais *Spider8* e seus conectores, e no item c) temos o conjunto da mesa X, responsável pela movimentação horizontal do equipamento.

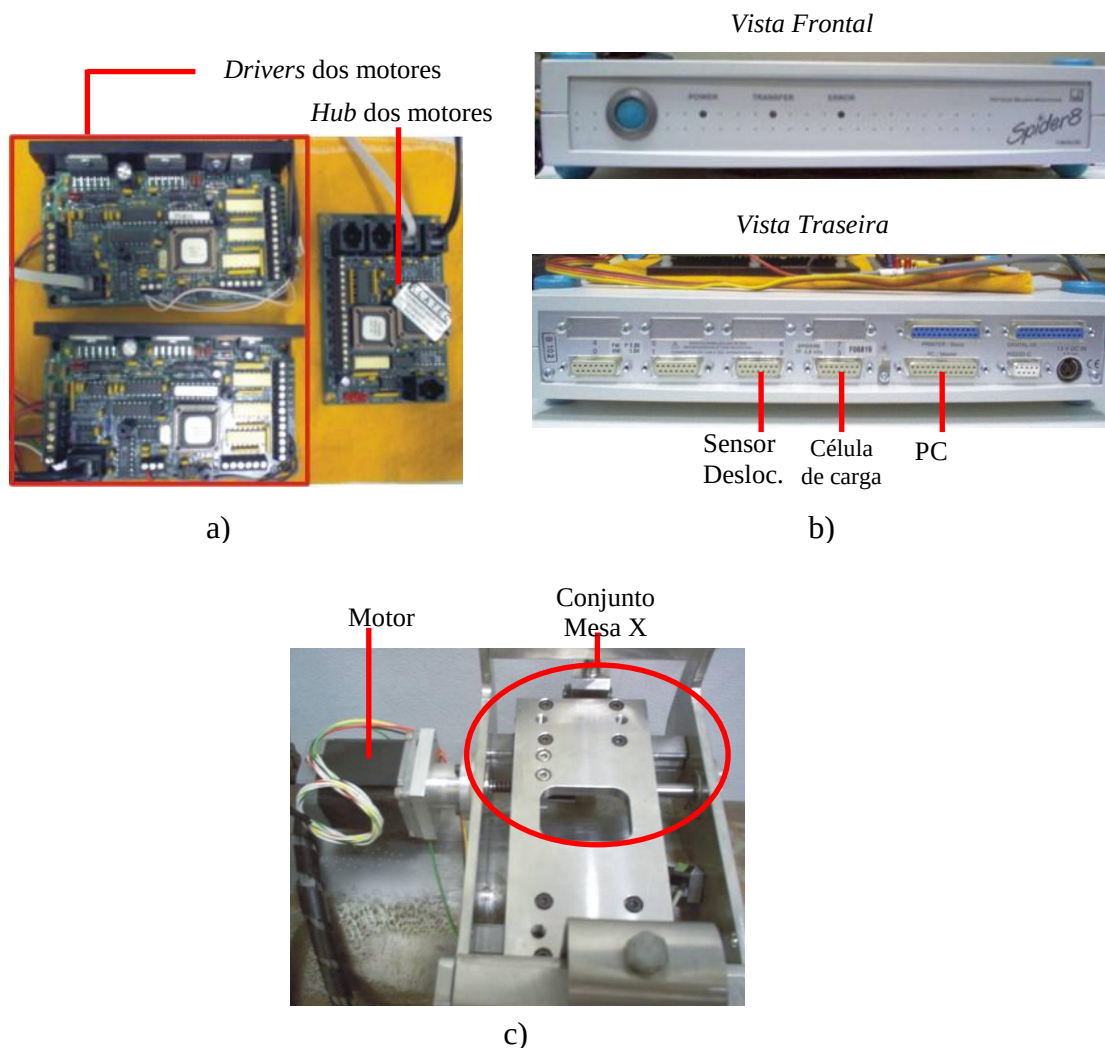


Figura 4.4 - Fotos de cada unidade do MIP-II: a) *Drivers* dos motores e *hub*, b) Unidade de condicionamento e digitalização de sinais *Spider8* – painéis frontal e traseiro e suas conexões, c) Conjunto da mesa X.

A monitoração da profundidade da indentação e da carga aplicada durante o ensaio é feita utilizando sensores específicos para cada grandeza. Estes sensores apresentam em suas saídas uma grandeza elétrica proporcional à variável de interesse, de maneira que esta possa ser condicionada e digitalizada, representando de forma satisfatória a variável medida. O entendimento do princípio de funcionamento destes sensores é importante para a seleção e/ou projeto de um sistema de condicionamento e aquisição de sinais, desta forma eles serão

discutidos em detalhe no próximo capítulo.

Conforme descrito anteriormente, o menor passo de deslocamento do atuador (resolução) é de $0,1 \mu\text{m}$, para atender as especificações iniciais do projeto. Para monitoração do deslocamento do penetrador, com aquela resolução, optou-se pela instalação de um sensor de posição indutivo de alta precisão, localizado próximo ao porta-penetrador. A Figura 4.5 mostra uma representação do posicionamento do sensor de deslocamento escolhido (marca *HBM*, modelo *WI/5mm-T*), ao lado do penetrador.

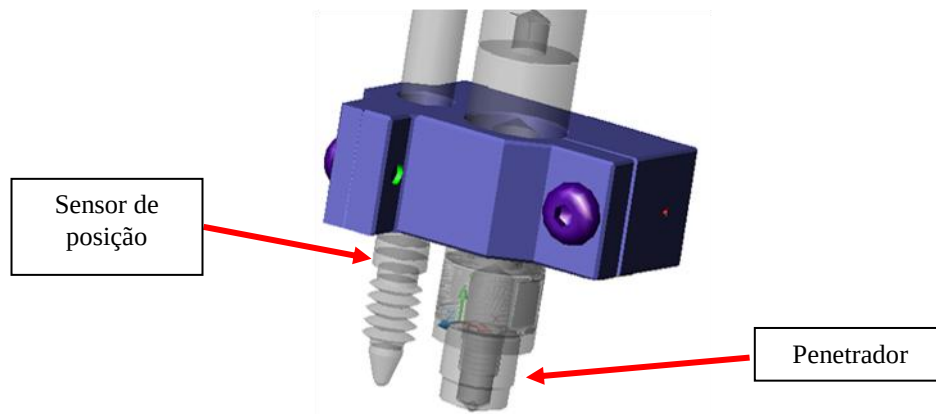


Figura 4.5 – Detalhe do projeto mostrando: penetrador e sensor de deslocamento.

O sensor de deslocamento foi escolhido tomando por base os seguintes requisitos:

- Faixa de medição (fundo de escala) de aproximadamente $\pm 2 \text{ mm}$,
- Resolução mínima de $0,1 \mu\text{m}$,
- Precisão melhor que $0,1 \mu\text{m}$,
- Erro menor que $0,5 \%$,
- Exatidão melhor que $99,5\%$,
- Erro de repetibilidade menor que $0,5 \%$.

A seleção do sistema de medição da força de indentação baseou-se na força máxima de indentação de até 5KN , de maneira que o sensor de carga escolhido deveria considerar as seguintes especificações principais:

- Faixa de medição entre 0 e 5000 N ,
- Resolução mínima de 10 N ,
- Precisão melhor que 1 N ,
- Erro menor que 1% ,
- Exatidão melhor que $99,8\%$,
- Erro de repetibilidade menor que $0,5 \%$.

Os sinais provenientes dos sensores (deslocamento e carga) são condicionados em um equipamento da *HBM*, modelo *Spider 8*, onde são digitalizados e transferidos ao computador. A Figura 4.4 - b) mostrada anteriormente apresenta o condicionador utilizado, as respectivas entradas de sinal e a porta de comunicação com o computador (PC).

4.2.3. Software de controle, aquisição e processamento dos dados

Um microcomputador é responsável pela execução do aplicativo de *software* principal, que incorpora as funções de controle das unidades de *hardware*, aquisição de dados e processamento, fazendo a interligação entre os diferentes componentes de hardware.

Através da interface paralela LPT1, o *software* controla e monitora as saídas do sistema de condicionamento de sinais (Spider8), e pela porta serial ele envia para o *hub* os comandos para a movimentação dos motores da mesa X e do atuador linear.

As principais funções do *software* protótipo do PropInSitu 2 são:

- Controle de todo o *hardware* do sistema.
- Controle de movimentação da mesa X;
- Controle dos processos envolvendo os ensaios de indentação;
- Controle do processo de aquisição de dados;
- Publicação do andamento do ensaio e dos resultados de processamentos e em interfaces específicas;
- Implementação dos modelos matemáticos para cálculo das propriedades mecânicas do material em teste;
- Armazenamento e leitura de dados em arquivos, e
- Impressão de relatórios.

Estas tarefas estão divididas em duas unidades principais, a saber:

- **Ensaio:** responsável pelo controle do deslocamento do penetrador e aquisição de dados de carga e deslocamento. Esta unidade tem por finalidade controlar todo o processo de ensaio, coleta e armazenamento de dados, incluindo o posicionamento do indentador através da movimentação da mesa X;
- **Análise:** responsável pelo tratamento dos dados do ensaio e obtenção das propriedades mecânicas. Esta unidade tem por finalidade realizar todo o processamento necessário para cálculo das propriedades mecânicas do material ensaiado. No PropInSitu 2 foram implementados os dois métodos de cálculo de propriedades: o método de Haggag *et al* e o de Know *et al*.

O software do protótipo foi totalmente desenvolvido em LabVIEW[®], que utiliza uma linguagem de programação gráfica baseada em ícones, da *National Instruments*, que se mostrou uma excelente ferramenta de programação, principalmente para a confecção de protótipos, onde a facilidade e velocidade de programação são essenciais, porém o LabVIEW, por se tratar de uma plataforma de programação de alto nível, exige muitos recursos de processamento, fazendo com que o programa se torne lento em alguns casos, principalmente quando outros programas estão em execução, podendo afetar o desempenho do sistema e o resultado das medições, caso ocorra alguma falha na leitura dos dados dos amostrados.

4.3. Proposta de um novo sistema *Hardware/Software* para controle do equipamento MIP-II

Na seção anterior foi apresentado o protótipo desenvolvido preliminarmente e suas unidades componentes, a partir das quais se pôde perceber que o sistema desenvolvido apresenta pontos que podem ser melhorados, ou aperfeiçoados, principalmente no tocante à eletrônica, ao software de controle e aos elementos de conexão associados. Para isto o presente trabalho propõe o projeto e desenvolvimento de um sistema de controle dedicado, desenvolvido estritamente para o controle do equipamento utilizando comunicação sem-fio, a fim de melhorar a portabilidade do sistema, a velocidade e a segurança na montagem do equipamento, o tempo de execução dos ensaios e o resultado das medições.

A Figura 4.6 apresenta um diagrama de blocos simplificado para o sistema proposto, comparando o sistema existente e as alterações a serem realizadas. O novo sistema deverá ser desenvolvido mantendo compatibilidade com as interfaces já existentes dos sensores e do *hub* dos motores. Este sistema irá substituir o condicionador/digitalizador de sinais *Spider8* e a parte do computador (*Host*) responsável pelo controle do ensaio, juntamente com todos os cabos necessários para interconexão entre eles, para tanto o sistema fará uso de um hardware projetado especificamente para este fim. Este hardware será composto de uma unidade de condicionamento e digitalização de sinais, uma unidade de controle e processamento baseada em *DSP* e uma unidade de transmissão sem-fio que enviará os dados do ensaio para um computador *host* responsável pelo monitoramento e posterior processamento destes dados. A seguir serão apresentados os principais requisitos destas novas unidades.

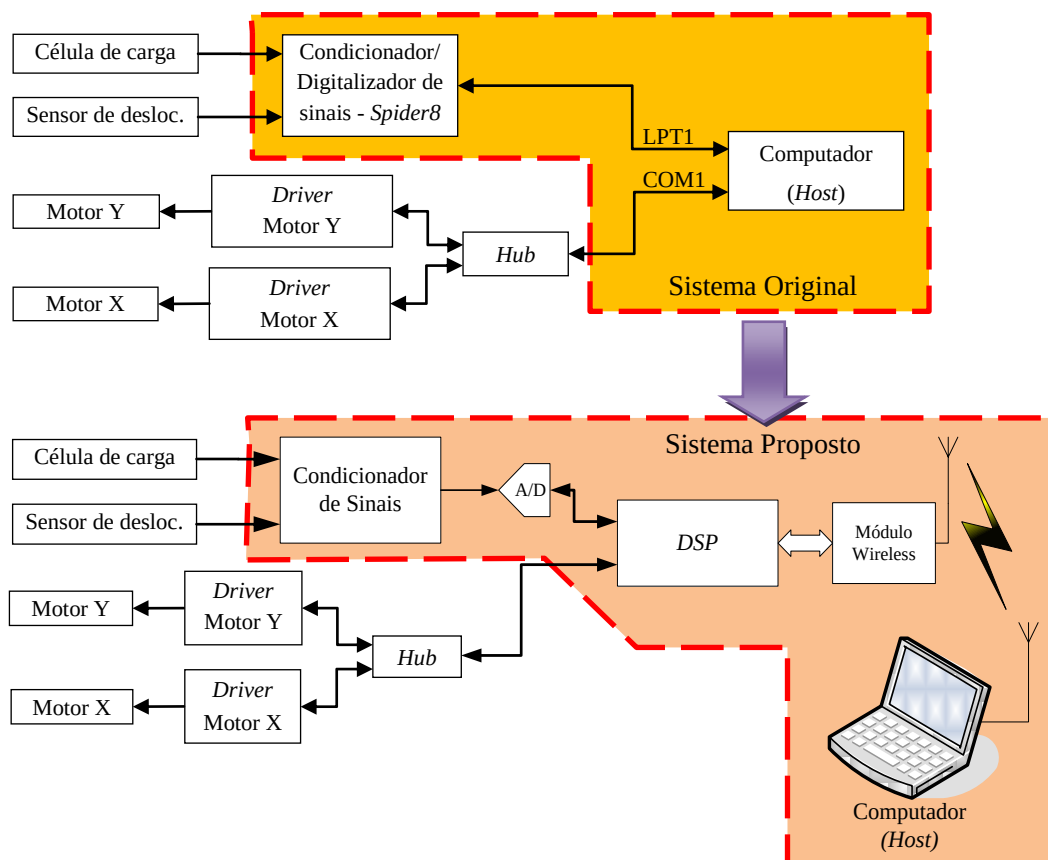


Figura 4.6. Comparação dos diagramas representativos do equipamento de macroindentação. Na parte superior do desenho está a representação do hardware já desenvolvido, na parte inferior o novo sistema proposto. Em destaque pode-se observar quais unidades serão modificadas pelo novo sistema.

Condicionador de sinais e Conversor A/D

O condicionador de sinais deve ser compatível com os dois tipos de sensores, sendo capaz de excitá-los de maneira adequada e preparar a grandeza elétrica proveniente dos sensores para que a mesma possa ser devidamente digitalizada.

Com base nas características dos sensores e requisitos do sistema, apresentados anteriormente, pode-se especificar o conversor A/D.

Considerando que o sensor de deslocamento deve ter uma resolução mínima de $0,1 \mu m$ com uma faixa de medição de $4 mm$, dividindo-se o valor da faixa de medição pela resolução encontra-se a quantidade mínima de níveis de quantização necessária para o conversor A/D como sendo 40000, o que implica em um conversor A/D de 16 bits.

A determinação da taxa de amostragem deste conversor depende da maneira como o sinal é condicionado e da velocidade de deslocamento do penetrador dentre outros fatores.

Considerando um caso extremo em que a velocidade de deslocamento do indentador fosse amostrada continuamente enquanto o penetrador é deslocado, supondo uma velocidade

de deslocamento máxima do penetrador de 76 mm/min , equivalente a $1270 \text{ } \mu\text{m/s}$, muito superior à necessária para o ensaio, e dividindo este valor pela resolução mínima do sensor, tem-se que a taxa de amostragem deste conversor deve ser de pelo menos 12700 amostras por segundo.

Para o sensor de força aplicada, a faixa de medição deve ser de 5000 N e a resolução de 10 N , neste caso são necessários apenas 500 níveis de quantização para a digitalização do sinal. Assim optou-se pela utilização de um conversor de 16 bits.

Unidade de Controle (DSP)

Esta unidade será responsável pelo gerenciamento de todo o processo de indentação. Para tanto a unidade de controle deverá ser capaz de operar em tempo real na monitoração dos sensores, no controle dos motores e na transmissão de dados, por isso é fundamental a escolha de um processador digital de sinais (DSP) que atenda aos requisitos do projeto.

Uma vez que os dados provenientes do conversor A/D são de 16 bits, o DSP deverá ser capaz de trabalhar, nativamente, com estes dados sem a necessidade de nenhum tipo de conversão.

O DSP deverá ser capaz de se comunicar via interface serial com o *Hub* dos motores e possuir interfaces de comunicação compatíveis com o conversor A/D e módulo *wireless* escolhidos.

O *software (firmware)* desenvolvido para esta unidade deverá ser capaz de garantir a segurança da operação e a integridade das estruturas envolvidas no ensaio de indentação. A Figura 4.7 apresenta um diagrama resumido do sistema de software a ser desenvolvido para o controle automático do ensaio de indentação. O processo inicia-se com o estabelecimento da comunicação entre o DSP, os dispositivos de *hardware* (sensores e controlador do motor), e o computador *Host* responsável pela configuração do ensaio. O ensaio só irá começar se todas as unidades estiverem corretamente conectadas e energizadas, e a comunicação com o computador *Host* estabelecida.

Depois de completadas as verificações iniciais, o procedimento de ensaio é iniciado. O atuador linear deve deslocar o penetrador com uma velocidade e passos pré-definidos. Durante a penetração, o deslocamento do penetrador e a carga aplicada devem ser coletados continuamente, em tempo real e transmitidos ao *Host*. Caso ocorra algum erro de leitura dos sensores ou o valor de carga exceda um limite pré-determinado o ensaio deverá ser finalizado.

Os valores de carga e deslocamento coletados serão posteriormente utilizados na etapa de tratamento e análise, que consiste na extração dos principais pontos da curva característica

de carga *versus* deslocamento e na aplicação dos mesmos em equações-modelo para a obtenção das propriedades mecânicas do material ensaiado.

Em todas as etapas do *software* devem ser verificadas as condições de segurança para a realização do ensaio, de modo que os equipamentos utilizados não sejam danificados e seja garantida a integridade da estrutura ensaiada.

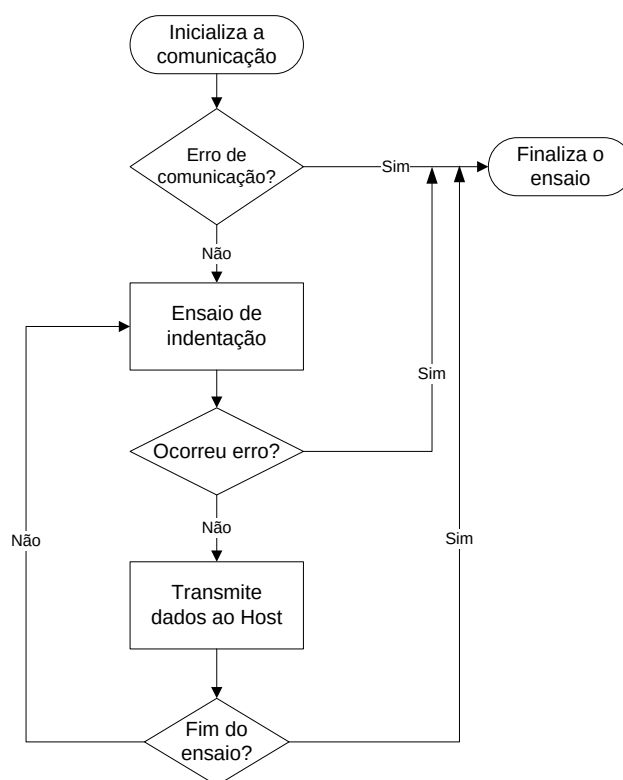


Figura 4.7. Diagrama representativo do software do equipamento de macroindentação.

Módulo de comunicação sem-fio (*Wireless*)

O módulo de comunicação sem fio é o responsável por enviar ao computador (*Host*) os dados referentes ao ensaio e receber os dados de configuração e controle. Para que esta comunicação seja feita de maneira satisfatória o módulo deve ser capaz de transmitir e receber dados a uma taxa de transmissão adequada, resistindo a eventuais interferências e tendo um alcance de transmissão que garanta ao operador uma distância mínima do equipamento.

Considerando uma taxa de amostragem do conversor A/D, de 12700 amostras por segundo, conforme determinada anteriormente, considerando um *overhead* de 12%, a taxa de transmissão para que todas as amostras do condicionador de sinais sejam enviadas ao *Host* assim que estiverem disponíveis deve ser de 456kbps. Estes dados são apenas para monitoração e armazenamento eles não necessitam ser transmitidos em tempo real, uma vez que o controle é feito pelo DSP.

Outro requisito importante para o módulo wireless diz respeito ao alcance em área livre, que é a máxima distância que o módulo consegue enviar e receber dados sem perdas em uma área sem barreiras para a propagação do sinal. Para o projeto em questão é interessante que o raio de comunicação mínimo seja de 10 metros, para garantir flexibilidade na montagem do equipamento em relação ao sítio de operação. Os dados transmitidos por este sistema devem ser criptografados não permitindo que outras pessoas que não estejam envolvidas no processo interfiram com o mesmo ou adquiram informações sigilosas, garantindo assim a segurança da informação e a integridade do sistema.

Software de configuração e monitoramento do computador *host*

Avaliando-se as necessidades do sistema, obteve-se o seguinte conjunto de características para o software a ser executado pelo computador hospedeiro:

- Controle do fluxo de informações entre a unidade de recepção e o computador hospedeiro;
- Capacidade de coleta dos dados, e posterior armazenamento ; e
- Visualização dos sinais coletados.

Além das características funcionais, a interface deve ser capaz de prover a configuração do sistema remoto. A interface responsável pela configuração do sistema remoto deve conter as seguintes informações:

- Quantidade de ensaios: quantidade de ensaios a serem executados ao longo do eixo da tubulação;
- Distância entre ensaios, em mm: distância em milímetros entre cada um dos ensaios definidos no campo acima;
- Carga máxima (N): máxima carga de indentação – importante para a corretude dos resultados;
- Número de ciclos: quantidade de ciclos de descarregamento (parciais e final) a serem executados durante o ensaio – importante para a exatidão dos resultados;
- Percentual de descarregamento para cada ciclo definido acima, e
- Parâmetros de calibração dos sensores

Neste capítulo foram descritas as especificações básicas para os sistemas de *software* e *hardware* que devem compor o sistema proposto. No próximo capítulo serão detalhados o projeto e o funcionamento destes sistemas.

Capítulo 5.

Projeto e desenvolvimento das unidades de hardware e software de controle.

5.1. Introdução

Este capítulo apresenta as etapas do projeto e desenvolvimento do sistema de macroindentação proposto. Serão destacados o projeto dos circuitos eletrônicos desenvolvidos para o condicionamento de sinais e controle, o princípio de funcionamento e características dos sensores, motores e *drivers* que serão interfaceados pelo sistema. A Figura 5.1 mostra o diagrama de blocos simplificado do *hardware* para o sistema proposto, que servirá de base para as discussões deste capítulo.

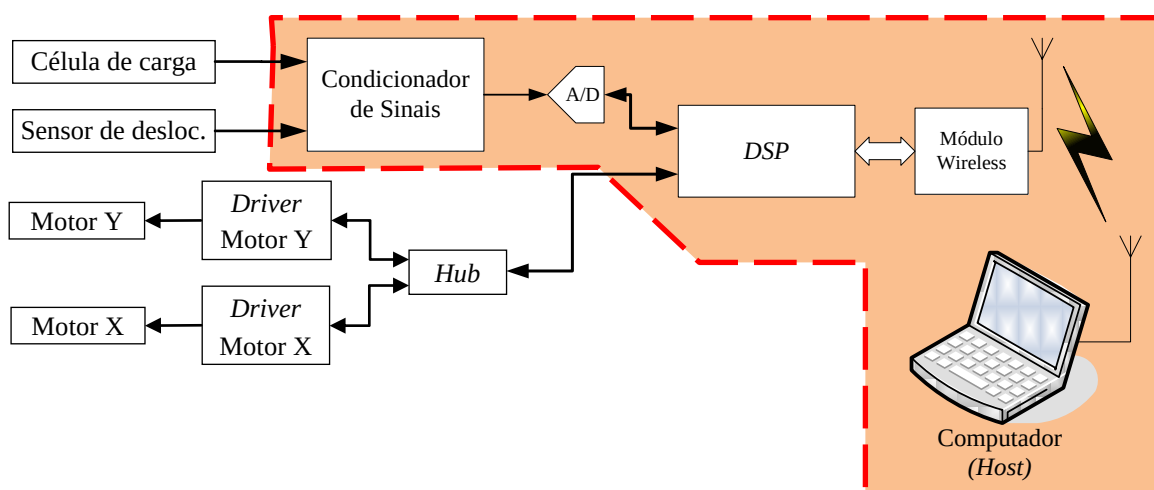


Figura 5.1 - Diagrama de blocos do *Hardware* para o sistema proposto.

5.1.1. O motor e o *Driver*

Os motores e os *Drivers* de controle, conforme mencionado anteriormente, foram selecionados de forma a assegurar que o menor passo de deslocamento do atuador fosse de $0,1\ \mu\text{m}$, além desta especificação outros fatores, como peso, dimensões e complexidade de controle foram considerados para a seleção dos mesmos.

Dentre os diversos tipos de motores, AC/DC, servo motor, motor de passo, etc., o que melhor se adaptou ao projeto foi o motor de passo, graças às suas dimensões e peso reduzidos, garantindo portabilidade ao equipamento. Outra característica interessante do motor de passo é a capacidade de travamento do eixo do motor em determinada posição, desde que respeitados os torques limites, sem a necessidade uma eletrônica de controle complicada, bastando para isso energizar suas bobinas, reduzindo assim a complexidade do controle.

O motor utilizado possui as seguintes características:

- Tensão de alimentação de 12V;
- Corrente nominal de 3A;
- Ângulo de passo de 0.8°;
- Dimensões: 10 x 8 x 8 cm;
- Peso: 1kg

Para o acionamento dos motores de passo, da mesa X e do atuador linear, são utilizados dois *drivers* de potência da empresa *Applied Motion*, modelo 3540i, com capacidade de fornecerem uma corrente máxima de saída de 3,5A em 40Vdc, e resolução de micropassos de 50.800 passos/rev.

Estes *drivers* são controlados através de uma interface RS232 por comandos específicos, que além de receber dados de status dos motores, permitem configurar diversos parâmetros, tais como: corrente, velocidade e aceleração dos motores. Os *drivers* permitem também a configuração de chaves de fim de curso, entradas e saídas digitais, além da resolução de micropassos, que controla com precisão a quantidade de corrente em cada fase, subdividindo eletronicamente os passos do motor, possibilitando uma melhora na resolução do movimento. A Figura 5.2 apresenta o diagrama esquemático do controlador do motor (Applied Motion Products Inc., 1998).

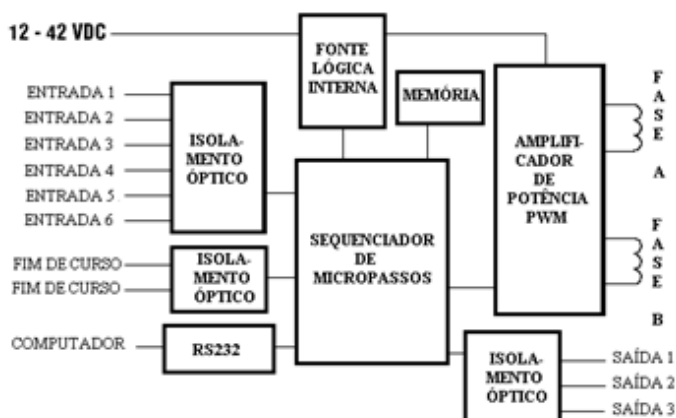


Figura 5.2 - Diagrama do controlador do motor (Applied Motion Products Inc., 1998).

Para a comunicação com os *drivers* dos motores utiliza-se o *Hub444* da mesma empresa, que é responsável por distribuir os comandos para os *drivers* específicos, mesa X ou atuador linear, assim, pode-se fazer todo controle através de uma única porta de comunicação.

5.1.2. O sensor de carga

Para medição dos valores de força é utilizado o transdutor de força *U2B* da empresa alemã *HBM*, que é uma célula de carga extensiométrica configurada em ponte completa de Wheatstone, cujas principais características são:

- Faixa de operação: 0 a 5000N;
- Classe de exatidão: 0,1;
- Sensibilidade: 2mV/V;
- Tensão de excitação: 0,5 a 12V;
- Desvio de linearidade: < 0,1%;
- Peso: 800g;
- Deslocamento nominal: < 0,1mm;
- Erro de histerese: < 0,15%.
- Temperatura de trabalho: -10 a +70 °C;
- Força máxima de operação: 150% do fundo de escala
- Grau de proteção: IP 67
- Material: aço inoxidável

A Figura 5.3 apresenta uma foto da célula de carga utilizada e seu esquema de ligação (HBM, 2009a).

O funcionamento da célula de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gage* (SG), que altera sua resistência quando submetido a uma deformação. Estes sensores são fixados a uma estrutura mecânica e à medida que esta estrutura é deformada esta deformação é transmitida aos extensômetros.

Na célula de carga utilizada os SGs são dispostos de forma que dois deles são tracionados e os outros dois são comprimidos quando uma força é aplicada ao transdutor. O circuito sensor contém resistências de correção e compensação para a remoção de influências indesejáveis na saída zero e na sensibilidade.

A ação de uma força sobre o transdutor irá deformar elasticamente os SGs fixados ao corpo de medição alterando então sua resistência elétrica proporcionalmente à mudança no seu comprimento. Isso perturba o equilíbrio do sistema de medição ligado em forma de ponte

de Wheatstone, resultando uma tensão de saída (UA) em seus terminais se uma tensão de excitação (UB) estiver presente.

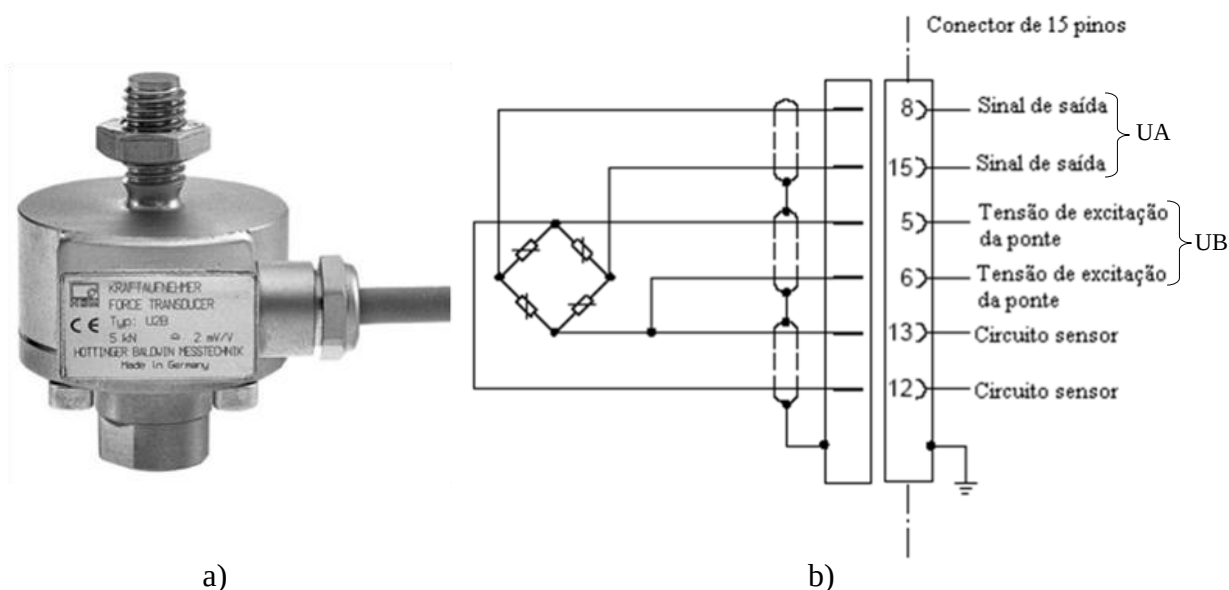


Figura 5.3 - a) Célula de carga modelo U2B da empresa HBM. b) Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone (HBM, 2009a).

A relação entre as tensões, UA/UB , expressa em mV/V , é uma medida da sensibilidade do transdutor de força. A mudança na tensão de saída UA é proporcional a força de atuação. Desde que o transdutor de força esteja conectado de acordo com a Figura 5.3 b), as forças de compressão são apresentadas com um sinal positivo e as forças de tração são mostradas com sinal negativo.

5.1.3. Sensor de deslocamento

Para monitoração do deslocamento do penetrador, utiliza-se um sensor de posição indutivo de alta precisão da HBM, modelo *WI/5mm-T*. Uma das vantagens dos sensores de deslocamento indutivos é sua robustez e sua escassa necessidade de manutenção.

O transdutor consiste de um núcleo ferromagnético e um tubo de bobina, no qual estão localizadas duas bobinas de medição dispostas em série, formando uma meia ponte indutiva. Neste tipo de sensor a tensão de entrada está praticamente em fase com a tensão de saída, não necessitando desta forma de nenhum circuito para compensação de deslocamento de fase, comum a outros sensores de posicionamento indutivos como os LVDTs.

O núcleo ferromagnético é montado em uma haste não magnética e posicionado no centro do sistema de bobinas. O deslocamento axial do núcleo provoca uma variação em sentido oposto na impedância das bobinas de medição.

- Peso: 15g;
- Tensão de excitação: 0,5 a 10 Vrms @ 4800 $\pm$ 8% Hz

O sensor indutivo utilizado é projetado para trabalhar com amplificadores de frequência de portadora de 4,8 kHz, modulando em amplitude a tensão de saída de acordo com a variação do posicionamento do núcleo. O princípio de medição corresponde ao princípio da bobina de indutância diferencial, baseado em uma meia ponte ativa que é expandida internamente para uma conexão de ponte completa. Este sensor pode ser utilizado em modo de ponte completa ou meia-ponte.

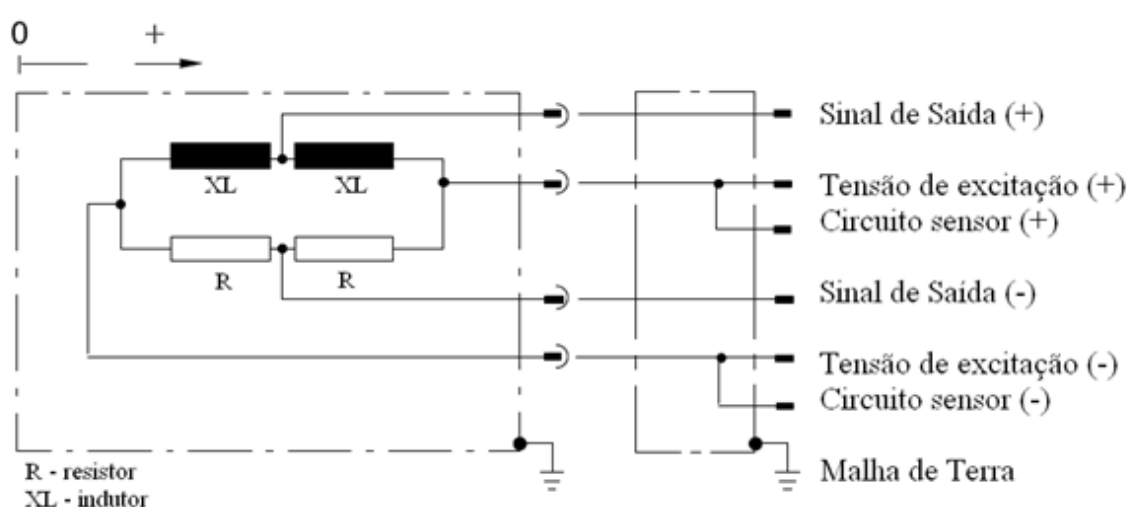


Figura 5.5 - Esquema de ligação do sensor de deslocamento.

A Figura 5.5 mostra uma representação esquemática da configuração interna do sensor em ponte completa. À medida que o núcleo é empurrado para dentro a variação de tensão é positiva e negativa quando empurrado para fora. A tensão de saída é zero no meio da faixa de medição.

5.2. Projeto do *hardware* de controle e instrumentação

Os circuitos eletrônicos desenvolvidos para o controle do equipamento serão discutidos nesta seção, estes circuitos englobam o sistema de condicionamento de sinais, conversão analógico/digital, módulo de comunicação Bluetooth e o circuito do controlador digital de sinais.

A eletrônica de controle foi implementada de maneira modular, com o intuito de permitir a evolução do protótipo, possibilitando pequenas alterações no hardware sem a necessidade de se refazer as placas e circuitos envolvidos. Estes circuitos foram projetados

visando minimizar eventuais efeitos devido às interferências eletromagnéticas segundo as orientações de Microchip Masters Brasil (2006) e (Texas Instruments Incorporated, 2000), para garantir maior robustez ao protótipo, embora este não tenha sido o foco principal do projeto.

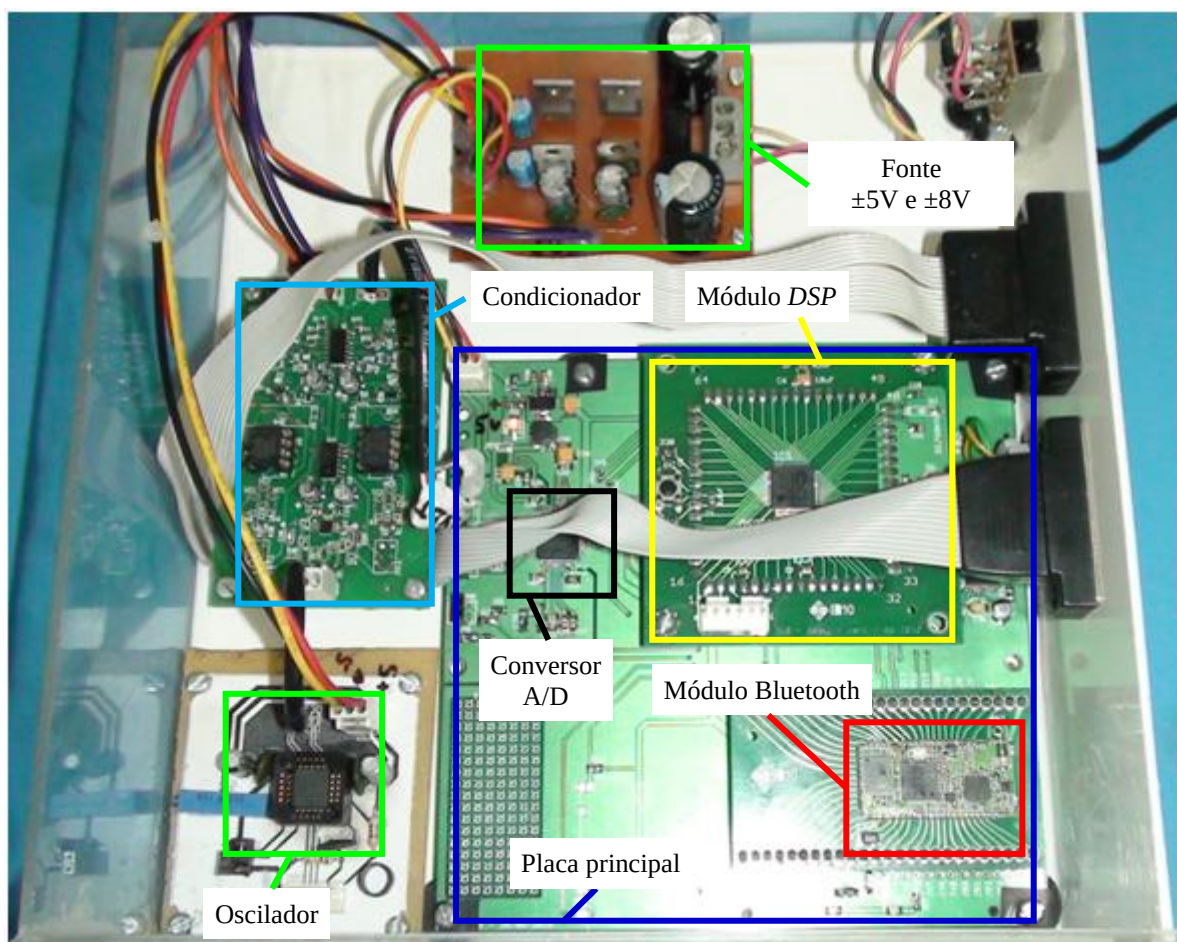


Figura 5.6 - Foto do sistema desenvolvido destacando os módulos e componentes principais.

O projeto foi dividido em três módulos: o módulo de condicionamento de sinais, responsável pelo tratamento e amplificação dos sinais provenientes dos sensores, onde é realizado todo o tratamento analógico do sinal; o módulo Bluetooth e o módulo do DSP. Além destes módulos foi desenvolvida também uma placa principal, responsável por interligar todos os módulos. A Figura 5.6 mostra uma vista geral do sistema desenvolvido destacando seus componentes principais.

5.2.1. Módulo Condicionador de sinais

Com base nas características dos sensores foi desenvolvido um sistema de condicionamento de sinais, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 5.7. O hardware é capaz de fornecer a excitação necessária aos sensores, amplificar e filtrar os sinais de saídas

de maneira a adequá-los aos limites do conversor A/D.

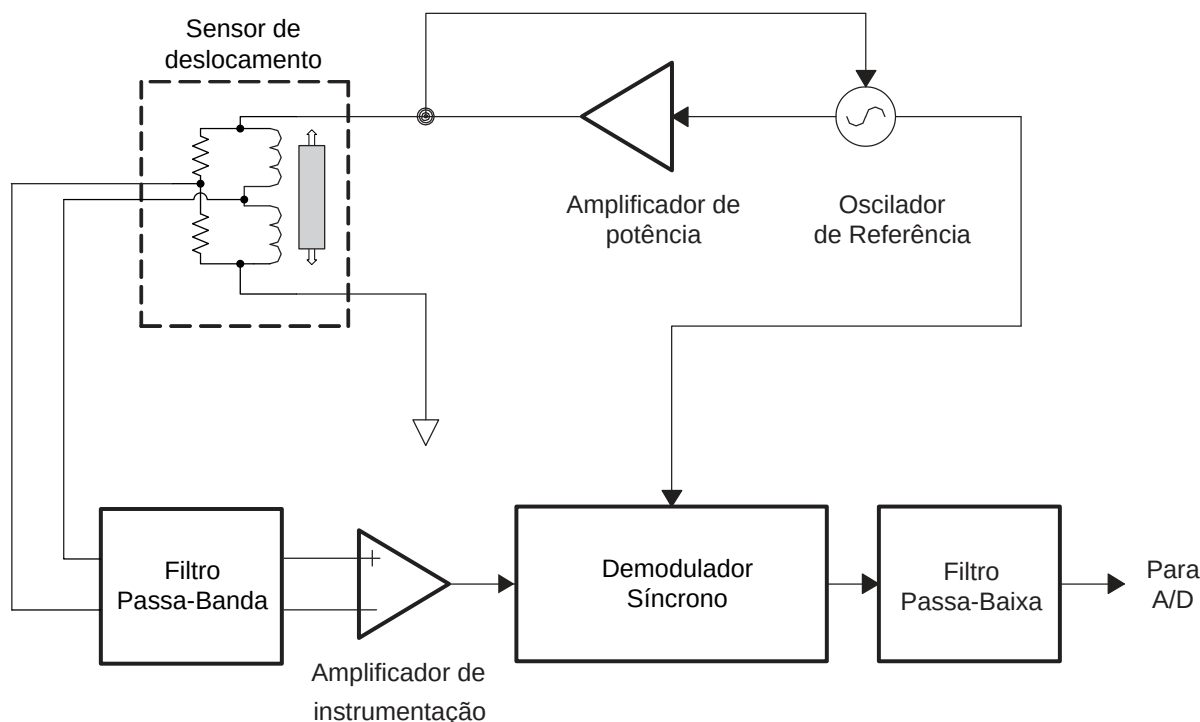


Figura 5.7. Diagrama de blocos do condicionador de sinais analógico.

O condicionador de sinais foi projetado considerando-se principalmente as especificações do sensor indutivo de deslocamento, pois este sensor necessita de maiores cuidados, tanto para excitação quanto leitura dos dados, este mesmo circuito pode ser utilizado para condicionamento do sinal proveniente da célula de carga, sem nenhum prejuízo para a medição, uma vez que ambos os sensores são configurados como ponte completa e apresentam comportamento semelhante, quando alimentados por tensão alternada.

Para a excitação das bobinas do sensor de deslocamento indutivo é necessário um sinal alternado com uma frequência fixa de 4,8kHz, para tanto se emprega o oscilador senoidal programável AD2S99 da *Analog Devices*, que gera um sinal senoidal com amplitude de $2V_{rms}$. O diagrama esquemático de ligação do AD2S99 é apresentado na Figura 5.8. O sinal senoidal gerado pelo AD2S99 é então amplificado e aplicado aos sensores. O circuito do oscilador senoidal foi montado em uma placa de circuito impresso separada, mostrada na Figura 5.9, visando facilitar a manutenção e modularização do sistema.

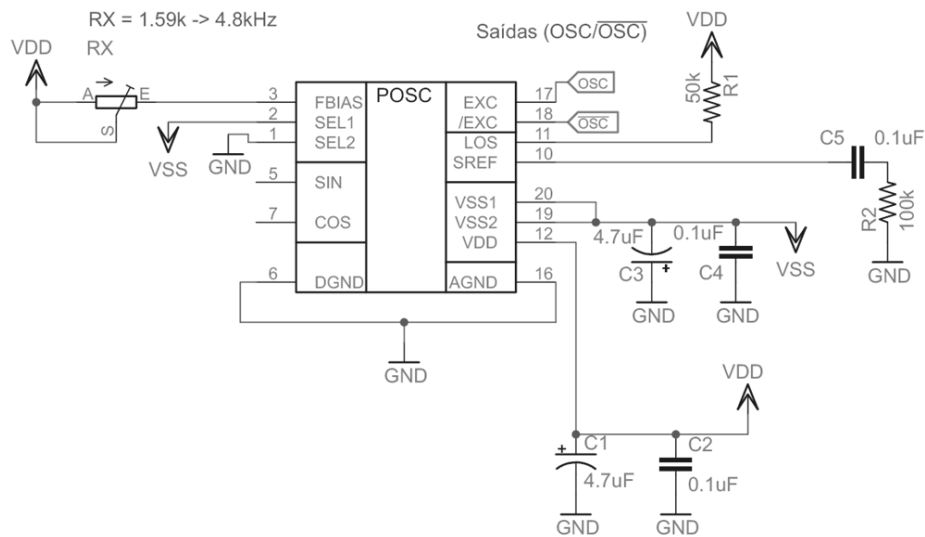


Figura 5.8 - Diagrama de ligação do CI oscilador senoidal AD2S99.

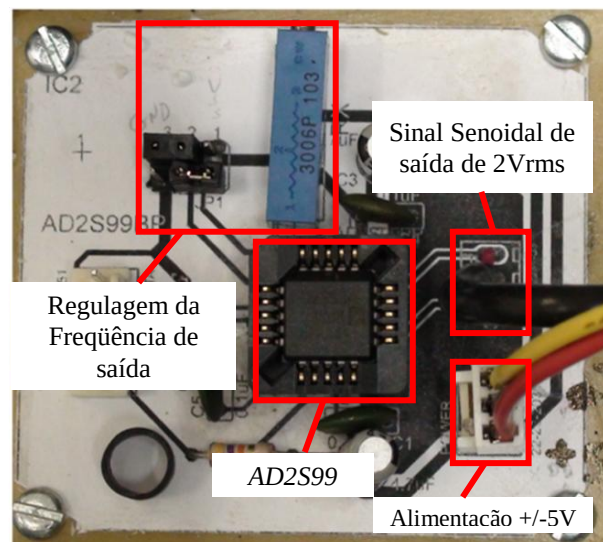


Figura 5.9 - Circuito do oscilador senoidal AD2S99 montado em placa de circuito impresso.

O amplificador de potência, apresentado na Figura 5.7, tem como base o amplificador operacional LM8272 da *National Instruments*. Este CI é composto de dois AO's e apresenta uma capacidade de corrente de saída $\pm 65\text{mA}$ por canal, um *Slew Rate* de $15\text{V}/\mu\text{s}$ e capacidade ilimitada de alimentação de carga capacitiva, sendo suficiente para excitação dos sensores em questão. O ganho deste Amplificador Não-inversor é sempre maior ou igual a 1, ajustado pelos resistores R_x e R_i , os outros resistores e capacitores associados ao circuito são componentes opcionais os quais configuram filtros analógicos, passa-baixa e passa-alta, para eliminar algum ruído proveniente do oscilador. O sinal do amplificador de potência é aplicado aos sensores através de conectores DB25 fêmea, conforme apresentado na Figura 5.10. O esquema genérico de ligação dos sensores é mostrado na Figura 5.11.

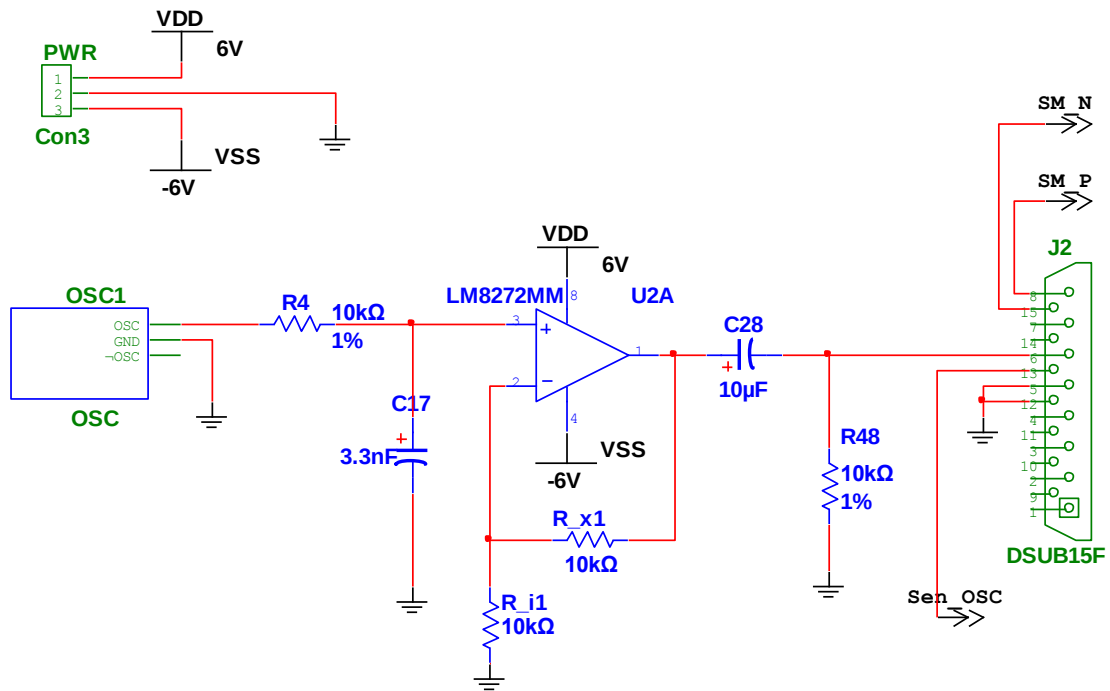


Figura 5.10 - Amplificador de potência e interface dos sensores.

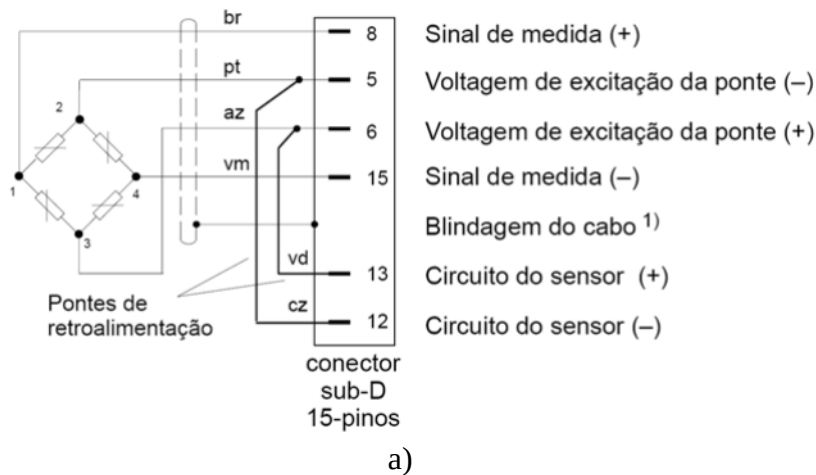


Figura 5.11 - a) Esquema genérico de ligação dos sensores. b) Foto do sensor de deslocamento conectado à interface.

Os sinais de saída dos sensores são conectados a um amplificador de instrumentação (AI), que mede a tensão diferencial. O CI *INA128P* da *Texas Instruments* foi selecionado para este propósito devido a sua alta taxa de rejeição de modo comum (*CMRR*) e alto *slew rate*.

A saída do AI é levada a um circuito demodulador síncrono que gera um sinal de onda completa retificado, cuja polaridade depende da fase do sinal de saída do sensor em relação ao oscilador (entrada). O sinal retificado é então suavizado e amplificado para produzir uma

tensão contínua estável proporcional à variável que está sendo medida.

A Figura 5.12 mostra o diagrama esquemático dos circuitos de amplificação, retificação e filtragem. No circuito o AO U3C funciona como um comparador, aplicando um sinal quadrado ao anodo do diodo D1. Quando este sinal for positivo o diodo D1 entra em condução desligando o transistor Q2, fazendo o AO U5D atuar como buffer; quando o sinal for negativo o diodo não conduz e o U5D atua como amplificador inversor com ganho 1. Desta forma este circuito controla o ganho do AO U5D em ± 1 de forma síncrona com o sinal de referência, produzindo em sua saída um sinal contínuo pulsante positivo ou negativo dependendo do desbalanceamento da ponte de Wheatstone em relação ao sinal de referência.

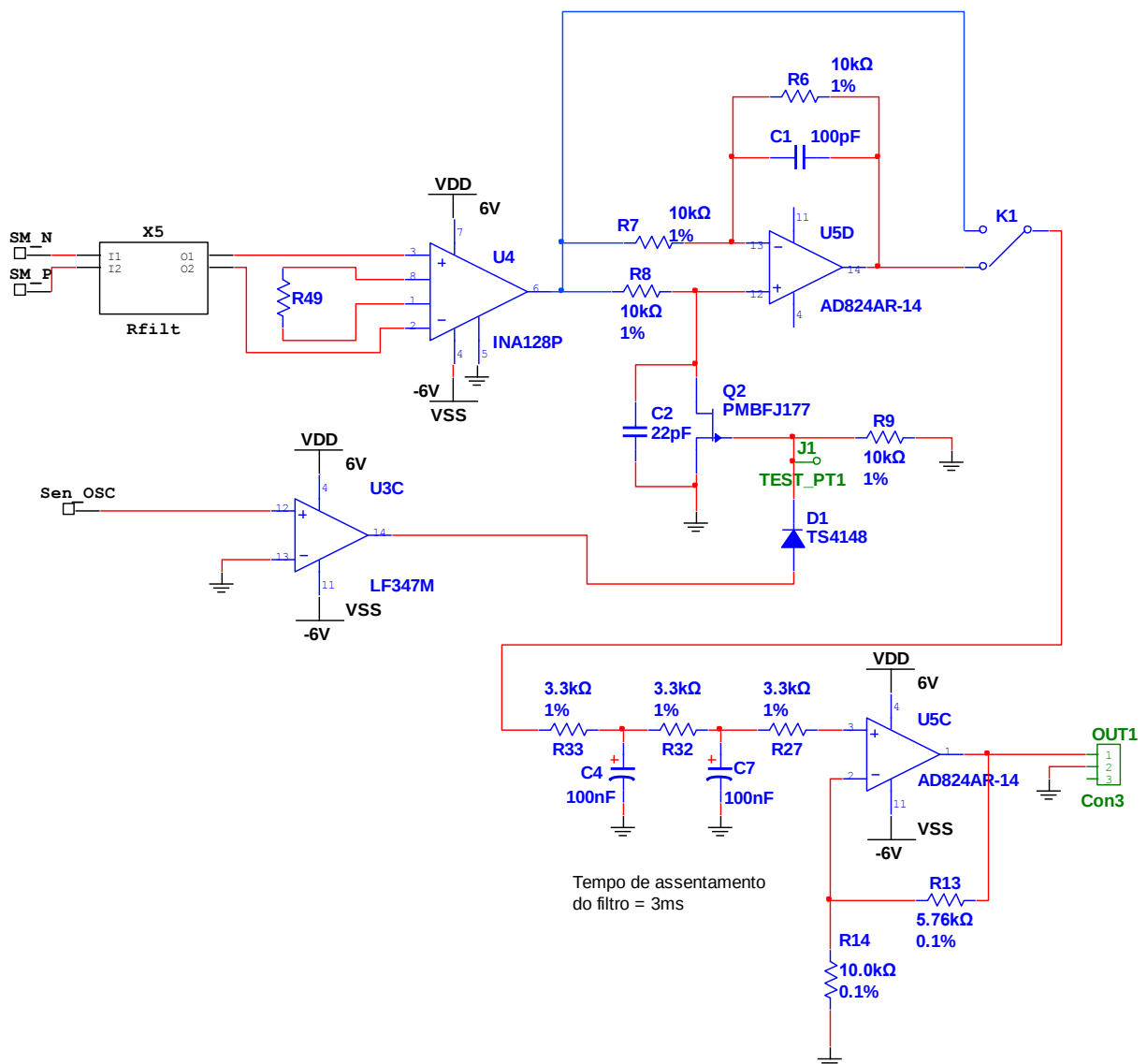


Figura 5.12 - Circuito de amplificação, retificação e filtragem.

No circuito, o ponto de teste *Teste_PT1*, pode ser utilizado, pelo *DSP*, como um sinal de sincronismo e/ou sensor do estado de ligação dos sensores. Neste ponto, o sinal é uma onda quadrada positiva em fase com o sinal senoidal de referência na saída do sensor em questão, cuja tensão varia entre os valores de 0 e aproximadamente $V_{DD}-2$ volts. Caso o sensor não esteja conectado, a tensão de saída neste ponto será de 0 volts.

O sinal proveniente da etapa de retificação passa por um filtro de suavização composto por dois filtros passa-baixas, de um pólo, com frequência de corte 480 Hz. Posteriormente este sinal é amplificado de forma que o sinal de saída se ajuste aos limites do conversor A/D. No projeto em questão o AO U5C está configurado para que o sinal de saída seja igual à tensão de pico na saída do AO U5D.

O circuito de condicionamento de sinais, exceto o oscilador senoidal, foi projetado para ser alimentado com uma tensão de alimentação maior que ± 6 Vdc, e menor que ± 12 Vdc. A tensão na saída do condicionador deve ainda estar dentro dos níveis de tensão do conversor A/D, que recebe um sinal variando de -5V a +5V, como será visto posteriormente. A Figura 5.13 mostra o módulo de condicionamento de sinal desenvolvido destacando seus componentes principais.

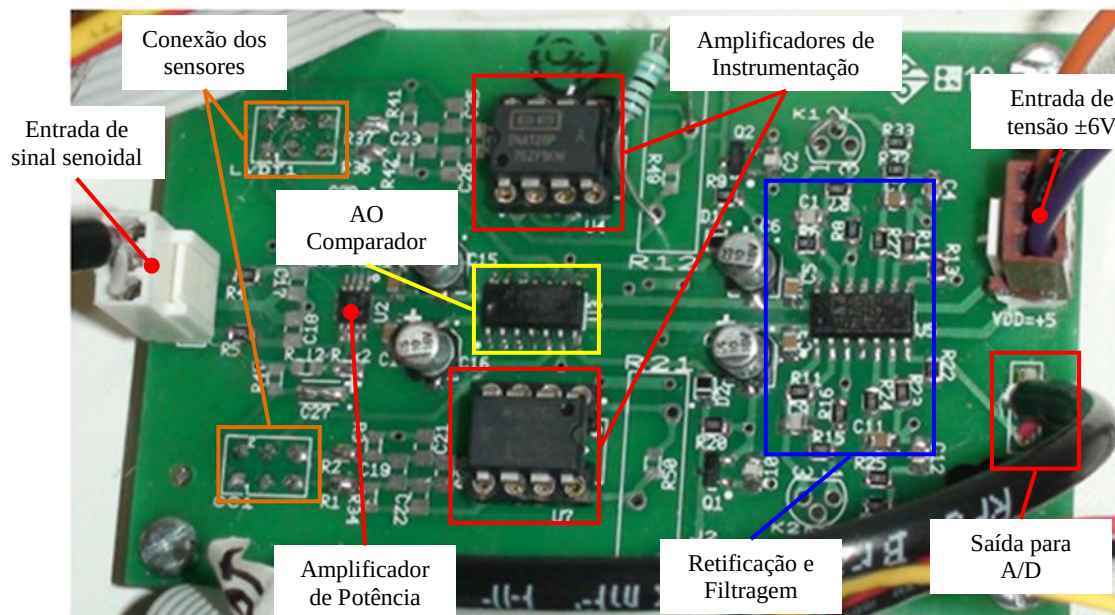


Figura 5.13 - Módulo de condicionamento de sinal.

Módulo Bluetooth

Dentre as diversas tecnologias de transmissão de dados sem-fio existentes, a que mais se adéqua ao projeto é a tecnologia Bluetooth, por apresentar uma banda de transmissão suficiente, baixo consumo de energia e conexão segura.

A maioria dos módulos Bluetooth existentes no mercado permitem a configuração da taxa de transmissão dos dados desde 9,6 kbps a até 2.1 Mbps para módulos com tecnologia EDR (*Enhanced Data Rate*).

O módulo Bluetooth escolhido para realizar a comunicação entre o módulo de controle e o computador foi o KC-5100 da empresa KC Wirefree (KC Wirefree, 2009).

O módulo Bluetooth *KCWirefree* KC-5100 é um módulo para comunicação sem fio que utiliza a especificação *Bluetooth v2.1+EDR*, ele possui uma antena interna com módulo de rádio classe 1. Desta forma o KC-5100 possui limite de alcance de pelo menos 100 metros e oferece uma taxa de transmissão bruta de até 3Mbps. A Figura 5.14 apresenta uma foto do módulo e suas dimensões.

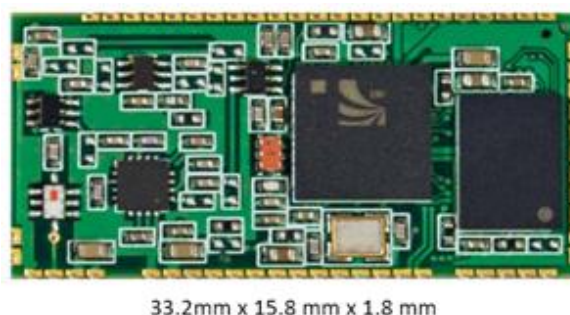


Figura 5.14. Módulo Bluetooth (KC Wirefree, 2009) utilizado para a comunicação wireless entre o hardware de controle e condicionamento e o computador.

As principais características do módulo são (KC Wirefree, 2009):

- Obedece a especificação Bluetooth v2.1+EDR;
- Potência de transmissão de rádio Classe 1, alcance típico maior que 150m;
- Alta taxa de transmissão, até 3Mbps;
- Entradas e saídas programáveis - 20 Digitais, 2 Analógicas;
- Co-Processor DSP de 64 Mips Onboard;
- Saída para antena externa;
- Interfaces USB, UART, SPI, I2S, PCM, e SPDIF.

No sistema desenvolvido, utilizou-se uma taxa de transmissão de 921,6 *kbps*, sendo esta suficiente para transmitir os dados em tempo real.

O módulo KC-5100 recebe as amostras pela interface serial do DSP e as envia por RF ao computador, da mesma forma, o aplicativo em execução no computador pode transmitir os comandos pela interface *Bluetooth* ao KC-5100, que os repassa ao DSP pela interface serial. Assim a comunicação *Bluetooth* é usada para transmitir os dados de configuração e ajuste dos parâmetros do ensaio, além dos dados dos sensores. A Figura 5.15 mostra o diagrama de

ligação do módulo Bluetooth.

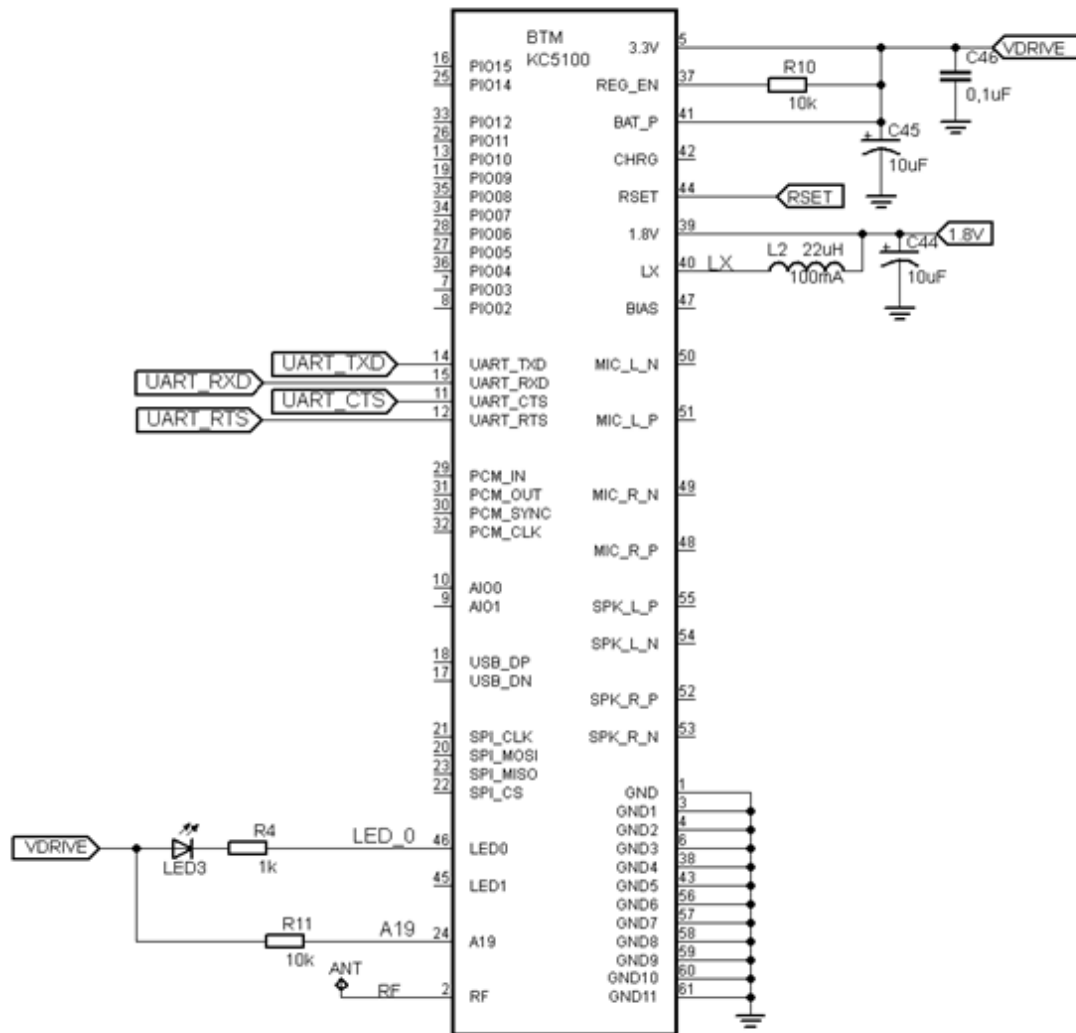


Figura 5.15 - Esquema de ligação do módulo *Bluetooth*.

Processador digital de sinais (DSP)

O DSP é responsável por todo o controle do equipamento, sendo o dispositivo que envia os comandos para iniciar a leitura de força e deslocamento e recebe os valores medidos pelos sensores através da porta SPI do conversor A/D. Por sua interface serial (RS-232) o DSP estabelece comunicação com o controlador dos motores e também com o módulo Bluetooth, através do qual há troca de dados com o microcomputador. Por esta razão o DSP escolhido deve possuir pelo menos duas interfaces seriais ou UARTs.

O DSP escolhido foi o controlador digital de sinais da *Microchip* DSPIC33FJ128MC706 que possui características de microcontrolador associadas ao poder de processamento de um processador digital de sinais. Optou-se pelo emprego deste processador de sinais por sua disponibilidade no mercado nacional e pela presença de periféricos que

atendem ou superam as necessidades do projeto, levando em consideração a possibilidade futura de implementação do controle dos motores diretamente no DSP, sem a necessidade de um *Driver* de controle externo.



Figura 5.16 - Montagem do módulo DSP contendo o DSPIC33FJ128MC706.

Dentre as diversas funcionalidades e características deste processador, podemos destacar (Microchip, 2006):

- Arquitetura: 16-bit;
- Velocidade da CPU (MIPS): 40;
- Tipo de Memória: Flash;
- Memória de Programa (KB): 128;
- RAM Bytes: 16.384;
- Faixa de Temperatura °C: -40 a 85;
- Faixa de Tensão (V): 3-3,6;
- Pinos de E/S: 53;
- Oscilador interno: 7,37 MHz, 512 kHz;
- Periféricos de Comunicação Digital: 2-UART, SPI-2, 2-I2C;
- Periféricos de Captura/Comparação/PWM: 8/8;
- PWM com 16-bit resolução: 16;
- Canais de PWM para controle Motor: 8;
- Interface para Encoder de Quadratura (QE1): 1;
- Temporizadores: 9 x 16 bits 4 x 32 bits;
- DMA: 8.

A Figura 5.16 apresenta o módulo desenvolvido contendo o DSPIC33FJ128MC706 e o hardware mínimo para seu funcionamento.

5.2.2. Placa Principal

A placa principal é responsável por interligar os diversos módulos, nela estão localizados o Conversor A/D, uma interface para cartão SD, para o armazenamento dos dados do ensaio, um regulador de tensão de 3,3Vdc, responsável por energizar os módulos que serão conectados à mesma, além dos pinos para conexão dos módulos já mencionados. A Figura 5.17 apresenta a placa principal com suas conexões, módulos instalados e interfaces.

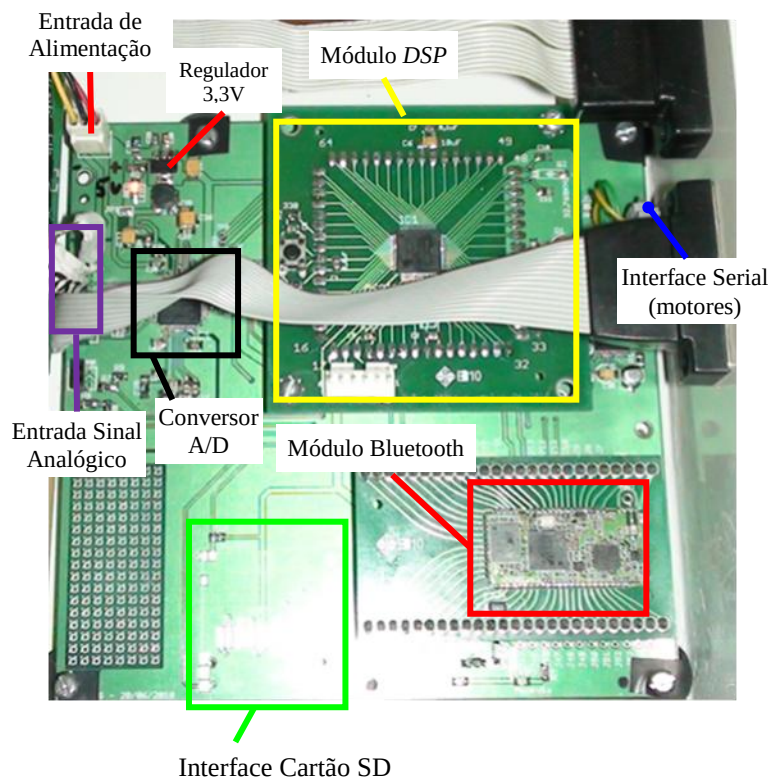


Figura 5.17 - Placa principal e suas conexões

Conversor A/D

O sistema de conversão A/D é o responsável pela transformação dos sinais analógicos provenientes dos sistemas de condicionamento em sinais digitais, prontos para serem processados pelo DSP. O CI escolhido para a conversão A/D foi o AD7656 da Analog Devices cujas principais características são (ANALOG DEVICES, 2010):

- 6 conversores A/D independentes;
- Entradas analógicas bipolar;
- Faixas de conversão de ± 10 V ou ± 5 V selecionadas por Hardware ou software;
- Taxa de amostragem de até 250 kSPS;
- Baixo consumo de potência: 140 mW a 250 kSPS em fonte de 5 V;
- Largura de banda de entrada ampla: SNR 86.5 dB a 50 kHz de frequência de

entrada;

- Buffers de referência e referência *on-chip*;
- Interfaces paralela e serial de alta velocidade: SPI[®]/QSPI[™]/MICROWIRE[™]/DSP-compatível;
- Consumo máximo em modo de espera de 100 μ W.

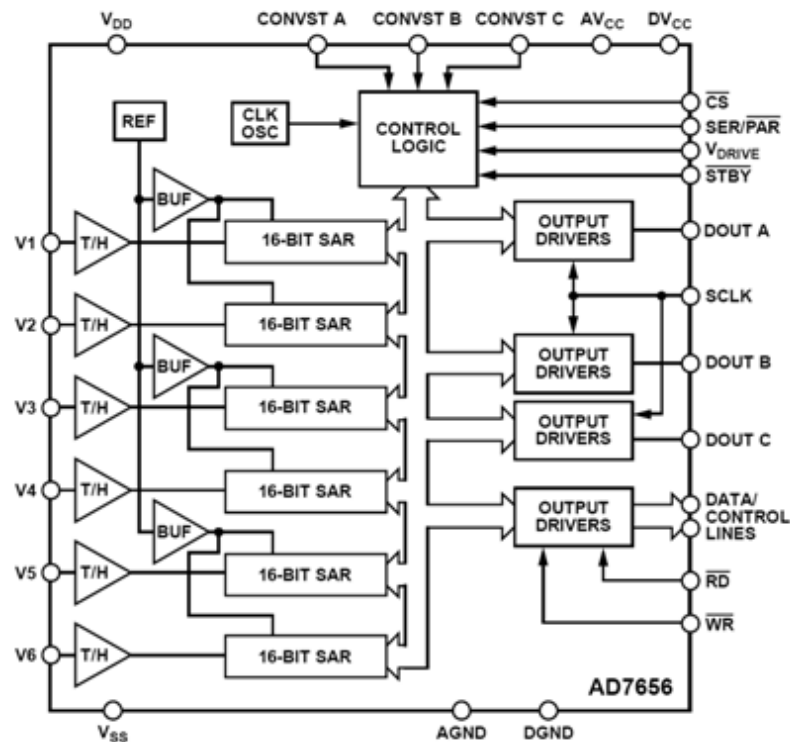


Figura 5.18 - Diagrama de blocos funcional do conversor A/D (ANALOG DEVICES, 2010).

O AD7656 contém seis conversores analógico/digitais (ADC) por aproximação sucessivas (SAR) de 16 bits em um único encapsulamento. Ele oferece taxas de transferência de até 250 kSPS, tem baixo nível de ruído, ampla largura de banda e amplificadores *Track-and-Hold* que podem lidar com frequências de entrada de até 12 MHz. A Figura 5.18 mostra o diagrama de blocos do conversor A/D apresentando suas principais interfaces e pinos de controle.

O processo de conversão e aquisição de dados é controlado através do sinal CONVST e um oscilador interno. Três pinos CONVST permitem a amostragem independente e simultânea dos três pares de ADC. O AD7656 tem interface paralela e serial de alta velocidade possibilitando a comunicação com microprocessadores ou DSPs. No modo de interface serial, o dispositivo tem uma característica cascadeável permitindo que múltiplos ADCs se conectem a uma única interface serial. O AD7656 pode acomodar sinais de entrada

bipolares na faixa de $\pm 4 \times V_{REF}$ e na faixa de $\pm 2 \times V_{REF}$, e também contém uma de referência de 2,5 V *on-chip*.

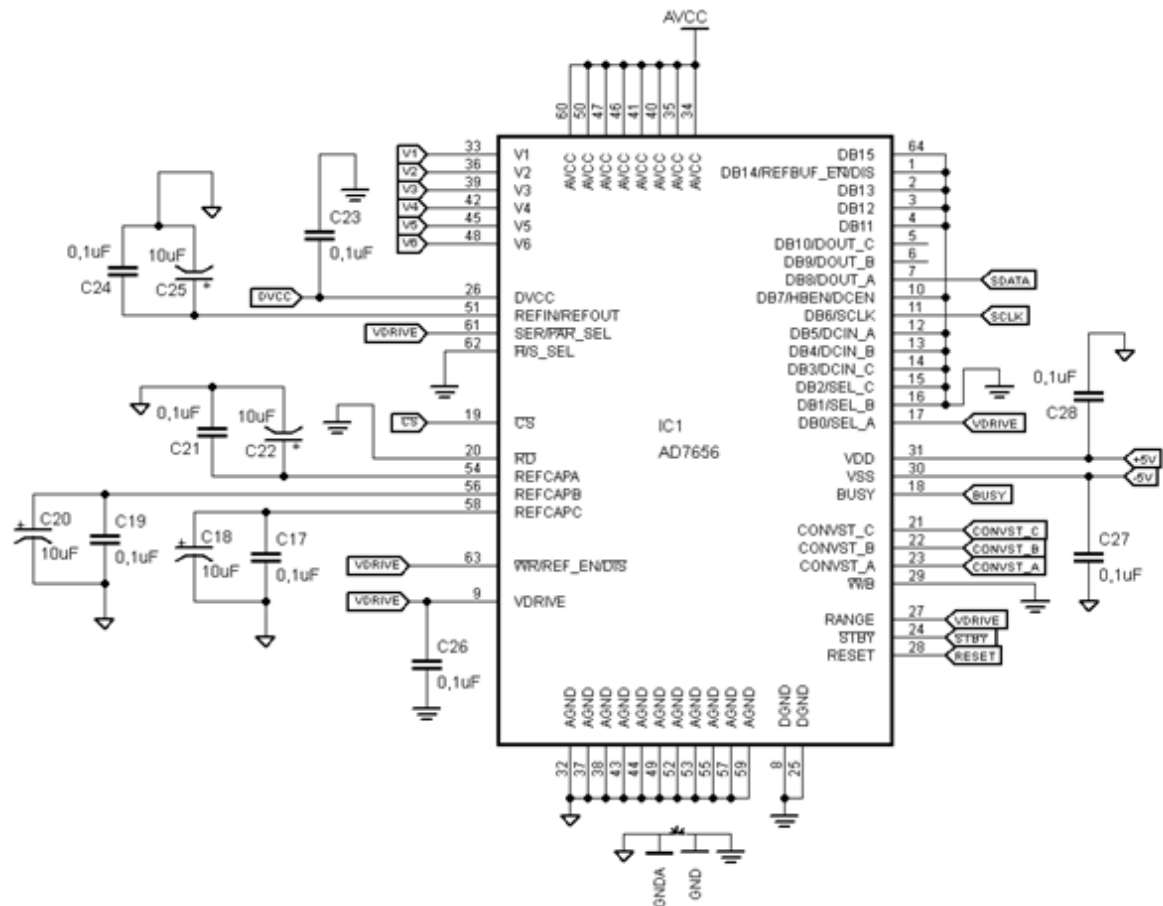


Figura 5.19 - Diagrama de ligação simplificado do conversor A/D.

Neste projeto são necessários apenas dois canais para amostrar os dados de carga e deslocamento. Assim, somente o pino “CONVST_A” seria necessário para amostrar estes dados, no entanto para possibilitar uma utilização futura, os outros pinos CONVST também foram ligados ao DSP permitindo eventualmente que todos os canais sejam utilizados. Cada vez que o sinal CONVST_A é colocado em nível alto, o conversor inicia o processo de conversão dos canais V1 e V2 simultaneamente e assim que estiver concluído ele envia o resultado da conversão ao DSP via interface SPI.

O conversor está configurado via *hardware* para amostrar valores variando entre ± 5 V e comunicação em modo serial através da interface SPI, utilizando apenas os pinos DOUTA, SCLK e $\overline{CS}$ para comunicação com o DSP, reduzindo a complexidade de implementação do hardware.

A Figura 5.19 mostra o diagrama de ligação simplificado do conversor A/D (o diagrama completo de ligação está apresentado no anexo I).

5.3. Desenvolvimento do software

O software utilizado pelo sistema é composto basicamente por dois blocos, o software ou firmware de controle que roda no DSP, responsável por controlar o ensaio, coletar os dados e enviar ao PC, e o software do computador host, que envia os parâmetros de configuração do ensaio ao DSP, ordena o início do ensaio e recebe os dados do ensaio para armazenamento e análise.

5.3.1. Software de controle

O fluxograma da Figura 5.20 descreve o funcionamento do firmware projetado para ser executado no DSPIC33FJ128MC706 e realizar as tarefas de controle do ensaio.

Seqüência de ensaio, conforme diagrama apresentado na Figura 5.20:

A. Instruções iniciais

O ensaio é iniciado com algumas instruções e procedimentos que o operador deve seguir, tais como preparar a superfície de ensaio, verificar se as unidades de *hardware* estão energizadas e conectadas e dar início ao ensaio.

B. Configurações

A configuração das unidades de *hardware* se dá na seguinte seqüência:

- i. inicialização da comunicação entre os módulos e o computador host;
- ii. ajuste de parâmetros iniciais para o motor; e
- iii. calibração dos sensores.

Nesta etapa são ajustadas as configurações de inicialização do módulo Bluetooth e dos valores iniciais para os parâmetros do motor (velocidade, aceleração, desaceleração, corrente, definição de micropassos por revolução), bem como é feita a configuração do conversor A/D para receber os sinais dos sensores.

Para facilitar a operação do equipamento, esta configuração pode ser realizada automaticamente, com parâmetros pré-estabelecidos (*default*).

C. Recuar Penetrador até home

O penetrador é deslocado para a posição "home", o que equivale ao atuador linear totalmente recuado até atingir o fim de curso superior. Este procedimento é realizado para se definir a posição inicial de referência para o ensaio.

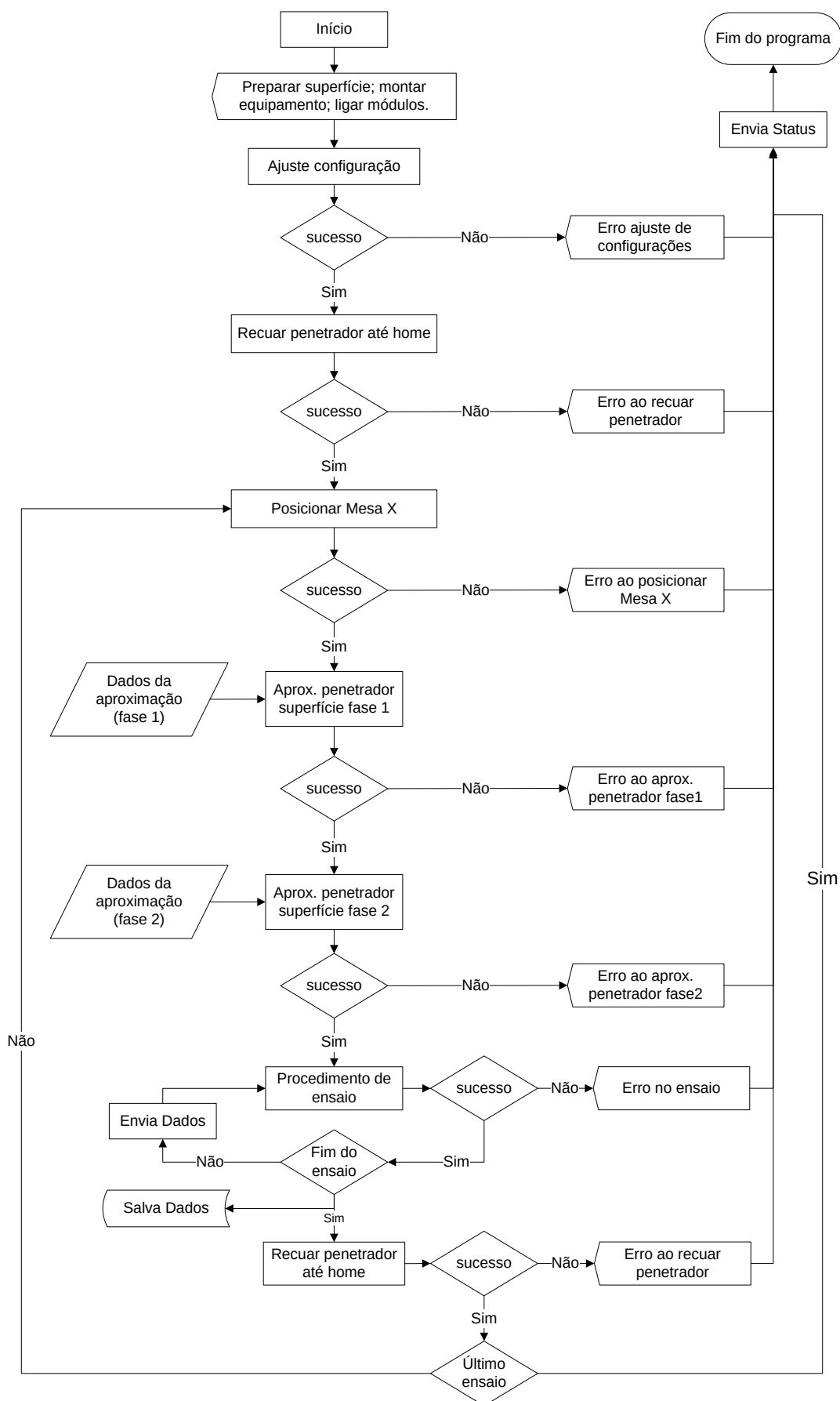


Figura 5.20- Fluxograma da unidade de software responsável pelo ensaio.

D. Posicionar Mesa X

A Mesa X é deslocada até atingir o fim de curso lateral, definido como posição inicial de referência, e posteriormente é posicionada automaticamente até o local onde será realizado o primeiro ensaio, distribuindo uniformemente os pontos de ensaio na região central da Mesa X, de acordo com as configurações pré-estabelecidas.

E. Detecção da superfície

O processo de detecção da superfície ocorre em 2 fases distintas. Como pode ser visto na Figura 5.21, existe uma distância de $1,5\text{ mm}$ entre a ponta do penetrador e a ponta do sensor de deslocamento. Esta montagem faz com que o sensor de deslocamento sempre toque a superfície antes do indentador. Assim a aproximação da superfície é feita na seguinte sequência.

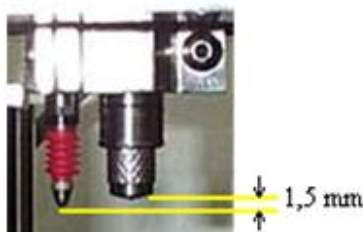


Figura 5.21 - Disposição do sensor de deslocamento e do penetrador.

i. Fase 1 de aproximação

Nesta etapa, o penetrador é deslocado a uma velocidade de 100 mm/min , em passos de $0,75\text{ mm}$, até que o sensor de deslocamento toque a superfície. Este toque é detectado através do monitoramento do deslocamento. Este deslocamento de $0,75\text{ mm}$, igual à metade da "folga" entre a ponta do sensor e o penetrador, evita que seja realizado qualquer indentação nesta fase.

ii. Fase 2 de aproximação

Nesta segunda fase de aproximação o penetrador é deslocado com uma velocidade de 300 mm/min e com passos de $0,005\text{ mm}$, até que o mesmo toque a superfície. Este toque é detectado através do monitoramento da carga. Esta resolução de passos foi definida considerando que ao aproximar o penetrador da superfície, o mesmo poderá indentar o material com uma profundidade de no máximo $0,005\text{ mm}$.

F. O ensaio

F1 - Ajuste dos parâmetros do motor

Nesta etapa são ajustados os valores para o ensaio dos parâmetros do motor (velocidade, aceleração, desaceleração, corrente, definição de micropassos por revolução)

F2 - Execução

i - Definição do ponto inicial

Os valores lidos dos sensores, na situação de repouso após os processos acima, com a fase 2 de aproximação completada, serão então utilizados para definir os valores de "zero" para deslocamento e carga.

Estes valores são armazenados em variáveis e definem o ponto inicial P_{t0} da curva carga *versus* deslocamento (Figura 5.22).

ii - Carregamento de um ciclo

O carregamento se inicia a partir do ponto P_{t0} da curva da Figura 5.22. O motor se movimenta em direção à superfície monitorando-se o crescente aumento na carga aplicada e na profundidade de indentação. Estes valores são lidos e o carregamento é interrompido quando a carga aplicada atingir o valor máximo para o ciclo em questão (P_{t1a}).

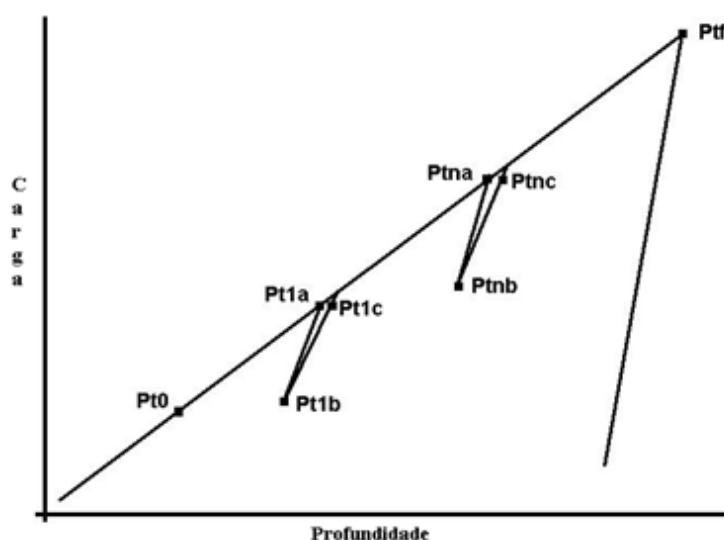


Figura 5.22 - Curva característica de um ensaio de macroindentação, destacando os pontos mais importantes para início dos cálculos das propriedades mecânicas.

iii - Descarregamento de um ciclo

O descarregamento se inicia a partir do ponto P_{t1a} da curva da Figura 5.22. O motor movimenta-se no sentido contrário, enquanto ocorre a diminuição dos valores de carga e deslocamento. Estes valores são lidos durante todo o processo e o mesmo é finalizado quando se atinge a porcentagem de descarregamento desejada (P_{t1b}).

iv - Recarregamento

As seqüências de carregamento (ii) e de descarregamento (iii) de um ciclo repetem-se até que se complete a quantidade de ciclos definida.

v - Descarregamento final

O descarregamento final tem seu início no ponto P_{tf} da Figura 5.22. O motor é recuado até que o valor de carga lido aproxime-se de zero (P_{t0}).

G. Recuo do penetrador

O motor é deslocado para a sua posição inicial (home).

H. Armazenamento dos dados

Os dados armazenados em arquivo, após o ensaio ser completado, são: todos os valores de carga e deslocamento adquiridos durante o ensaio, os pontos nos quais ocorrem inversão do movimento e os dados gerais do ensaio (descrição, data, operador etc).

I. Finalização do Ensaio

Caso o número de ensaios realizados seja igual à quantidade de ensaios predeterminadas o ensaio é finalizado. Caso contrário outro ensaio é iniciado (item D).

5.3.2. Software do Computador Hospedeiro

O software principal executado no computador hospedeiro, responsável pela configuração do dispositivo remoto, aquisição e análise dos dados, foi desenvolvido para a plataforma Windows XP. A ferramenta escolhida para o desenvolvimento do software foi o C#, por apresentar uma ampla documentação, ser uma linguagem bastante conhecida e utilizada pela equipe do laboratório, além de fazer parte da Framework .Net[®], a qual está sendo amplamente difundida e apresenta um grande suporte para desenvolvedores em ambiente Windows[®].

Ferramentas de Configuração

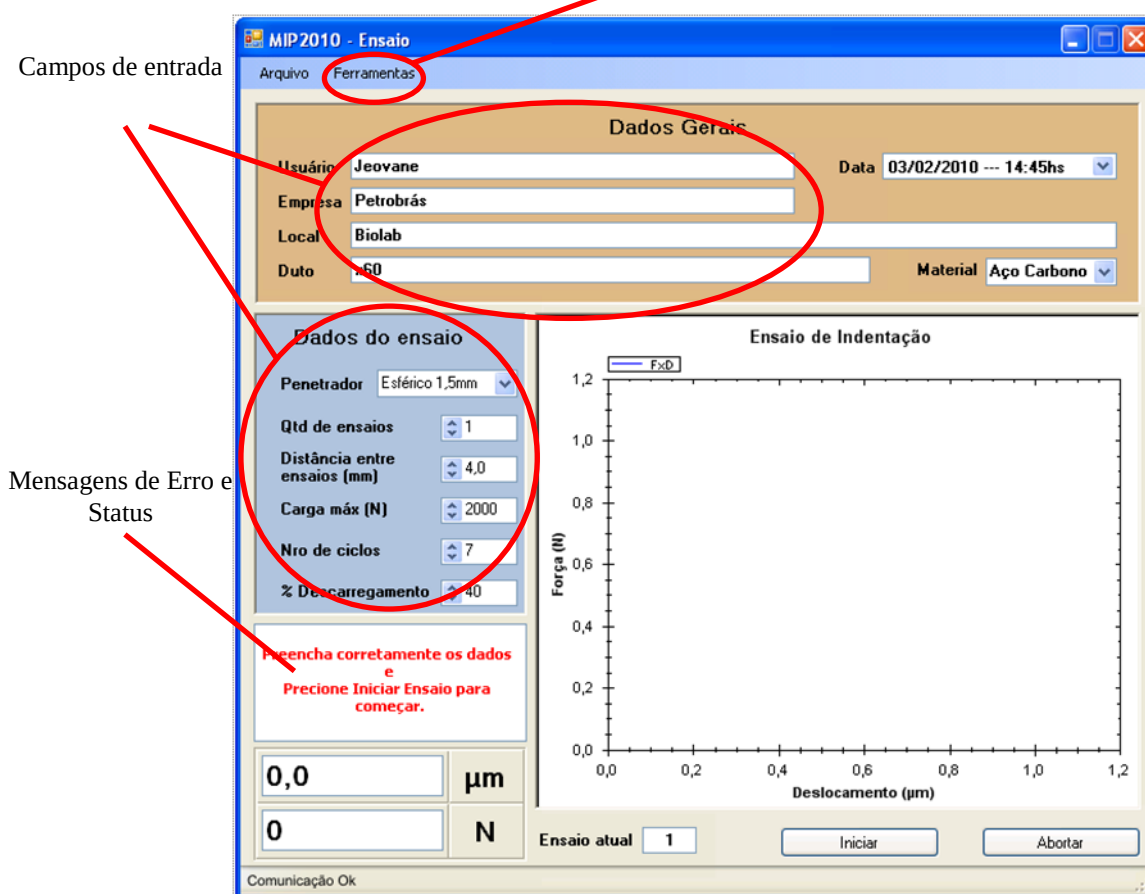


Figura 5.23 - Interface principal da unidade de execução de ensaios.

Para execução do ensaio, o usuário deve definir os seguintes parâmetros:

- Quantidade de ensaios: quantidade de ensaios a serem executados ao longo do eixo do duto;
- Distância entre ensaios: distância em milímetros entre cada um dos ensaios definidos no campo acima;
- Carga máxima (N): máxima carga de indentação;
- Número de ciclos: quantidade de ciclos de descarregamento (parciais e final) a serem executados durante o ensaio; e
- Percentual de descarregamento para cada ciclo definido acima.

A Figura 5.23 apresenta a interface principal da unidade de realização de ensaio executada no computador host, nesta interface além de definir os parâmetros do ensaio o usuário pode ainda cadastrar dados associados à operação em questão (empresa, local, duto e tipo de material a ser ensaiado) e monitorar o andamento do ensaio através do gráfico, cuja escala se adequa automaticamente aos valores medidos.

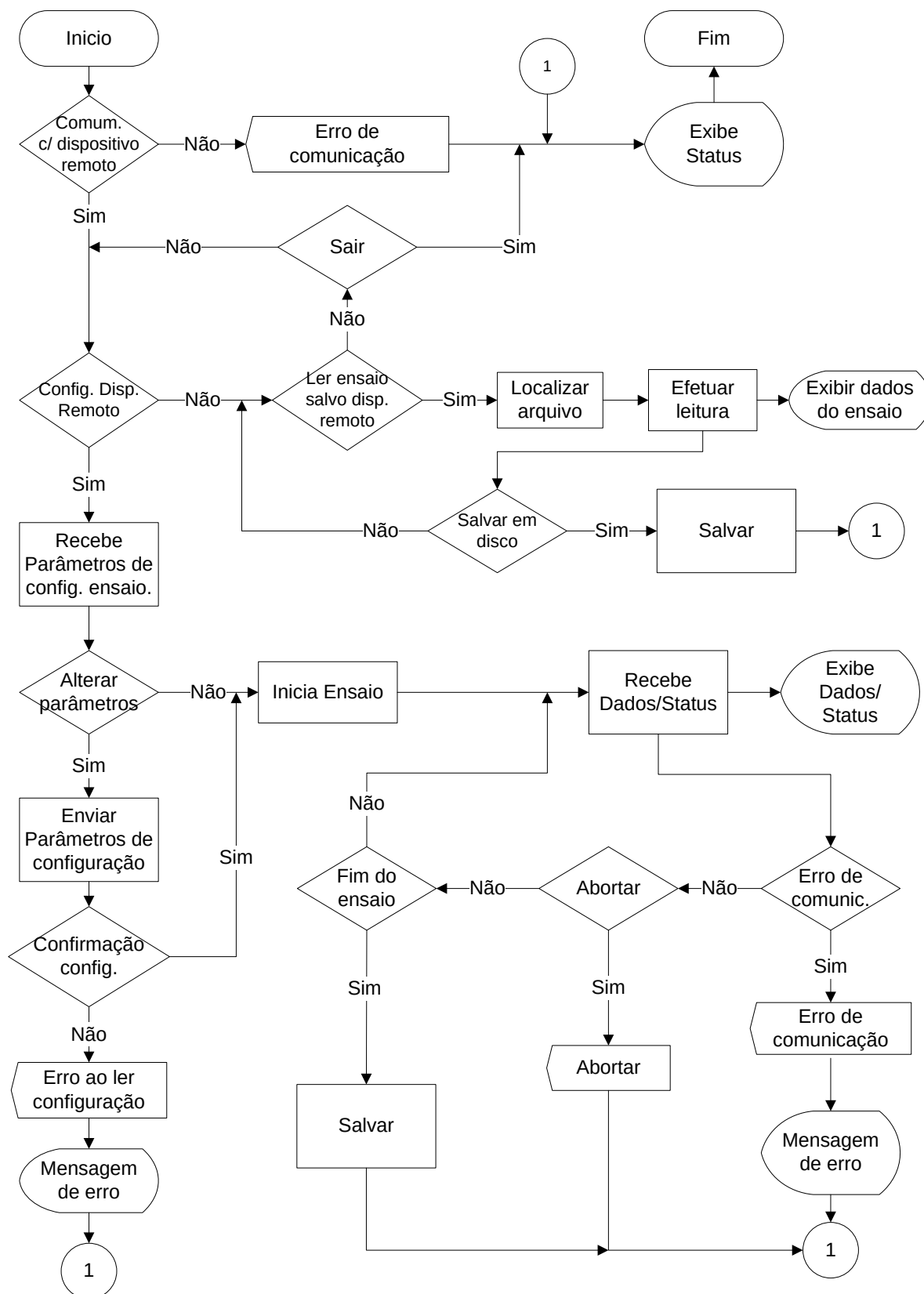


Figura 5.24 - Fluxograma do software do computador Host.

Uma vez definidos os parâmetros do ensaio, o usuário deve pressionar o botão “Iniciar” para dar andamento ao processo. Durante a execução de cada ensaio, a interface

apresenta a evolução da curva Força *versus* Profundidade de Indentação e os respectivos valores instantâneos.

Encerrado o ensaio, o sistema grava automaticamente os dados num arquivo previamente definido pelo usuário.

O menu ferramentas abriga as ferramentas de configuração dos motores e as configurações da conexão.

A Figura 5.24 mostra o fluxograma do software desenvolvido para o computador host.

Quando iniciado, o programa verifica a comunicação com os módulos de transmissão e recepção. Caso a comunicação não seja possível, a execução do programa é interrompida.

Se nenhum erro de comunicação acontecer, o usuário tem a opção de carregar algum ensaio salvo no dispositivo remoto para visualização e/ou salvamento no computador host, ou configurar o dispositivo remoto para o ensaio.

Nesta etapa tem-se a opção de alterar os valores dos parâmetros para o ensaio, já descritos anteriormente, ou utilizar os parâmetros já salvos no dispositivo remoto.

Quando o ensaio é iniciado todo o controle do equipamento é passado para o dispositivo remoto que é responsável por executar o ensaio conforme os parâmetros configurados, a partir daí o computador host opera somente como uma interface para a visualização dos dados. Caso algum imprevisto ocorra durante o ensaio o usuário tem a opção de enviar o comando “Abortar” para o dispositivo remoto, no entanto, este comando só será atendido se não houver falha de comunicação entre eles, caso contrário o ensaio deve ser abortado manualmente desligando-se o equipamento remoto. Caso ocorra algum erro de comunicação durante o ensaio o computador host envia uma mensagem de erro ao usuário e finaliza o monitoramento, passando o ensaio a ser controlado exclusivamente pelo equipamento remoto até a finalização total do mesmo, ou abortamento manual. Se nenhum erro ocorrer o ensaio prossegue normalmente até o final, com posterior armazenamento dos dados do ensaio em arquivo para análises.

5.4. O protótipo

O protótipo construído é composto pelos módulos de condicionamento, Bluetooth, DSP e pela placa principal.

O protótipo completo possui as seguintes características:

- Chave liga-desliga;
- Led indicador de alimentação na placa principal;

- Transformador de tensão externo de 9+9 Vca @ 250mA;
- Interface de conexão para os sensores de deslocamento e célula de carga;
- Interface RS232 para conexão com os motores e atualização de firmware;
- Interface Bluetooth para comunicação de dados sem-fio.

As Figuras de 5.25 a 5.29 exibem as placas desenvolvidas antes e após a montagem, suas dimensões e o protótipo final após a montagem.

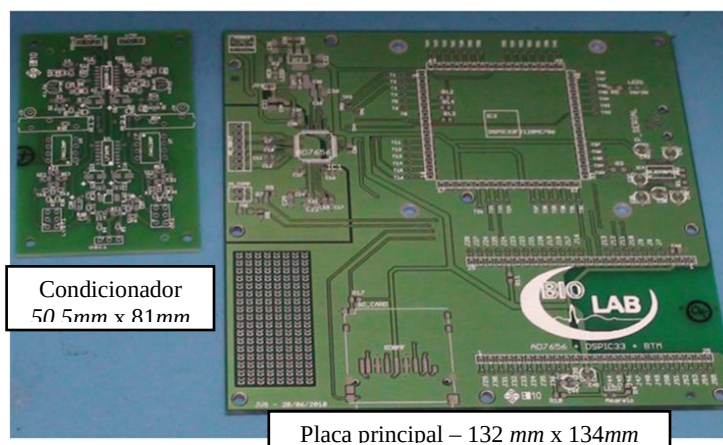


Figura 5.25 - Dimensões das principais placas desenvolvidas.

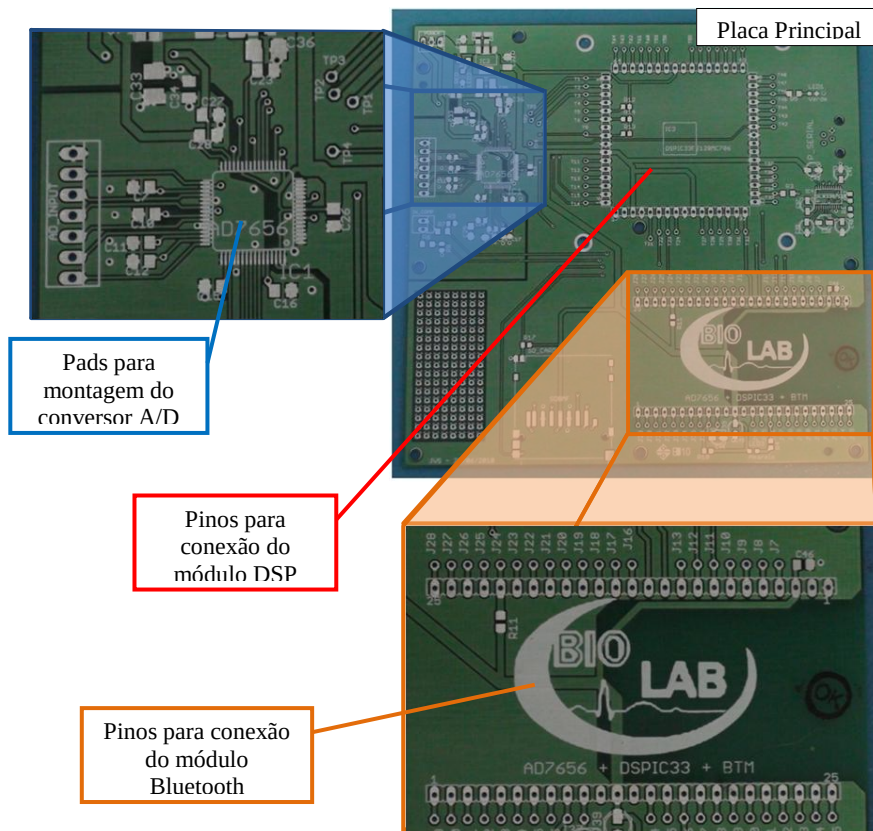


Figura 5.26 - Placa principal antes da montagem e suas principais conexões.

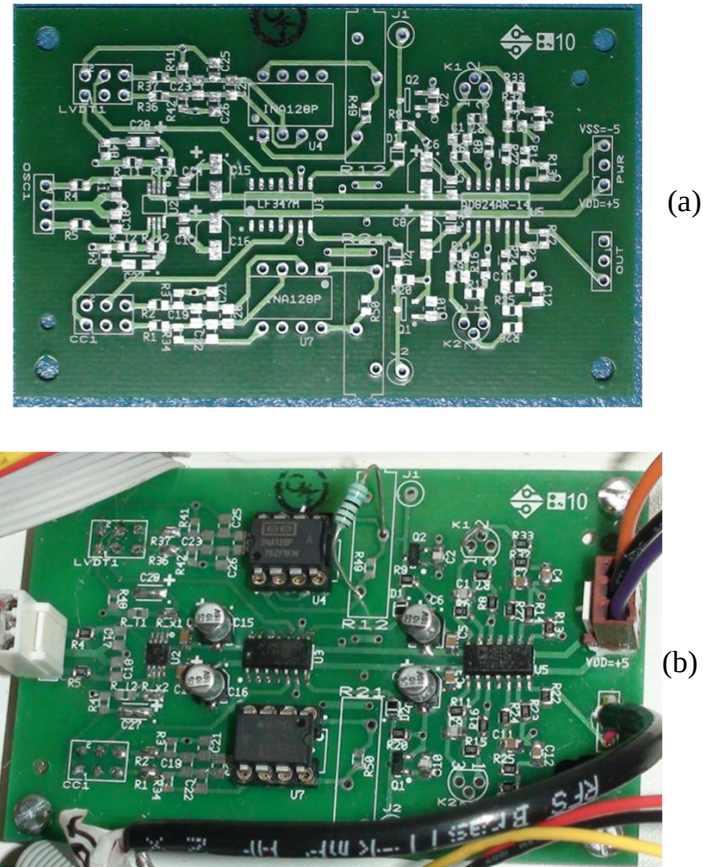


Figura 5.27 - (a) Condicionador de sinais antes e (b) depois da montagem dos componentes.

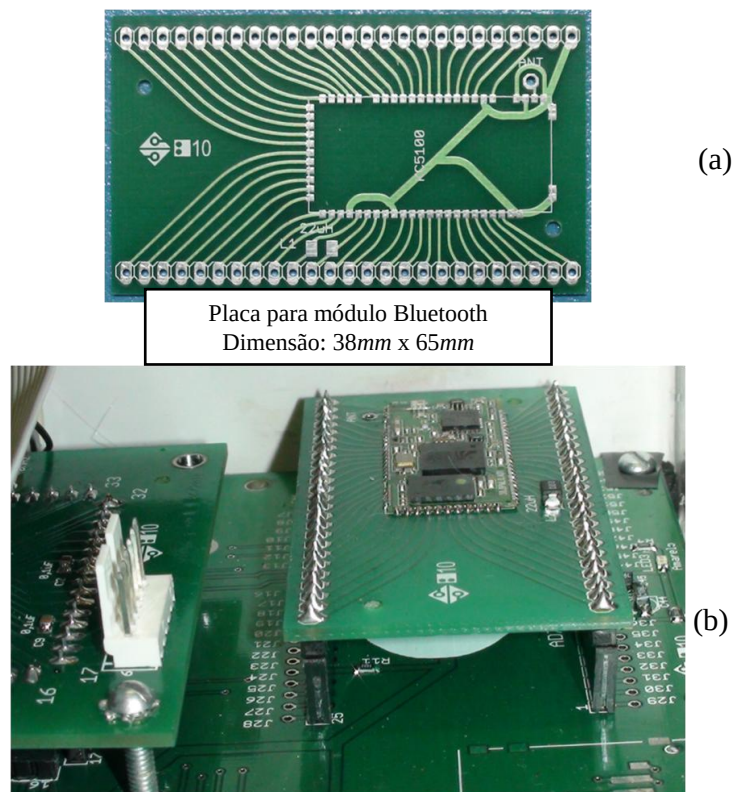


Figura 5.28 - Adaptador para módulo Bluetooth: antes (a) e depois da montagem da montagem dos componentes (b).

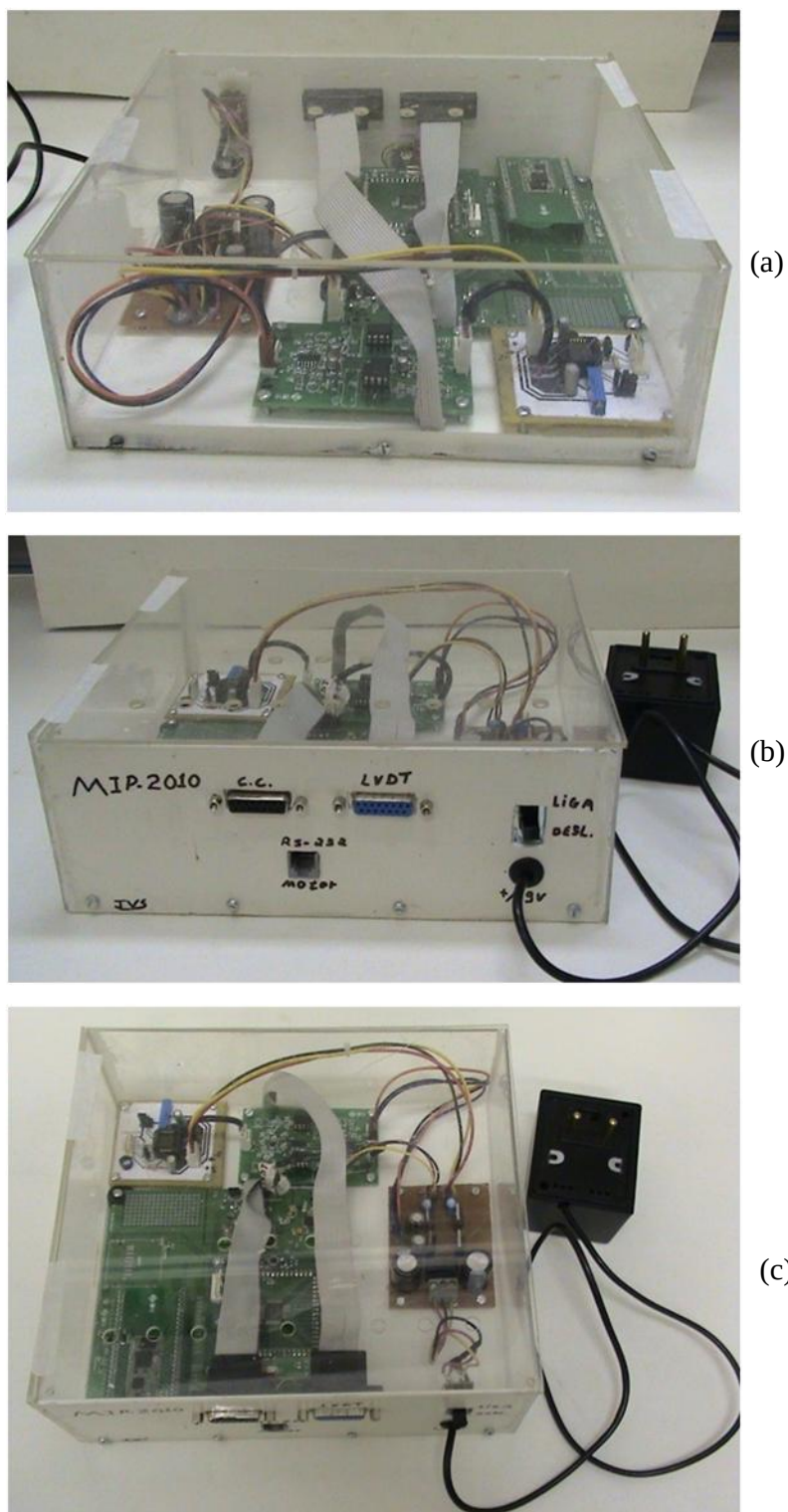


Figura 5.29 - Montagem final do protótipo. (a) - vista frontal. (b) - vista traseira. (c) - vista superior.

Para garantir a fidelidade dos dados coletados pelo sistema, este foi submetido a diversos testes de avaliação, cujos resultados são descritos no capítulo 6.

Capítulo 6.

Experimentos e avaliações

6.1. Introdução

Para avaliar a fidelidade do processo condicionamento e aquisição de sinais, bem como a confiabilidade do sistema de transmissão, definiu-se uma série de experimentos a serem realizados:

- Transmissão de um sinal emulado, com o objetivo de avaliar a confiabilidade do sistema de transmissão;
- Aquisição de sinais produzidos por um gerador de sinais, de modo a avaliar a fidelidade do processo de captura dos sinais;
- Análise do sinal proveniente do sistema de condicionamento quando aplicado um sinal senoidal conhecido em sua entrada, para avaliar a resposta do sistema a este tipo de sinal; e
- Aquisição de sinais provenientes dos sensores, para avaliar a resposta geral do sistema comparando com valores de referência.

Para os experimentos foram utilizados os seguintes materiais:

- Gerador de sinais Agilent 33120A;
- Multímetro digital Agilent 34401A;
- Módulo de condicionamento de sinais;
- Sensores de Carga e deslocamento;
- Módulo de Aquisição e Controle;
- Programa de teste, feito utilizando a plataforma de programação Labview®;
- Computador hospedeiro com o programa de teste instalado;
- Sistema de aquisição de sinais HBM Spider8®; e
- Osciloscópio digital Tektronix modelo TDS 1002.

6.2. Avaliação do sistema de transmissão

Para avaliar a confiabilidade do processo de transmissão, foi implementado no DSP um programa que transmite ao computador host, sempre que requisitado, um sinal em rampa conhecido (Figura 6.1a). No computador hospedeiro, foi implementado um programa de teste responsável por requisitar o envio do sinal padrão e comparar os dados recebidos com o valor que deveria ter sido recebido de forma a identificar possíveis erros de transmissão e perda de pacotes de dados. Cada pacote de dados contém dois números de 16 bits representando um valor de zero até 0xFFFF em hexadecimal. Para o experimento foi requisitada uma transmissão de 5 minutos, considerando que o tempo médio do ensaio é de 5 a 6 minutos, (equivalente a 1.500.000 pacotes de dados), com o módulo transmissor a 15 metros do receptor do computador hospedeiro, com obstáculos (mobiliário), e um *hotspot Wi-Fi* próximo, operando na mesma faixa de frequência. Os resultados obtidos foram:

- Perda de dados: Não houve perda de pacotes
- Erro de transmissão: Nenhum pacote foi entregue com erros.

O resultado do experimento pode ser observado na Figura 6.1:

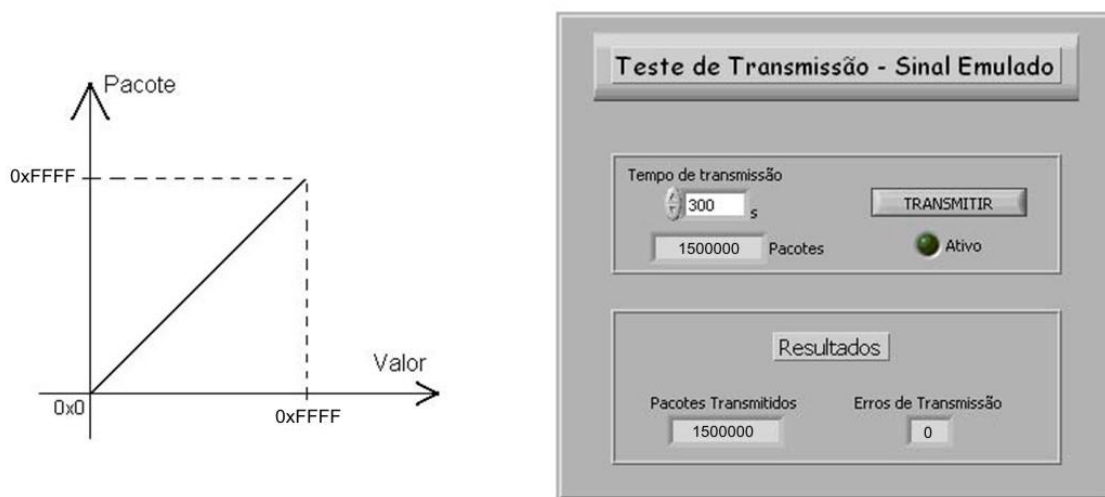


Figura 6.1 - a) Sinal em rampa utilizado b) Interface do programa com resultados do experimento.

A partir destes resultados, pode-se afirmar que o sistema apresenta boa confiabilidade, não apresentando perda de informação durante o teste no ambiente avaliado.

6.3. Avaliação dos sistemas de condicionamento e aquisição

Para avaliar a fidelidade do processo de aquisição, foram utilizados sinais senoidais provenientes de um gerador de função, os quais foram amostrados pelo protótipo e analisados com o intuito de verificar se os mesmos condiziam com os sinais esperados.

Os sinais utilizados para avaliação dos circuitos de aquisição foram senóides com frequências variando de 0 a 500Hz e amplitudes de 0,100 a 4,000 Vpp.

O ensaio foi realizado conectando-se o gerador de sinais aos dois canais do protótipo, colocando o mesmo a uma distância de 15 metros do computador host. O sinal foi amostrado a uma taxa de 5000 amostras por segundo.

O procedimento de teste segue as seguintes etapas:

- Conectar o módulo de recepção Bluetooth ao computador hospedeiro;
- Programar o gerador de função para as ondas descritas anteriormente;
- Ligar o protótipo;
- Inicializar o programa principal de teste;
- Ajustar os parâmetros do módulo de aquisição através do programa principal;
- Iniciar a aquisição e envio dos dados coletados; e
- Armazenar e comparar os dados.

Foi estabelecido um tempo de teste de 5 segundos. Este tempo é suficiente para capturar um bom número de ciclos de cada frequência estudada.

Para cada frequência de teste utilizada variou-se a tensão de pico a pico indicada no gerador de funções e anotou-se os valores apresentados pelo programa de teste. A Tabela 6.1 apresenta um resumo das frequências estudadas e dos resultados encontrados.

Tabela 6.1 – Resultado dos testes com o gerador de sinais

Amplitude Frequência	100m Vpp	1,5 Vpp	4 Vpp
0 Hz	0 Hz – 110m Vpp	0 Hz – 1,5 Vpp	0 Hz – 4 Vpp
20 Hz	19,78 Hz – 105mVpp	19,9 Hz – 1,5 Vpp	20,2 – 4 Vpp
200 Hz	200,8 Hz – 108mVpp	200 Hz – 1,48 Vpp	200,9 Hz – 3,9 Vpp
500 Hz	498,8 Hz – 99mVpp	499,7 Hz – 1,5 Vpp	500,8 Hz – 4 Vpp

A Figura 6.2 mostra a interface do aplicativo após a execução de um teste. Pode-se perceber pela figura que os valores obtidos pelo sistema estão muito próximos dos valores

medidos pelo osciloscópio, mostrado na Figura 6.3, as diferenças podem ser atribuídas ao uso de pontas de prova do osciloscópio, diferenças de resolução entre os sistemas digitais do osciloscópio e do equipamento, entretanto, qualquer diferença pode ser corrigida por meio da calibração do hardware/software por meio de outros testes, como descrito posteriormente.

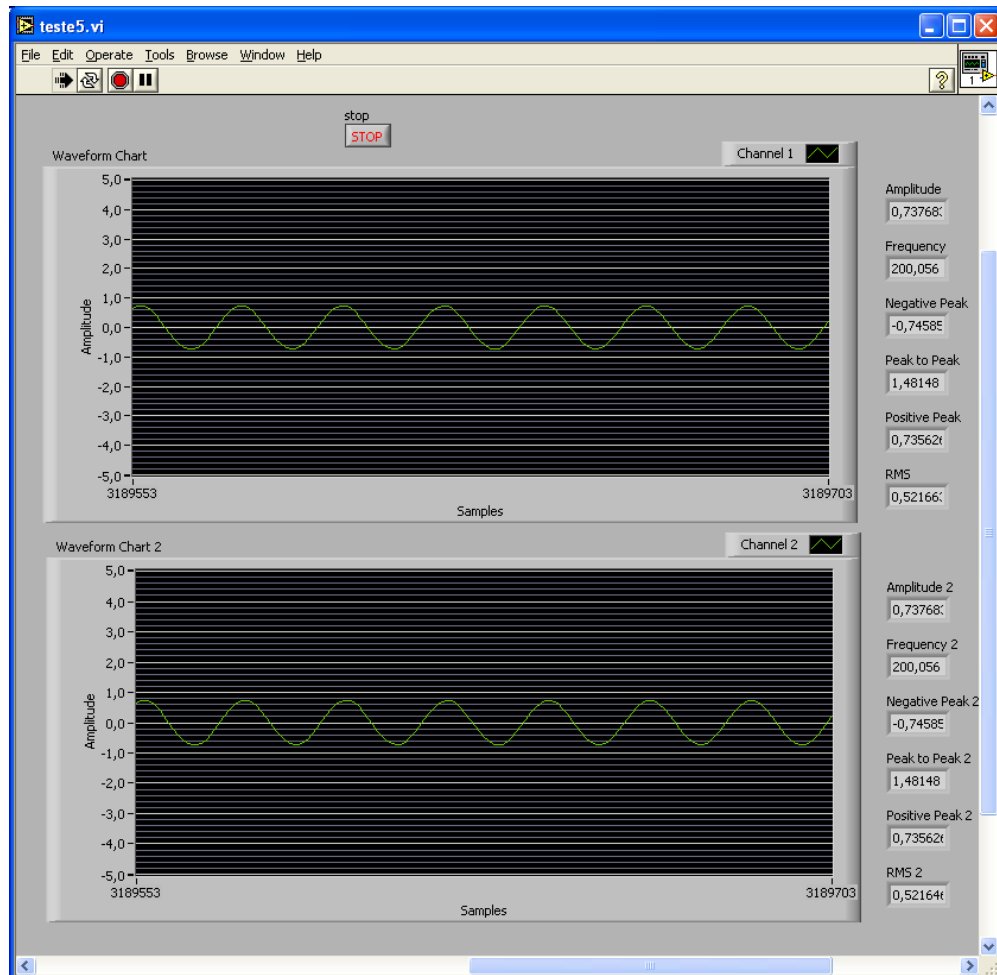


Figura 6.2 - Interface de aquisição do software de teste, exibindo os resultados da coleta do sinal em 200Hz

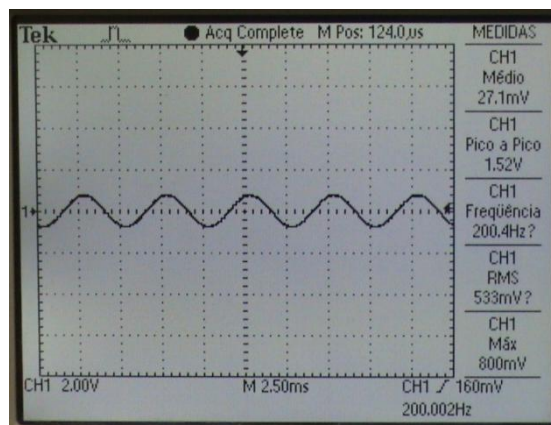


Figura 6.3 - Exibição dos resultados da coleta do sinal em 200Hz obtidos pelo osciloscópio.

Através dos resultados obtidos pode-se avaliar que o sistema apresenta uma boa coerência entre os dados amostrados e os valores reais.

6.3.1. Análise do sistema de condicionamento com um sinal senoidal

Para análise do sistema de condicionamento de sinais, foram injetadas tensões senoidais à entrada do amplificador de instrumentação, a fim de avaliar a amplificação de entrada necessária e o desempenho do sistema de condicionamento.

A Figura 6.4 mostra o esquema da montagem do teste, nela são apresentadas as formas de onda em cada estágio e suas respectivas equações, nas quais $V_{in(RMS)}$ é o valor da tensão RMS de teste na entrada do sistema, G e K são constantes que representam os ganhos dos amplificadores.

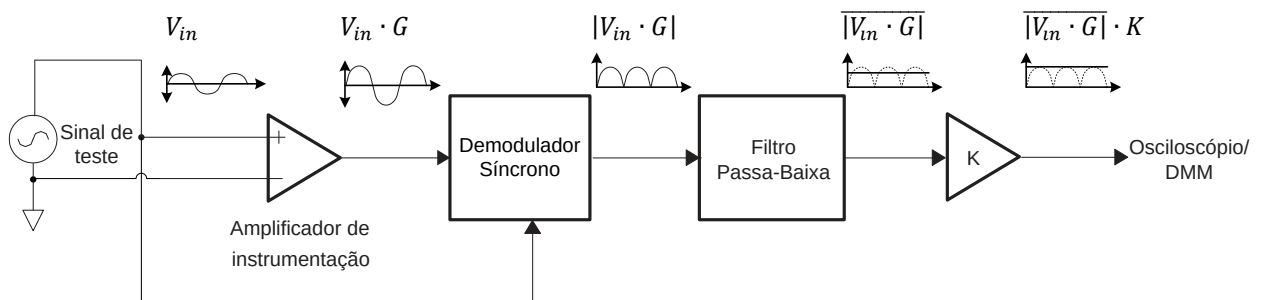


Figura 6.4 - Diagrama de blocos do esquema de teste do módulo de condicionamento de sinais, destacando as formas de onda em cada estágio e sua respectiva equação.

O ganho G é o ganho do INA128 e é calculado através da equação $G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}$, onde R_G é o valor da resistência de ganho que deve ser alterada de acordo com a sensibilidade do sensor para ajustar a tensão na saída do condicionador. A tensão na saída do filtro passa-baixas de suavização pode ser determinada por $\overline{|V_{in(RMS)} \cdot G|} = \left| \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{in(RMS)} \cdot G \right|$. O valor do ganho K foi definido para que a tensão na saída do sistema fosse igual à tensão de pico do sinal na saída do demodulador, a fim de facilitar a calibração do sistema, portanto $K = \frac{\pi}{2}$. Através destas definições obtém-se uma relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, no amplificador de instrumentação, como sendo $V_{out} = V_{in(RMS)} \cdot \sqrt{2} \cdot G$.

Conhecendo a sensibilidade dos sensores e sua tensão de excitação calcula-se a faixa de variação da tensão de entrada como sendo de $\pm 80mV_{rms}$ para o sensor de deslocamento e de $\pm 4mV_{rms}$ para a célula de carga. A partir destes valores, utilizando a relação entre a tensão

de saída e a tensão de entrada no AI, foram determinados os valores para R_G , de cada canal, de forma a melhor alocar o valor da tensão de saída dentro da faixa de medição do conversor A/D respeitando a resolução mínima de projeto para cada sensor. A Tabela 6.2 apresenta estes valores.

Tabela 6.2 - Ajuste de ganhos para os amplificadores de instrumentação.

Sensor / Canal	Sens. x Tensão de excitação	RG utilizado	Ganho K	Resolução aprox.	Máx. tensão de saída esperada
Deslocamento / 1	80 mV _{rms}	1420 Ω	36,21	0,093 μ m	4,0968 V
Carga / 2	4 mV _{rms}	100 Ω	501,0	0,269 N	2,8341 V

Para determinar o ganho final do sistema utilizou-se o gerador de sinais e o multímetro já especificados, além de divisores de tensão resistivos feitos com resistores de 1% de precisão, a fim de obter tensões inferiores a 50 mV_{pp}. O gerador foi configurado para gerar um sinal senoidal com frequência de 4,8kHz variando a amplitude dentro da faixa de operação do condicionador de sinais. As Figura 6.5 e Figura 6.6 apresentam os resultados dos testes.

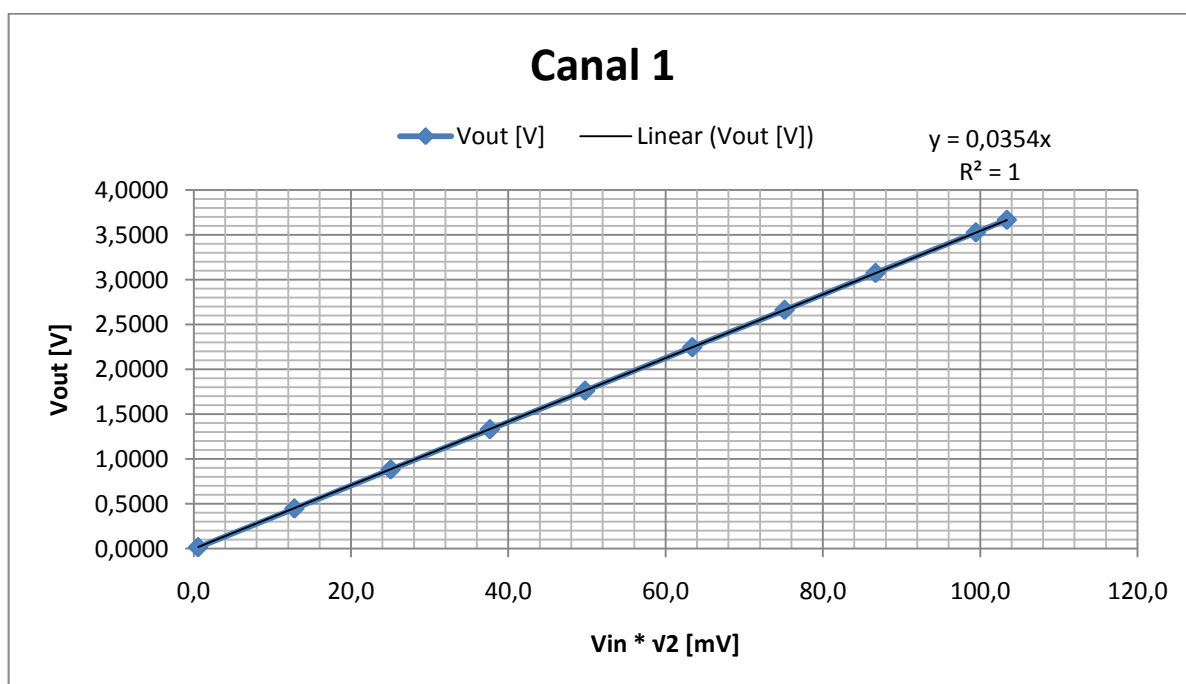


Figura 6.5 - Gráfico da tensão de saída x tensão de entrada para o canal 1.

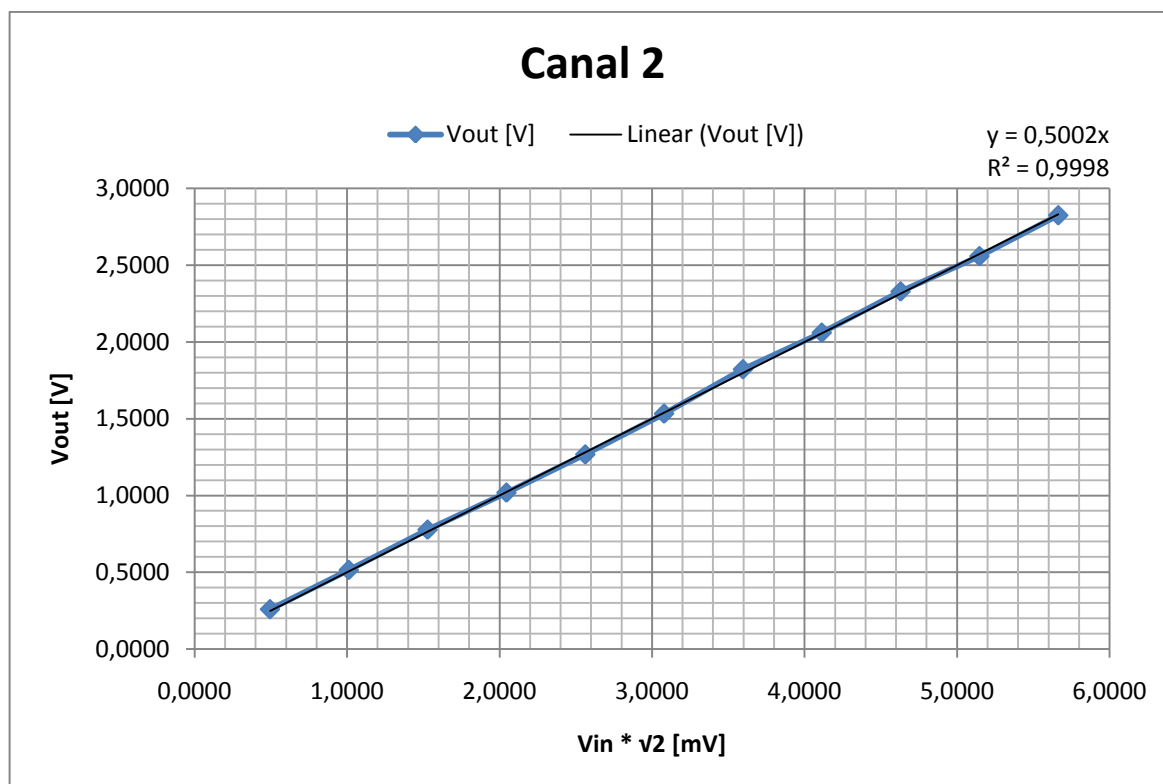


Figura 6.6 - Gráfico da tensão de saída x tensão de entrada para o canal 2.

A partir dos resultados apresentados percebe-se que o condicionador de sinais possui uma boa correlação entre os dados de saída e entrada com ganhos muito próximos dos calculados, a saber, ganho $K = 35$ para o sensor de deslocamento no canal 1 e ganho $K = 500$ para a célula de carga no canal 2.

6.3.2. Avaliação do condicionamento e aquisição dos dados dos sensores

A análise do condicionamento e aquisição de sinais dos sensores foi feita de maneira comparativa. Para célula de carga utilizou-se massas de peso conhecido, medidos por uma balança de precisão, para compará-los com os valores medidos pelo sistema. Os dados coletados pelo sistema, para o sensor de deslocamento, foram comparados com os valores medidos pelo equipamento Spider8 da HBM.

Para verificar se os sinais condicionados estavam coerentes com os valores obtidos nas simulações, fez-se uma comparação, mostrada na Figura 6.7, entre o sinal simulado e os valores, provenientes do sistema de condicionamento ligado ao sensor de deslocamento, obtidos com o osciloscópio. Posteriormente este sinal foi amostrado pelo software de teste, cujo gráfico é apresentado na Figura 6.8.

A Figura 6.7-a) apresenta uma simulação do sistema de condicionamento de sinais desenvolvido, nela são observados nos canais 1, 2 e 3, respectivamente, o sinal na saída do

amplificador de instrumentação, o sinal após a etapa de retificação e o sinal de saída filtrado. Na Figura 6.7-b) temos no canal 2 o sinal após a etapa de retificação, e no canal 1 o sinal de saída filtrado, medidos pelo osciloscópio. A partir desta figura percebe-se que os sinais reais estão bem coerentes com os sinais simulados. A Figura 6.8 mostra o mesmo sinal de saída medido pelo osciloscópio da Figura 6.7-b), adquirido pelo sistema desenvolvido.

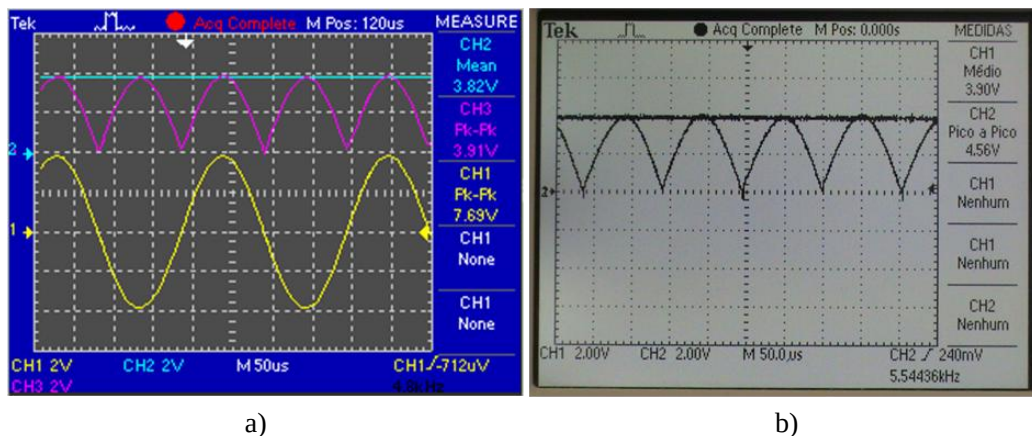


Figura 6.7 – Comparação entre o sinal real e o sinal simulado. a) sinal simulado. b) sinal proveniente do sensor de deslocamento, medido pelo osciloscópio.

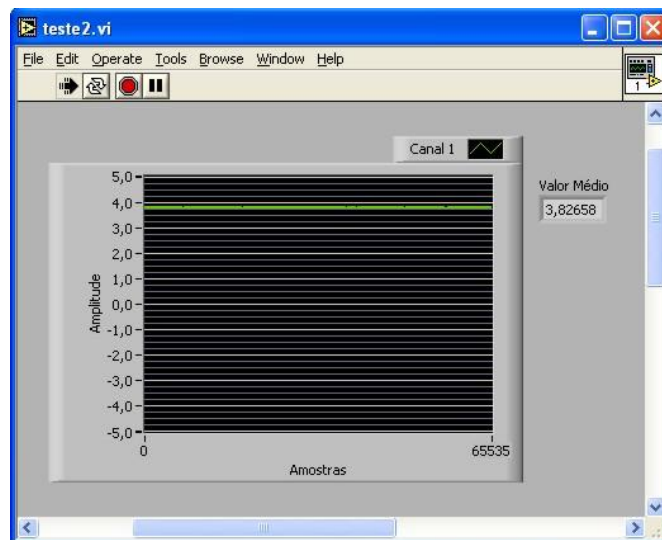


Figura 6.8 - Interface de teste apresentando a média dos valores amostrados para 65535 amostras.

Sensor de Força

Para avaliar esta sub-unidade massas de valores conhecidos para determinar se os valores medidos estavam condizentes com os valores das mesmas. A figura apresenta o aparato experimental utilizado. A Tabela 6.3 apresenta os valores dos sinais, provenientes da célula de carga, medidos pelo software do sistema desenvolvido, estes valores foram plotados no gráfico da Figura 6.9.

Tabela 6.3 - Valores medidos da célula de carga.

Massas [kg]	Medidas* [kg]	Erro [%]
0,372	0,3500	5,914%
0,978	0,9250	5,419%
1,350	1,3000	3,704%
3,518	3,4500	1,933%
3,890	3,7750	2,956%
4,868	4,7000	3,451%

*Tara em 0,400 kg

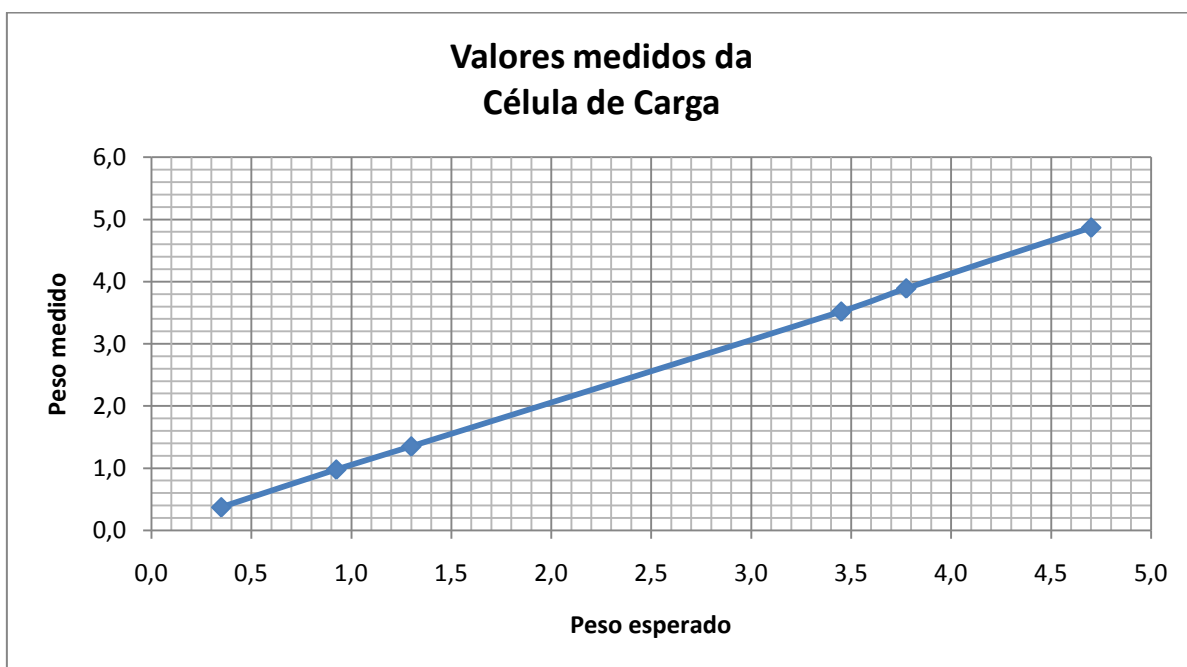


Figura 6.9 - Gráfico dos valores medidos da célula de carga.

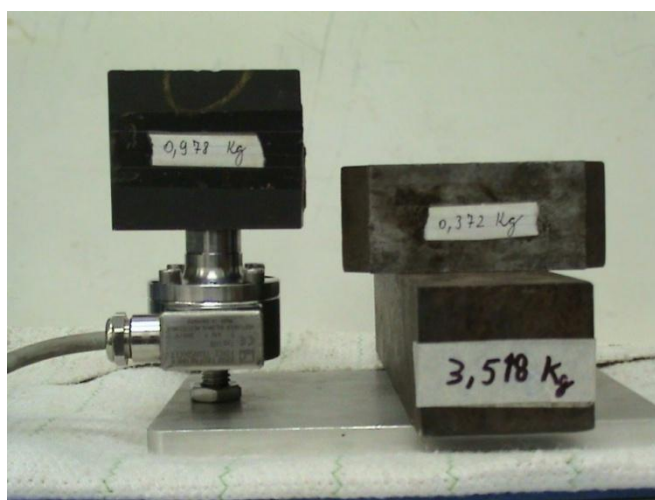


Figura 6.10- Aparato de verificação da célula de carga.

Pelos resultados encontrados percebemos que os valores medidos pelo sistema desenvolvido apresentou uma relação linear com os valores esperados, indicando que o sistema é capaz de medir corretamente os valores de força da célula de carga.

Sensor de deslocamento

Para avaliação desta sub-unidade foi realizado um teste fixando o apalpador do sensor de deslocamento em uma determinada posição e utilizando o equipamento de condicionamento e aquisição de sinal Spider8 da empresa HBM para medição do valor desta posição. Posteriormente, comparou-se com o valor medido pelo sistema construído. A Figura 6.11 mostra o aparato de teste utilizado, a Tabela 6.4 sumariza os resultados encontrados, que estão apresentados no gráfico da Figura 6.12.

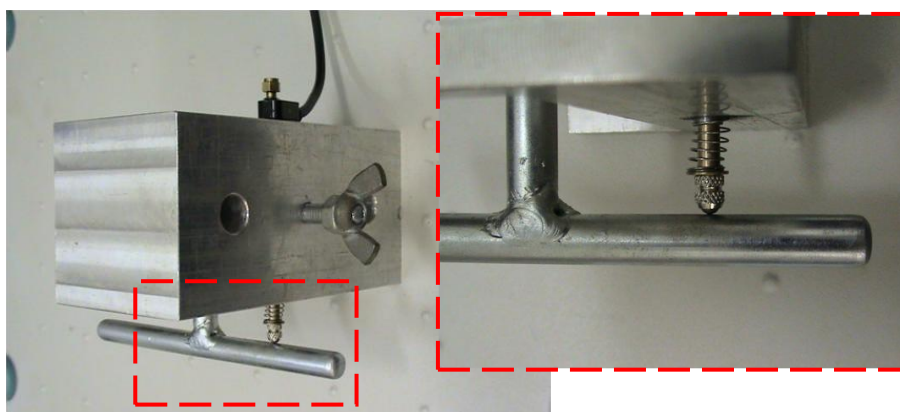


Figura 6.11 - Aparato de teste do sensor de deslocamento, destacando apalpador.

Tabela 6.4 - Valores medidos do sensor de deslocamento.

Spider 8 [mm]	Sistema proposto [mm]	Erro [%]
-1,5144	1,4990	1,015%
1,2500	-1,2289	1,692%
-0,5788	0,5755	0,567%
0,6756	-0,6617	2,059%

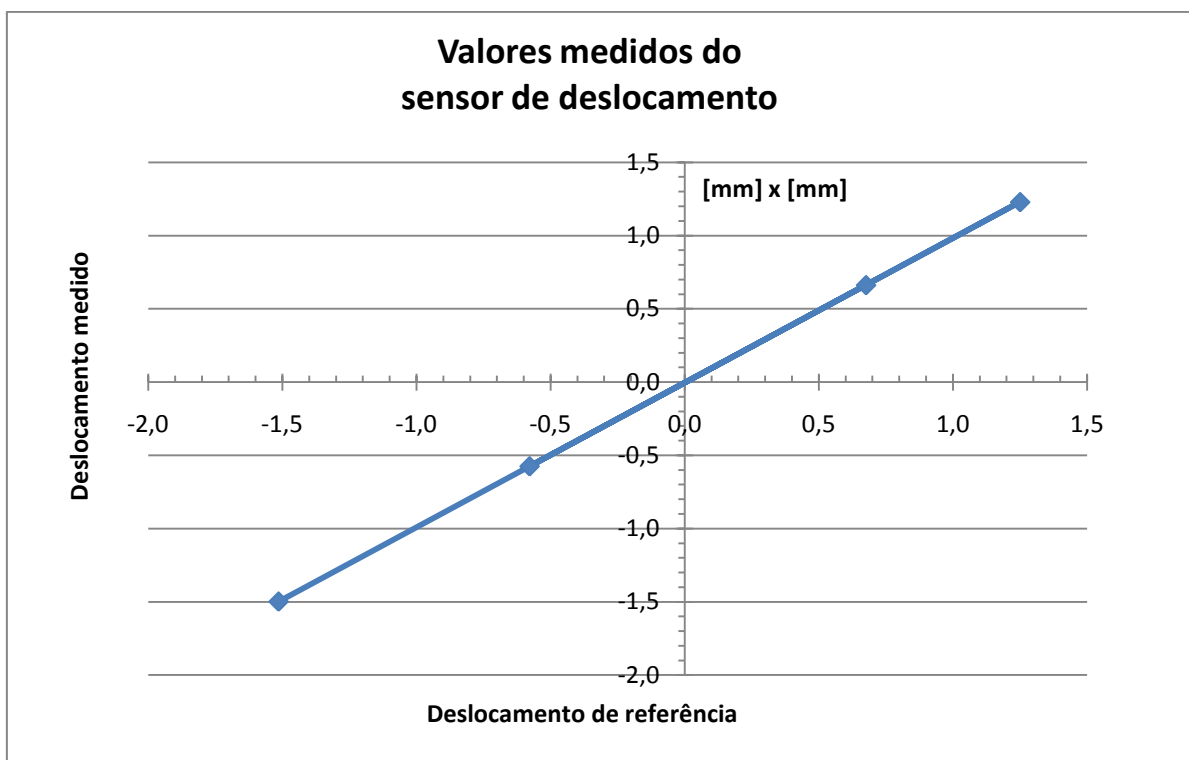


Figura 6.12 - Gráfico dos valores medidos do sensor de deslocamento.

Observa-se que os valores encontrados apresentam uma relação linear com os valores medidos pelo Spider8, mostrando que o sistema é capaz de medir, corretamente os valores de deslocamento.

Capítulo 7.

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Este trabalho descreve o projeto e desenvolvimento de um sistema de controle e interfaceamento de um macroindentador portátil para obtenção de propriedades mecânicas de materiais metálicos utilizando tecnologias DSP e wireless. Para tal, realizou-se o estudo prévio das metodologias tradicionais e de indentação para obtenção de tais propriedades, analisando-se as características dos equipamentos comerciais já existentes. Também foram realizados estudos das principais tecnologias de transmissão de dados sem-fio e DSPs, além de revisar conceitos básicos de medição e atuação. Após estes estudos, iniciou-se os desenvolvimentos que culminaram no modelo de hardware e software apresentado no capítulo 4. O desenvolvimento do sistema abrangeu as seguintes etapas:

- Projeto e desenvolvimento do sub-sistema de condicionamento e digitalização de sinais;
- Projeto e desenvolvimento do sistema de controle sem-fio e interfaces necessárias;
- Projeto e implementação de um aplicativo de software capaz de adquirir os sinais provenientes dos sensores em tempo real.

O protótipo desenvolvido mostrou-se capaz de coletar e transmitir os dados dos sensores de maneira satisfatória, e confiável mesmo em ambientes sujeitos a interferências. Comparativamente ao equipamento original (MIP-II) o sistema apresenta a vantagem de não possuir cabos de ligação da unidade de controle com o computador, transmitindo os dados via conexão wireless, reduzindo os riscos de um eventual rompimento de cabos, minimizando o tempo gasto em conexões e verificação das mesmas, bem como possibilita a realização de ensaios independentemente do computador host, que é usado apenas para monitoração e configuração dos parâmetros do ensaio.

A utilização do DSP como elemento de controle agregou diversos benefícios ao

sistema, tais como: aumento da velocidade de processamento e monitoração, aumento na segurança do ensaio, independência do computador host, maior determinismo nas medições, possibilitando uma otimização dos recursos computacionais empregados e o aumento da portabilidade.

Os resultados obtidos em cada teste mostraram que o sistema é capaz de coletar e transmitir os dados ao computador host, não apresentando perdas durante a transmissão. Embora estes resultados tenham apresentado pequenas diferenças com relação aos valores de comparação utilizados, essa discrepância é natural, pois os modelos teóricos de conversão dos valores de tensão, obtidos dos sensores, para valores reais de carga e deslocamento não consideram fatores como ruídos, perdas e atenuações, que podem ser corrigidos através de ensaios de calibração.

Tanto o firmware do DSP quanto o software do computador host desenvolvidos foram capazes de se comunicar não apresentando problemas com perda de dados, ou incompatibilidade, comportando-se da maneira esperada.

Apesar dos resultados obtidos, demonstrarem a boa usabilidade e indicarem um sistema confiável, ainda não foi possível avaliá-lo em condições reais de uso, como por exemplo, com a realização de um ensaio completo de indentação.

É ainda importante ressaltar que, com o desenvolvimento deste sistema, foi possível agregar *know-how* nacional e local nesta área de desenvolvimento, além de permitir o desenvolvimento de trabalhos futuros baseados nos resultados alcançados.

7.2. Trabalhos Futuros

Conforme descrito, o protótipo desempenha satisfatoriamente as funções a que se propõe, dentro dos limites dos experimentos realizados. Entretanto, existem vários pontos onde é possível realizar melhorias e otimizações. Dentre estes, destaca-se:

- Calibração do sistema de medição, através de ensaios utilizando equipamentos de maior precisão;
- Realização de ensaios de indentação completos, que devem ser realizados após a calibração do sistema;
- Miniaturização do protótipo;
- Desenvolvimento de um software de monitoramento e configuração capaz de substituir o computador host e que seja executado por um dispositivo portátil como um Palmtop ou Smartphone, agregando mais portabilidade ao sistema;

- Incorporar o sistema de controle do motor diretamente na estrutura de *software* do *DSP*, eliminando a necessidade de hardwares de terceiros;
- Avaliar a substituição do motor de passo por um servo motor de corrente contínua no intuito de simplificar o *hardware* de controle;

7.3. Publicações

Os resultados obtidos por este projeto levaram à publicação, no ano de 2010, de dois artigos em congressos de relevância nacional, a saber, Congresso Brasileiro de Automática e Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, cujas referências são apresentadas no anexo II.

Anexo I - Diagramas de Hardware

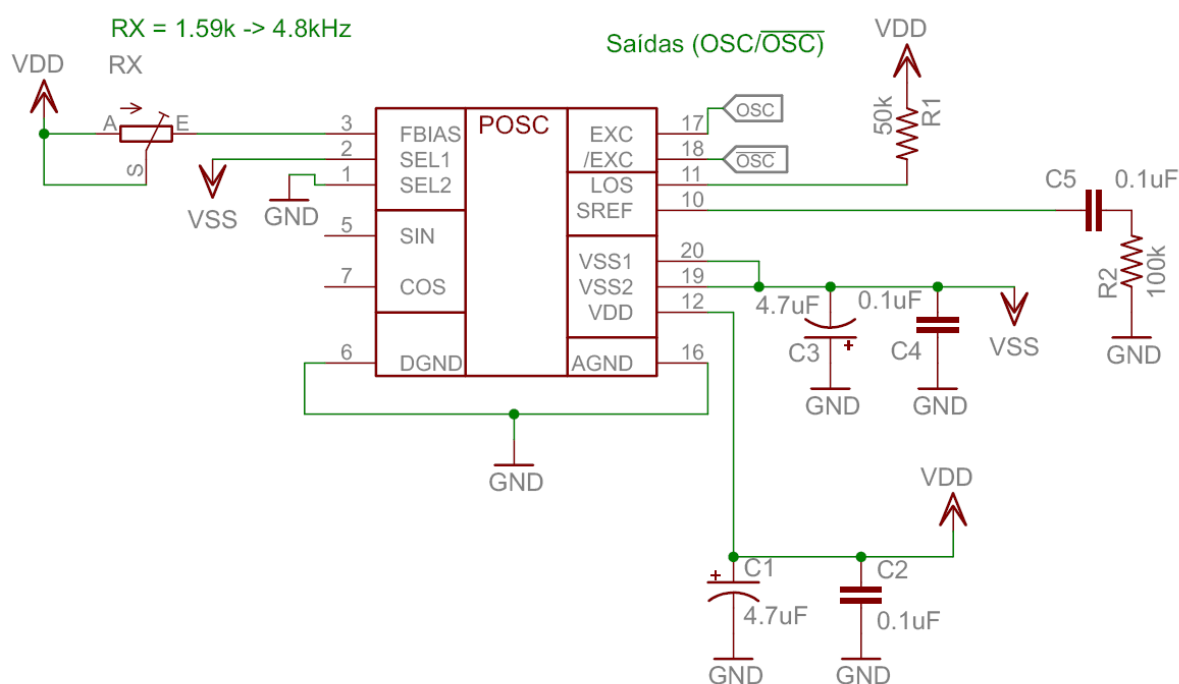


Figura A.1 - Diagrama de ligação do CI oscilador senoidal AD2S99.

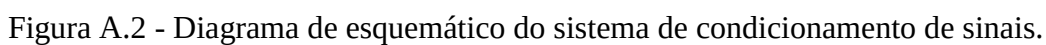


Figura A.2 - Diagrama de esquemático do sistema de condicionamento de sinais.

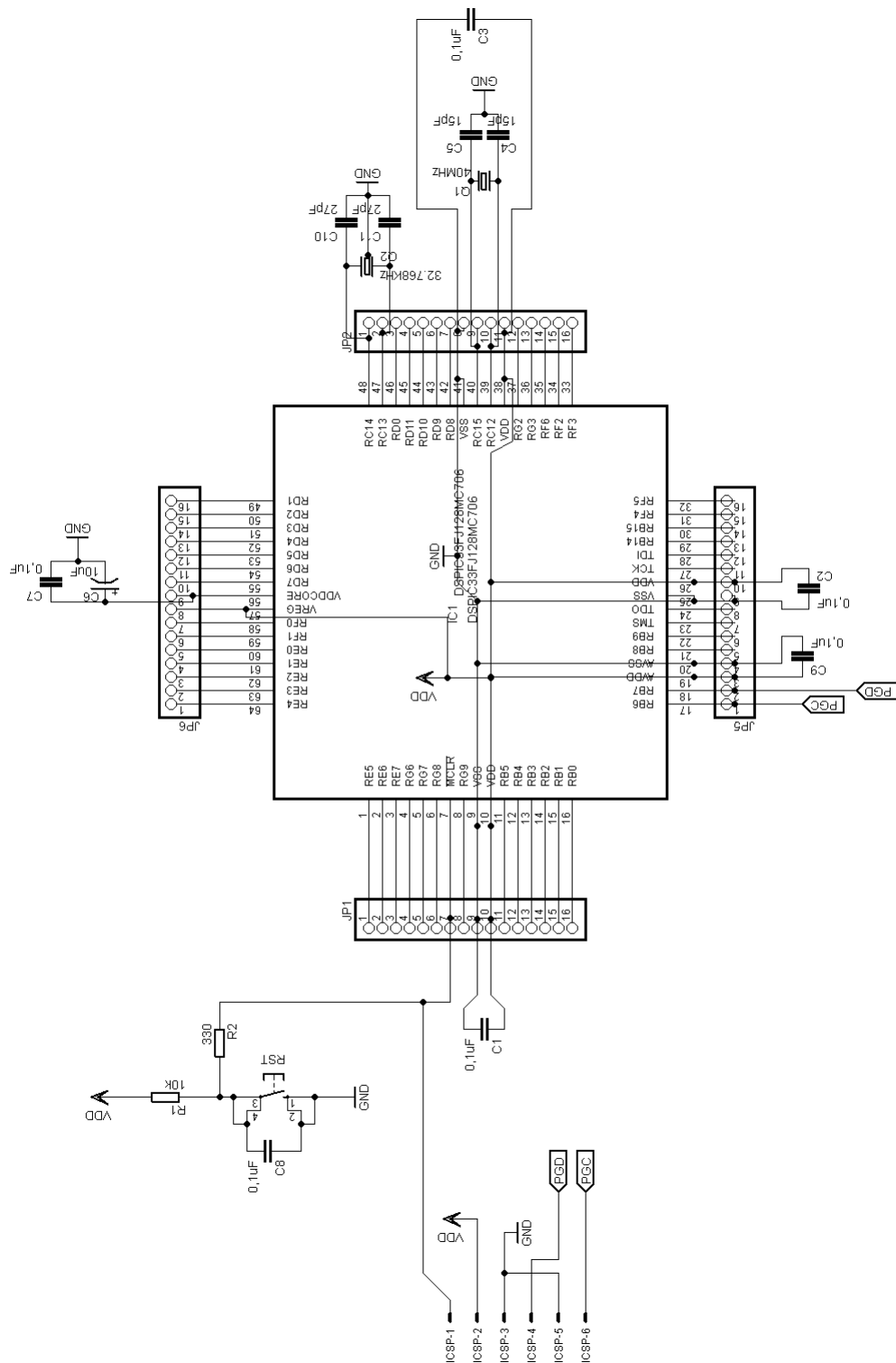


Figura A.3 - Diagrama de esquemático do adaptador para o dsPic.

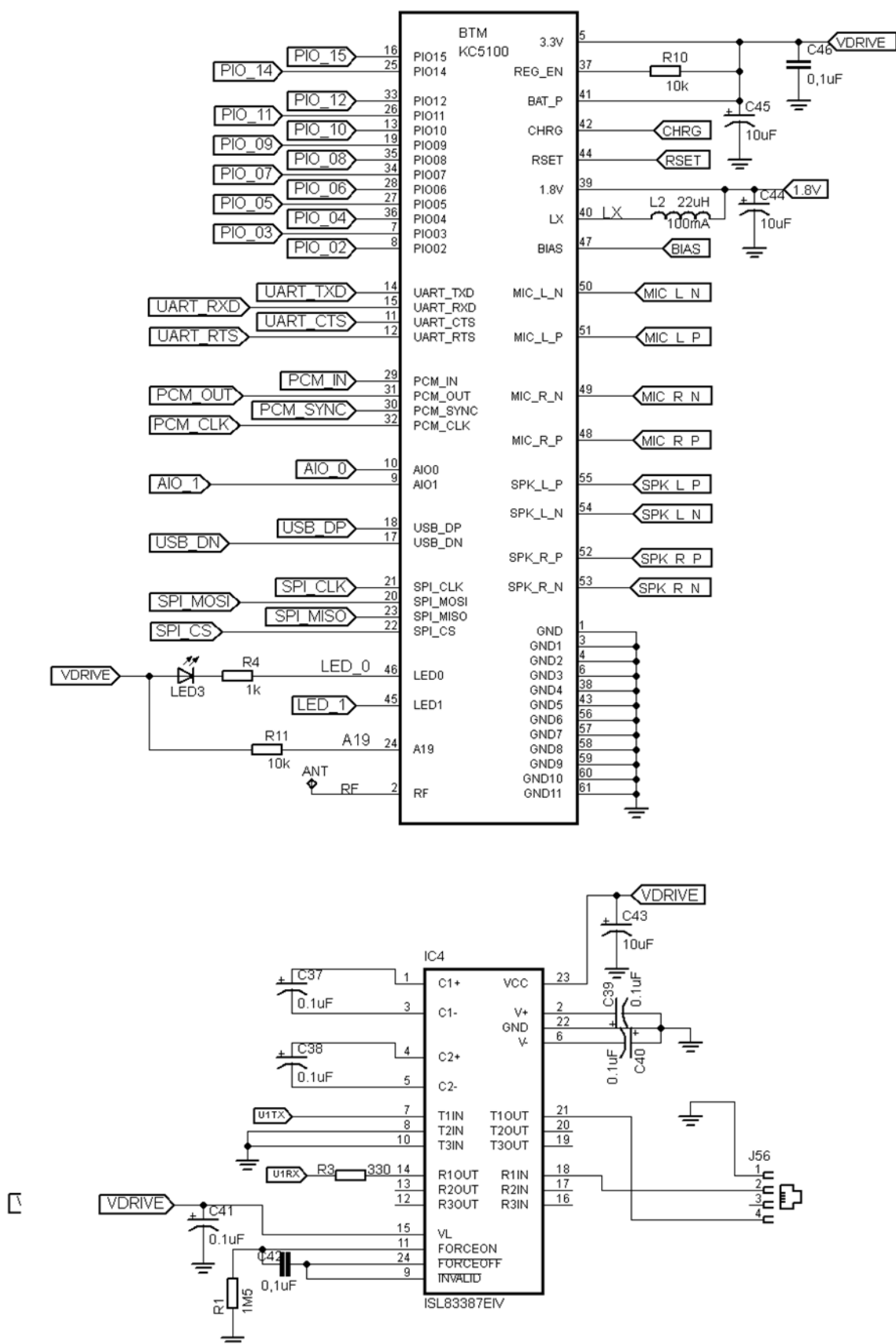


Figura A.4 - Diagrama de esquemático da placa principal: adaptador para o módulo Bluetooth e adaptador RS232

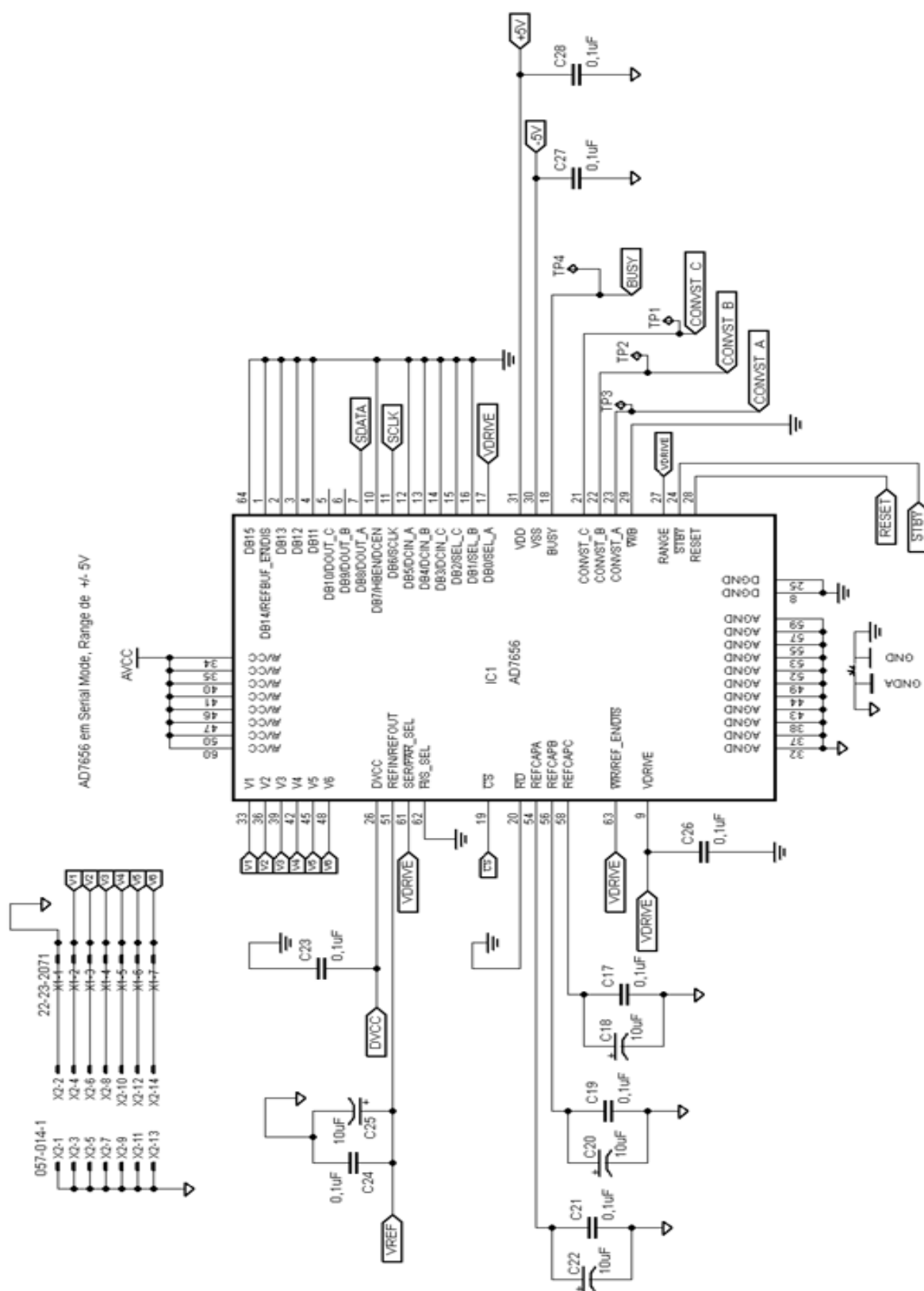


Figura A.5 - Diagrama de esquemático da placa principal: Conversor A/D

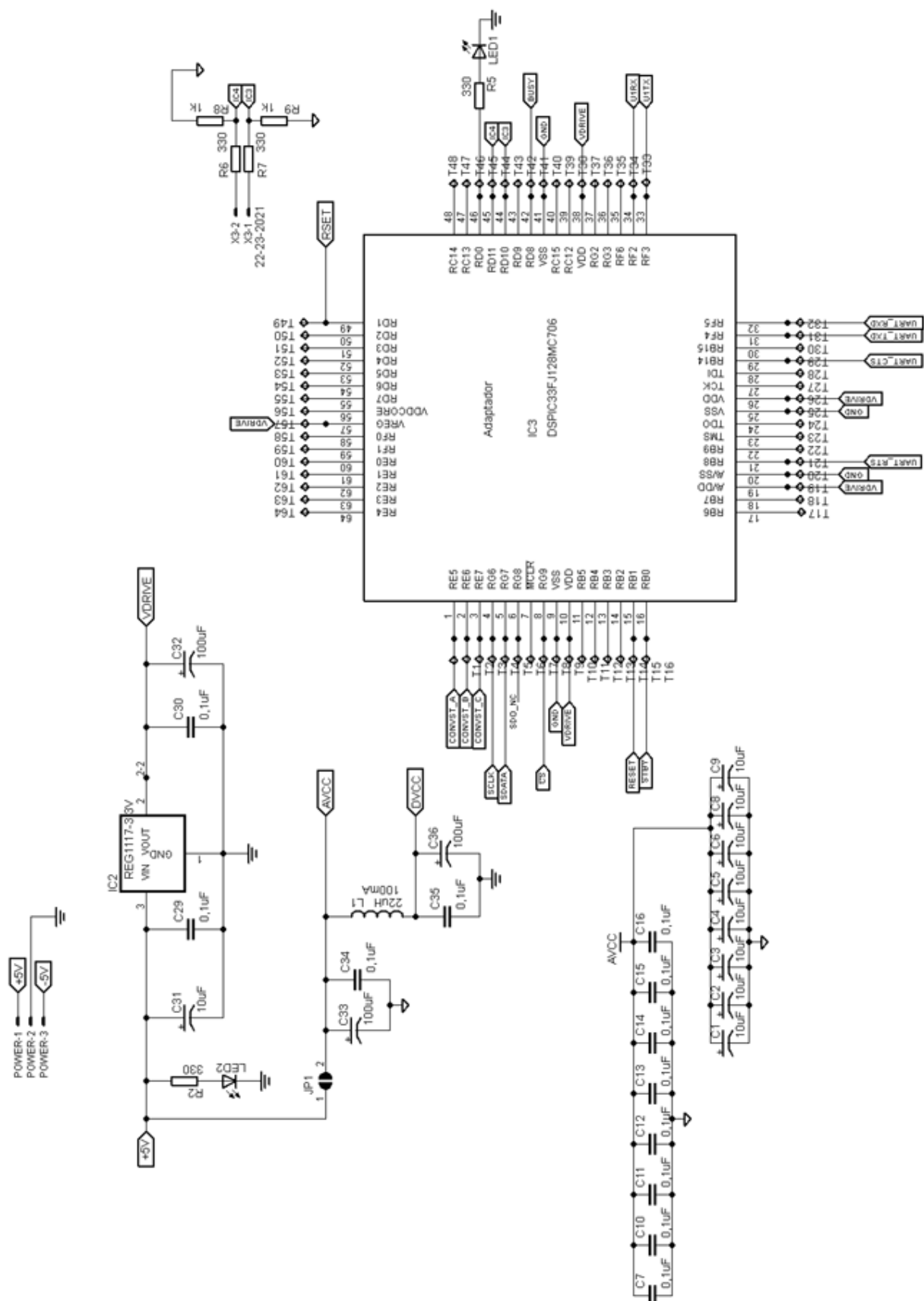


Figura A.6 - Diagrama de esquemático da placa principal: dsPid e regulador de tensão

Anexo II

SOUSA, J. V. DE; SOARES, A. B.; FRANCO, S. D. **Tecnologias Wireless e Dsp para Controle e Interfaceamento de um Macroindentador Portátil para Avaliação In-Situ de Propriedades Mecânicas de Dutos.** VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Anais...** p.10 Campina Grande – Paraíba: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2010.

SOUSA, J. V.; SOARES, A. B.; FRANCO, S. D. **Controle e Interfaceamento de um Macroindentador Portátil para Avaliação In-Situ de Propriedades Mecânicas de Dutos Metálicos Utilizando Dsp e Tecnologia Wireless.** XVIII Congresso Brasileiro de Automática. **Anais...** p.193-198 Bonito - MS, 2010. Disponível em: <<http://www.opec-eventos.com.br/cba2010/index.php>>. .

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- AHN, J. H.; CHOI, Y; KWON, D. **Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials Through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve**. *Journal of the Korean Institute of Metal and Materials*. , v. 38, p. 1606-1611, 2000.
- AHN, J.; KWON, D. **Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentation: Examination of Strain Definition and Pileup Effect**. *Journal of Materials Research*., v. 16, n. 11, p. 3170-3178, 2001.
- ANALOG DEVICES. **Data Conversion Handbook**. Elsevier's Science & Technology, 2005.
- ANALOG DEVICES. **AD7656 - 250 kSPS, 6-Channel, Simultaneous Sampling, Bipolar 16-Bit ADC, Rev.B - Datasheet**. 2010. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad7656/products/product.html>>. Acesso em: 23/9/2010.
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2010**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=661>>. Acesso em: 11/11/2010.
- Applied Motion Products Inc. **Hardware Manual 3540i - Programmable Step Motor Driver**. 1998. Disponível em: < <http://www.applied-motion.com/>>. Acesso em: 05/11/2009.
- ATC. **Advanced Technology Corporation products**. Disponível em: <<http://www.atc-ssm.com/products.html>>. Acesso em: 29/1/2010.
- AZEVEDO, E. C.; NETO, S. C.; CHIERICE, G. O.; LEPIENSKI, C. M. **Aplicação de indentação instrumentada na caracterização mecânica de poliuretana derivada de óleo de mamona**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. , v. 19, n. 4, p. 336–343 SciELO Brasil, 2009.
- Berkeley Design Technology Inc. **Choosing a DSP Processor**. ,2006. Disponível em: <http://www.bdti.com/articles/choose_2000.pdf>. Acesso em: 10/6/2010.

BLUETOOTH SIG. **Core System Architecture.** Disponível em: http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Core_System_Architecture.aspx. Acesso em: 15/10/2009.

BRAGA, N. C. **Uma introdução ao DSP – Parte 1.** *Saber Eletrônica* nº 335. São Paulo, 2000.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction.** Wiley, 1991.

CARDOSO, F. C. **Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos.** ,2004.

DOERNER, M. F.; NIX, W. D. **A method for interpreting the data from depthsensing indentation instruments.** *Journal Materials Research.* , v. 1, p. 601-609, 1986.

FIELD, J. S.; SWAIN, M. V. J. **Determining the Mechanical Properties of Small Volumes of Material from Submicrometer Spherical Indentations.** *Mater. Res.* , v. 10, p. 101, 1995.

FRANCIS, H. A. **Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation.** *Journal of Engineering Materials and Technology.* , v. 98, n. 3, p. 272-281 ASME, 1976.

Frontics. **Frontics Inc. Products.** Disponível em: <http://www.frontics.com/eng/products/products02.php>. Acesso em: 29/1/2010.

GAHR, K.-H. Z. **Microstructure and Wear of Materials.** Elsevier, 1987.

HAGGAG, F. M. **The Role of Luders Strain in Predicting Flow Properties in Steels from an Instrumented Hardness Test.** M.S. Thesis, department of Chemical and Nuclear Engineering, University of California, Santa Barbara, CA, 1980.

HAGGAG, F. M. **In-situ measurements of mechanical properties using novel automated ball indentation system.** In: W. R. Corwin; F. M. Haggag; W. L. Server (Eds.); *Small Specimen Test Techniques Applied to nuclear reactor vessel thermal annealing and plant Life Extension*, ASTM STP 1204,. **Anais...** p.27-44 Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1993.

HAGGAG, F. M. **In-situ Nondestructive Measurements of key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines, Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation.** *American Society of Mechanical Engineers.* , v. PVP-Vol. 4, p. 99-104, 2001.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on An Innovative Field Indentation Microprobe.** *ASME - The American Society of Mechanical Engineers - PVP.* , v. 107, p. 101-107, 1989a.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe.** *ASME - The American*

Society of Mechanical Engineers - PVP. , v. 170, n. Innovative Approaches to Irradiation Damage, and Fracture Analysis, p. 101-107, 1989b.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; HUTTON, J. T.; THOMAS, D. L.; SWAIN, R. L. **Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials.** In: A. A. Braun; N. E. Ashbaugh; F. M. Smith (Eds.); Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing, ASTM 1092. **Anais...** p.188-208 Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; MARRIOT, I. D. L.; MAGER, T. R.; BANFORD, W. H. **Innovative Approaches to Irradiation Damage and Failure Analyses.** *American Society for Mechanical Engineers.* , v. 170, p. 101-107, 1989c.

HAGGAG, F. M.; SERVER, W. L. **Small Specimen Test Technique Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension.** *American Society for Testing and Materials.* , p. 27, 1993.

HAGGAG, F. M.; WANG, J. A.; SOKOLOV, M. A.; MURTY, K. L. **Use of portable/in situ stress-strain microprobe system to measure stress-strain behavior and damage in metallic materials and structures.** In: G. Lucas; D. Stubbs (Eds.); Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures, ASTM STP 1318. **Anais...** Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1997.

HAGGAG, F. M.; WONG, H.; ALEXANDER, D. J.; NANSTAD, R. K. **The Use of Field Indentation Microprobe in Measuring Mechanical Properties of Welds.** Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee. **Anais...** p.843-849, 1989d.

HBM. **Data Sheet - U2B Force Transducer.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/force-transducers-for-industrial-applications/single/categorie/force-transducers-industrial/product/u2b/backPID/force-transducers-and-force-sensors/>>. Acesso em: 2/5/2009a.

HBM. **Data Sheet - WI Displacement transducer.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/displacement/single/categorie/displacement-transducers/product/wi/backPID/displacement/>>. Acesso em: 2/5/2009b.

HEATH, S. **Embedded systems design.** 2. ed. Oxford England: Newnes, 2003.

HILL, R.; STORÅKERS, B.; ZDUNEK, A. B. **A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test.** *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* , v. 423, n. 1865, p. 301-330, 1989.

HOLLOMON, J. H. **Tensile Deformation.** *Transactions of the AIME (Iron and Steel Division).* , v. 162, p. 268-290, 1945.

- ISO /TR 29381:2008. **ISO /TR 29381: Metallic materials -- Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test -- Indentation tensile properties.** 2008.
- ISO 14577. **ISO 14577: Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and other materials parameters - Part 1 – Test method.** 2003.
- JANG, J.-I.; CHOI, YEOL; LEE, J.-S.; et al. **Application of instrumented indentation technique for enhanced fitness-for-service assessment of pipeline crack.** *International Journal of Fracture.* , v. 131, n. 1, p. 15-33, 2005.
- JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics.** New York: Cambridge University Press, 1985.
- KANIA, R; RUSSEL, A.; GAO, M. **Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines.** *Congreso Internacional de Ductos.* ,2003.
- KC Wirefree. **KC-5100 - OEM Hi Power Bluetooth Data Module Datasheet.** 2009.
- MATHEW, M. D.; MURTY, K L; RAO, K. B. S.; MANNAN, S. L. **Ball Indentation studies on the effect of aging on mechanical behaviour of alloy 625.** *Materials Science and Engineering A264.* , p. 159-166, 1999.
- MATTHEWS, J. R. **Indentation hardness and hot pressing.** *Acta Metallurgica.* , v. 28, p. 311, 1980.
- Microchip. **dsPIC33F Family Data Sheet High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers - Rev.D.** 2006. Disponível em: <<http://www.microchip.com>>. Acesso em: 23/05/2010
- Microchip Masters Brasil. **(EMI) - Técnicas para aumentar a robustez de seus projetos contra EMI/EMC/ESD/EFT.** *11º Seminário Técnico Microchip.* ,2006.
- MIKOWSKI, A. **Propriedades nanomecânicas e processos de fratura de materiais lamelares,** 2008. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Curso de Pós-Graduação em Física. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/handle/1884/14219>>. Acesso em: 23/9/2010.
- MOK, C.-H. **The dependence of yield stress on strain rate as determined from ball-indentation tests.** *Experimental Mechanics.* , v. 6, n. 2, p. 87-92, 1966.
- MURTY, K. L.; MATHEW, M. D.; MIRAGLIA, P. Q.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. **Non-destructive Evaluation of Deformation and Fracture Properties of Materials Using Stress-Strain Microprobe.** *Non-destructive Characterization of Materials in Aging Systems, Materials Research Society, Penn. Anais...* , 1998.
- MURTY, K.; MATHEW, M. D. **Nondestructive monitoring of structural materials using automated ball indentation (ABI) technique.** *Nuclear Engineering and Design.* , v. 228, n. 1-3, p. 81-96, 2004.

- NEKOGAR, F.; MORIARTY, G. **Digital Control Using Digital Signal Processing**. New Jersey: Ed Prentice Hall, 1998.
- NETO, F. F. R.; FRANCO, S. D. **Avaliação de Propriedades Mecânica em Dutos Através de Ensaios de Macroindentação Instrumentada**. *Anais do V Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia*, 2002.
- OLIVEIRA, J. C. V. DE; INMETRO, I. N. DE M. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metCientifica/vim/vim_completo.pdf>. Acesso em: 14/3/2011.
- OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. **An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments**. *Journal Materials Research*, v. 7, p. 1564-1583, 1992.
- PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**. Hemus, 1997.
- PALLAÁS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. **Sensors and Signal Conditioning**. Second ed. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- Petrobras. **petrobras - tecnologia**. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/areadeatuacao_dutos.asp>. Acesso em: 11/11/2010.
- RAMOS NETO, F. F.; FRANCO, S. D. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICA EM DUTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**. *Anais do V Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia*. **Anais...** p.1-8 Uberlândia, 2002. Disponível em: <www.posmec.ufu.br>. .
- RASLAN, A. A. **Introdução à ciência dos materiais**. Uberlândia: Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia - UFU, 1982.
- REGTIEN, P. P. L. **Electronic Instrumentation**. 2. ed. Delft -Holanda: VSSD, 2005.
- SALGADO, P.; BOAVENTURA, J. **Instrumentação e Medidas**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1996.
- SNEDDON, I. N. **The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile**. *Int. J. Eng. Sci.*, v. 3, p. 47-57, 1965.
- TABOR, D. **The hardness of Metals**. Oxford: Clarendon Press, 1951.
- TALJAT, B.; ZACHARIA, T.; KOSEL, F. **New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data**. *International Journal of Solids and Structures*. *Int. J. Solids Structures*, v. 35, p. 4411-4426, 1998.

Texas Instruments Incorporated. **The PCB is a component of op amp design.** *Analog Applications Journal.* , , n. August, p. 42-47, 2000.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity.** 3. ed. McGraw-Hill, 1970.

TRICHY, G. **Development of the ball indentation test to evaluate mechanical properties of nanostructured materials** , 2005. Master of Science Thesis, Materials Science and Engineering, North Carolina State University, Raleigh.

WI-FI ALLIANCE. **Wi-Fi: Enabling the Future.** Disponível em: <http://www.wi-fi.org/knowledge_center_overview.php?type=1>. Acesso em: 3/12/2009.

ZIGBEE ALLIANCE. **ZigBee Specifications.** Disponível em: <<http://www.zigbee.org/en/>>. Acesso em: 1/9/2009.