

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de
Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em
Rede de Sensores

Flávio Hernan Figueiredo Nunes

DM 18/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Flávio Hernan Figueiredo Nunes

**Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de
Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em
Rede de Sensores**

DM 18/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Flávio Hernan Figueiredo Nunes

**Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de
Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em
Rede de Sensores**

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica na área
de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Nunes, Flávio Hernan Figueiredo, 1989 -
Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento de
integridade estrutural baseado em rede de sensores / Flávio Hernan Figueiredo
Nunes. - 2016.

Orientador: Aldebaro Barreto da Rocha
Klautau Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Belém, 2016.

1. Análise estrutural - monitorização. 2.
Rede de sensores - testes. 3. Resistência de
materiais. I. Título.

CDD 23. ed. 624.171

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Rede de Sensores

AUTOR: FLÁVIO HERNAN FIGUEIREDO NUNES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 12/08/2016

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior
(Orientador - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Adalbery Rodrigues Castro
(Avaliador Externo ao Programa - FCT/UFPA)

Prof. Dr. Remo Magalhães de Souza
(Avaliador Externo ao Programa - FEC/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordernador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar a sabedoria e a paciência necessária para eu conseguir dar mais esse passo na minha vida.

Agradeço a minha mãe Jeanne e a meu padrasto Keisuke, por sempre me darem o suporte necessário para a minha formação profissional e principalmente, a formação pessoal e moral, sempre com palavras de carinho e encorajamento; ao meu irmão, Renan, por estar sempre ao meu lado; à minha amada Marcella, pelo seu carinho, compreensão das horas difíceis, pela ajuda em organizar minhas idéias para escrever esse trabalho e o apoio na minha caminhada até aqui. Agradeço também a meus avós, Florentina e Josias, que sempre me apoiaram. Ao meu tio Jean que incentivou os meus estudos, creio que meu interesse por eletrônica tenha surgido quando eu encontrei algumas revistas antigas de eletrônica e que pertenciam a ele. Aos meus amigos e colegas, os quais foram fundamentais para chegar até aqui, principalmente os amigos da UFPA, do LAPS e do LASSE, os quais me ajudaram não somente como pessoa, mas também como engenheiro. Fiquei muito feliz por fazer parte desses laboratórios e lembrando, o LAPSE é uma grande família.

Agradeço à equipe montada para o desenvolvimento do projeto que desencadeou nessa dissertação: ao meu orientador Aldebaro Klautau Junior, ao meu Professor Adalbery Castro e ao Lucas Corrêa.

Gostaria de agradecer a Vale, pelo financiamento da pesquisa e desenvolvimento do produto que resultou nessa dissertação.

Flávio Hernan Figueiredo Nunes

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
1 Introdução	1
1.1 Estudo de caso	2
1.2 Revisão da literatura	4
1.3 Motivação	5
1.4 Estrutura do trabalho	6
2 Estruturas civis	7
2.1 Aspectos históricos	7
2.2 Patologias das construções	8
2.2.1 Patologias das estruturas conforme os materiais utilizados:	8
2.2.1.1 Patologias do concreto	8
2.2.1.2 Patologias do aço	9
2.3 Pontes - Obra de Arte Especial Viárias (OEAs)	10
2.3.1 Contextualização de pontes	10
2.3.2 Engenharia das pontes	11
2.4 Monitoramento das patologias das estruturas	12

3	Fundamentos do sistema	14
3.1	Sinais analógicos e digitais	14
3.2	Extensômetros elétricos	15
3.2.1	Princípios de funcionamento do extensômetro	16
3.3	Ponte de wheatstone	20
3.3.1	Circuito em quarto-de-ponte	21
3.3.2	Circuito em meia-ponte - No mesmo braço	22
3.3.3	Circuito em meia-ponte - Em braços opostos	23
3.3.4	Circuito em ponte completa	24
3.4	Amplificador operacional	24
3.4.1	Amplificador de diferenças - Subtrator	25
3.4.2	Amplificador de instrumentação	25
4	Projeto do hardware	27
4.1	Módulo de controle de sinal - Placa base	27
4.1.1	Fonte da alimentação	28
4.1.2	Microcontrolador e interfaces de comunicação	30
4.1.3	Relógio em tempo real	30
4.1.4	Entrada para cartão de memória e interface para a conexão das placas condicionadoras de sinais	30
4.2	Módulo do condicionador de sinal	31
4.2.1	Ponte de wheatstone	32
4.2.2	Controle de ganho	34
4.2.3	Conversor A/D	36
5	Projeto do software	37
5.1	Firmware	37
5.1.1	Ajustar o ganho do circuito condicionador	39
5.1.2	Algoritmo para correção do offset	40
5.1.3	Rotina de leitura para realizar a conversão analógico digital	40
5.2	Software de gerenciamento de rede	42
5.3	Interpretando os dados	45

6	Testes e resultados	47
6.1	Testes de aferição do nó sensor	47
6.2	Testes de repetitividade do nó sensor	49
6.3	Testes de oscilação da massa	51
6.4	Resultados	51
7	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	59
7.1	Conclusão	59
7.2	Trabalhos Futuros	60
	Referências Bibliográficas	65

Lista de Figuras

1.1	Primeiro protótipo com circuito condicionador para extensômetro.	3
1.2	Composição da matriz de transporte no Brasil em 2016. Fonte [1]	5
2.1	Representação básica de uma ponte. Fonte: [2]	11
2.2	Esquema de um sistema computadorizado para aquisição de dados.	12
2.3	ADS2000 conectado a diversos cabos elétricos.	13
3.1	Elementos de um sistema para processamento digital de sinais. Fonte: [3] modificado	15
3.2	Elementos básicos de um extensômetro uniaxial. Fonte: [4] modificado	15
3.3	Representação da variação do comprimento L e da largura D , de um corpo, provocado pela ação de uma força F . (a) Corte longitudinal. (b) Corte transversal. Fonte: [4] modificado	17
3.4	Ponte de Wheatstone.	20
3.5	Ponte de wheatstone, com apenas um elemento ativo. Fonte: [5]	22
3.6	Ponte de wheatstone, com dois extensômetros ativos, no mesmo braço da ponte. Fonte: [5]	23
3.7	Ponte de wheatstone, com dois extensômetros ativos, em braços opostos da ponte. Fonte: [5]	23
3.8	Ponte de wheatstone, com todos os extensômetros ativo. Fonte: [5]	24
3.9	Amplificador da diferença. Fonte [6] modificado	25
3.10	Amplificador de instrumentação. Fonte [6] modificado	26
4.1	Diagrama da placa base	28
4.2	Leiaute da placa base	29
4.3	Diagrama da fonte de alimentação	29

4.4	Topologia rede Controller Area Network (CAN). Nó sensores com os possíveis sensores (1,2,3,4,5,...,n).	31
4.5	Diagrama da placa condicionadora de sinal	32
4.6	Módulo condicionador de sinal para extensômetro.	33
4.7	Ponte de wheaststone do projeto.	33
4.8	Simplificação do circuito de balanceamento, para calculo de V_a e V_b . Em A , circuito com o potenciômetro de 50k Ω . Em B , circuito equivalente.	34
4.9	Substituição do potenciômetro por resistores, para auxiliar no calculo. Em A , circuito com o potenciômetro de 50k Ω . Em B , circuito equivalente, $0 \leq n \leq 1$.	35
5.1	Máquina de estados finitos, representando o funcionamento da placa base.	38
5.2	Fluxograma do algoritmo, usado para balanceamento da ponte de wheatstone.	41
5.3	Software de controle. Em A : Tela inicial, exibindo as principais configurações. Em B : mostra os modos de armazenamento dos dados, no PC ou no catão SD. Em C e D , são exibidos os possíveis ganhos, que podem ser aplicados pelo circuito condicionador.	42
5.4	Máquina de estados finitos, representando o funcionamento do Software gerenciador	43
6.1	Transdutor de força, criado para realizar testes em laboratório.	48
6.2	Esquema mostrando o uso do transdutor de força.	48
6.3	Balança mostrando que o valor da massa é exatamente 1Kg, de um dos pesos-padrão.	49
6.4	Nó sensor realizando a aquisição da deformação.	49
6.5	Balança mostrando o valor da massa de exatamente 2Kg, de um dos pesos-padrão.	50
6.6	Nó sensores interligados pelo barramento CAN. Em A : cabo para ligação do extensômetro, em B : cabo do barramento CAN, em C : placa do nó sensor, em D : placa do nó mestre, em E : conversor USB-Serial e F : computador.	51
6.7	Teste de oscilação da massa, para provocar uma deformação variável.	52
6.8	O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 10 V/V.	53

6.9	O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 100 V/V.	54
6.10	O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.	54
6.11	O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 10 V/V.	55
6.12	O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 100 V/V.	55
6.13	O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.	56
6.14	O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com variações 0, 2, 4, 6 e 8Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.	57
6.15	O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com variações 8, 6, 4, 2 e 0Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.	58
6.16	O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com a massa balançando com comportamento semelhante a um pêndulo, com uma massa e 4Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.	58

Lista de Tabelas

4.1	Limites da deformação ($\mu m/m$) relacionado ao ganho	35
4.2	Tabela de conversão entre o sinal analógico e o código digital do ADS1194 . .	36
5.1	Cabeçalho do protocolo de comunicação	40
5.2	Dados do protocolo de comunicação	40
6.1	Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 10V/V, comparativo de média e desvio padrão	53
6.2	Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 100V/V, comparativo de média e desvio padrão	56
6.3	Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 500V/V, comparativo de média e desvio padrão	56
6.4	Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 500V/V	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/D Analógico/Digital.

AmpOp Amplificador Operacional.

CAN Controller Area Network.

CNT Confederação Nacional de Transportes.

D/A Digital/Analógico.

DC Direct Current.

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

GPIO General Purpose Input/Output.

I²C Inter-Integrated Circuit.

LABDID Laboratório Didático de Engenharia Civil.

LASSE Laboratório de Sensores e Sistemas Embarcados.

LDO low-dropout.

NICAE Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia.

OAE Obra de Arte Especial.

PCI Placa de Circuito Impresso.

PET Polyethylene terephthalate.

RAM Random-Access Memory.

RF Rádio Frequência.

SHM Structural Health Monitoring.

SPI Serial Peripheral Interface.

TKU Toneladas por Quilômetro Útil.

USART Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.

USB Universal Serial Bus.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo mostrar o desenvolvimento de um sistema para monitoramento de integridade estrutural, empregando rede de sensores.

O projeto do nó sensor permite que este seja configurável, ao ponto de aceitar diversos tipos de sensores, tais como extensômetro, acelerômetro, sensor de temperatura, sensor de umidade, tendo também sido previsto o uso das tecnologias de comunicação com e sem fio. Ao contrário dos sistemas convencionais que são centralizados empregando longos cabos, o uso de uma rede de sensores é uma abordagem descentralizada, permitindo que os sensores fiquem mais próximos do circuito condicionador. Isso traz alguns benefícios, como a redução do comprimento dos cabos dos sensores, diminuição da captação de ruído eletromagnético e a diminuição da impedância dos cabos, melhorando a resposta dos sinais gerado pelos sensores.

São apresentados detalhes do circuito e da comunicação do nó sensor. E por ultimo são mostrados e discutidos os testes realizados.

PALAVRAS-CHAVES: Rede de Sensores; Extensômetros elétricos; Pontes de Wheatstone; Monitoramento de estruturas; Instrumentação eletrônica; Sistema de aquisição; Barramento CAN.

Abstract

The objective of this dissertation is show the design of a structural integrity monitoring system, employing sensor network.

The project of sensor node allows many kind of sensors, such as electrical strain gage, accelerometer, temperature sensor, humidit sensor, also the sensor node is capable of communicating via wireless and wired technology. In contrast to conventional systems that are centralized and employ long cables, the use of a sensor network is a decentralized approach, allowing the sensors are closer to the conditioning circuit, this brings certain benefits, such as reducing the length of the sensor cables decreasing the uptake of electromagnetic noise and decrease the impedance of the cable, improving the response signals generated by sensors.

They will be presented details of the circuit and the sensor node communication.

KEYWORDS: Sensor networks; Electric strain gages; Wheatstone bridge; Structural health monitoring; Electronic instrumentation; Data acquisition systems; CAN bus.

Capítulo 1

Introdução

As patologias estruturais de construções civis tem recebido ao longo dos anos bastante atenção da comunidade científica [7] [8], já que tem se avaliado a danificação e inutilização de obras, devido a alterações de ordem físico-química. Acrescentando-se a tal preocupação, o risco constante para a sociedade quando tais estruturas são implantadas em áreas que recebem grande fluxo de cargas e pessoas.

Desta forma, o monitoramento de integridade estrutural - Structural Health Monitoring (SHM) tem levantado novas propostas para detectar tais patologias, associando tecnologia, a fim de que se possa verificar anomalias de ordem físico-químicas nos materiais utilizados para a construção de obras civis. Para tanto, é necessário coletar dados da estrutura, usando sensores específicos para cada tipo de grandeza, registrá-los e posteriormente analisá-los, para que se defina o momento da manutenção ou até mesmo que se possa determinar o tempo de vida útil de uma construção civil [9].

Assim é fundamental promover vistorias locais, exames complementares não destrutivos, como: a esclerometria, ultrassonografia, pacometria, sondagem sônica, prova de carga, potencial eletroquímico; e exames destrutivos: determinação de resistências e medidas de elasticidade [10]. Ensaios são realizados na identificação de patologias e do comportamento da estruturas destas obras fazendo uso da evolução tecnológica [11].

Atualmente as medições de deformação em estruturas, pontes, paredes entre outras, são realizadas por sistemas de aquisição, com extensômetros ligados a estes sistemas por cabos longos e numerosos, com cada transdutor recebendo um par ou um trio de cabos metálicos e cada cabo devendo ser ligado em uma das entradas do sistema de aquisição.

O termo Obra de Arte Especial (OAE) vem sendo usado desde os primórdios das construções para transposição de obstáculos, eram realizadas com base no empirismo, mas

a partir do século XVII, a engenharia se modernizou e passou a usar métodos científicos, atualmente o termo OAE, ainda é designado para as pontes, viadutos, aquedutos e passarelas [12].

As pontes são considerados elementos fundamentais para a transposição de obstáculos e locomoção de pessoas e cargas. Nestas construções são exigidas da engenharia civil analisar patologias que a estrutura pode vir a sofrer, detectando anomalias e suas principais causas, a fim de garantir estabilidade e durabilidade da obra [11] [13]. Um dos principais motivos destas anomalias em pontes está nas patologias do concreto, que são oriundas das interações de elementos físico-químicos [14].

Deste modo, são empregados equipamentos de medição com sensores e *data loggers* com alta precisão, já que para se ter sucesso deve-se usar modelos realistas que identifiquem as deteriorações, associando leis de deformações, nível de segurança e gráficos. A técnica que vem recebendo destaque para a detecção de deformidades é a extensometria que emprega sensores *strain gages* ou extensômetro de resistência elétrica, onde estes transformam pequenas variações de dimensões do próprio corpo, em variações equivalentes de resistência elétrica [15].

Assim o presente estudo pretendeu-se projetar uma rede sensores, aplicada no monitoramento de deformações em estruturas, a fim de que diminuísse o comprimento e quantidade dos cabos metálicos, uma vez que estes são fonte de ruídos ou sofrem variação de suas propriedades elétricas em função da temperatura.

1.1 Estudo de caso

O Laboratório de Sensores e Sistemas Embarcados (LASSE) em parceria com Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia (NICAE) tem desenvolvido um nó-sensor capaz de condicionar sinais de extensômetros, de digitalizar o sinal proveniente do transdutor e assim transmitir os dados através de uma comunicação sem fio até um computador. Tal projeto tem parceria com a companhia Vale, para o monitoramento de pontes.

Então, em um primeiro projeto desenvolvido por Ataíde [16], projetou-se um circuito condicionador de sinal para extensômetro. Na construção do circuito foi utilizado amplificador de instrumentação, potenciômetros digitais, um filtro passa-baixa e um conversor analógico digital do módulo Zigbee.

Foi construído uma Placa de Circuito Impresso (PCI) contendo o módulo Zigbee integrado com o microcontrolador ATMEGA128RFA1 [17]. Este foi capaz de realizar um

pré-processamento dos dados capturados pelo conversor Analógico/Digital (A/D) e realizou a transmissão sem fio dos dados até um computador. Para tanto, foi desenvolvido um firmware para controlar o nó-mestre e o nó-sensor, Figura 1.1.

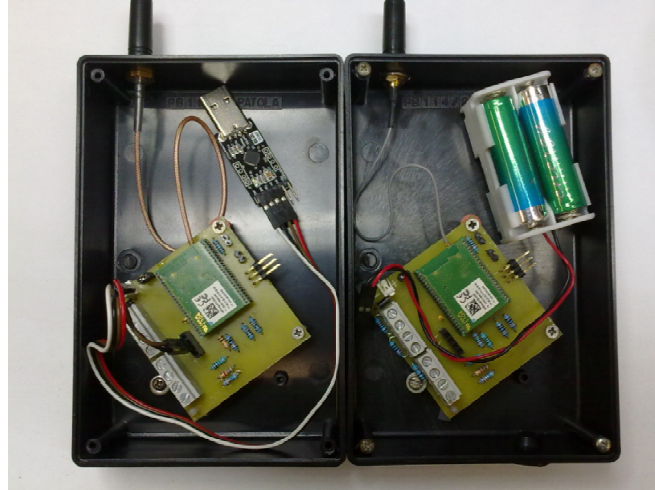


Figura 1.1: Primeiro protótipo com circuito condicionador para extensômetro.

O nó-sensor foi instalado o mais próximo possível do extensômetro, diminuindo a quantidade de cabos. Os dados foram convertidos de analógico para digitais no próprio nó-sensor e assim transmitidos por uma rede Zigbee, através de uma comunicação digital e sem fio, apresentando maior imunidade a ruídos no processo de transmissão. Posteriormente, os dados foram enviados até um computador onde foram gerados os gráficos para estudo da estrutura.

O Sistema de Monitoramento de Estrutura proposto tem como base de seu funcionamento a utilização de módulos de aquisição instalados na ponte, com cada nó sensor da rede funcionando com ou sem cabo. Os sensores: extensômetro, acelerômetro, sensor de temperatura e o anemômetro, converterão as suas respectivas grandezas físicas em sinais elétricos conduzidos através de cabos até os seus respectivos circuitos condicionadores de sinal, para que possam ser lidos por um conversor A/D.

Os sinais serão digitalizados, processados dentro do micro-controlador, formatando-os para serem encaminhados até o nó principal através da rede de sensores com ou sem fio. Assim os dados podem ser armazenados para futuras consultas.

Os extensômetros resistivos funcionam com base da variação da resistência elétrica em função da deformação sofrida pela estrutura, essas variações são convertidas em sinais elétricos. Os acelerômetros tem como base de funcionamento o uso de materiais piezoelétricos, que transformam uma vibração mecânica em sinal elétrico.

Os circuitos condicionadores foram desenvolvidos para adequar os sinais provenientes

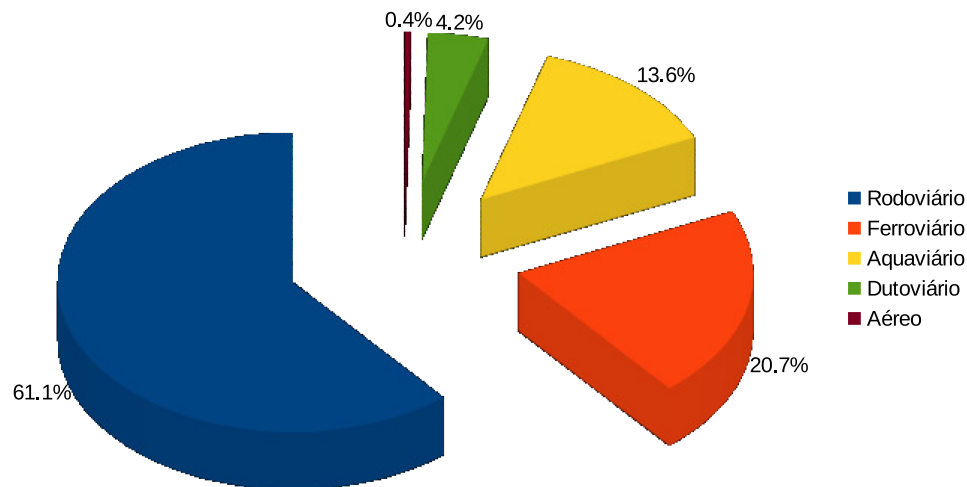


Figura 1.2: Composição da matriz de transporte no Brasil em 2016. Fonte [1]

excelente solução para sistemas alimentados a bateria ou pilha. Além disso, o desenvolvimento com este chip proporciona grandes benefícios, pois pode-se trabalhar com ferramentas para o desenvolvimento e programação totalmente gratuitas e *open source*.

1.3 Motivação

O primeiro protótipo [16] desenvolvido no LASSE demonstrou gráficos de deformação que se concluiu, que é necessário melhorar a sensibilidade do circuito de condicionamento, para que não se perca bits de resolução e capte pequenas deformações, e assim possam ser demonstradas no computador. Percebeu-se a necessidade de empregar um ganho ajustável, permitindo um melhor controle da sensibilidade.

Além de que, faz-se necessário melhorar o firmware, para aumentar o número de nó-sensores, e assim capturar um maior número de dados em variados pontos, determinando que os principais problemas, são:

- Determinação da sensibilidade do circuito de condicionamento, que foi sub-dimensionado na sensibilidade;
- Desenvolvimento do firmware, já que houve certa dificuldade pela bibliografia um tanto escassa;
- Baterias para assegurar que estas alimentem o nó-sensor em um longo período, por semanas ou meses.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

- O presente capítulo aborda a temática do trabalho, demonstrando o estudo de caso, revisão de literatura e a motivação da pesquisa;
- O capítulo 2 elucida os aspectos históricos das obras civis no Brasil, assim como as suas principais patologias e materiais utilizados, as pontes como OAE suas patologias e as metodologias de monitoramento;
- O 3º capítulo demonstra os fundamentos do sistema, apresentando uma abordagem sobre extensômetros e detalhes técnicos do nó-sensor;
- O 4º capítulo detalha a metodologia aplicada para o desenvolvimento do novo sistema proposto, assim como os testes que foram realizados;
- No capítulo 5 são apresentados detalhes sobre a programação do nó-sensor e do programa para o computador;
- No capítulo 6 são apresentados os resultados e a discussão consoante os experimentos já realizados no âmbito científico;
- No último capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Estruturas civis

2.1 Aspectos históricos

O homem e a sua busca por materiais de construção evoluiu com a história da civilização, já que instintivamente sempre se buscou estabelecer proteção em abrigos, dominando progressivamente técnicas utilizando pedra, madeira, concreto. Tais mudanças gradativas afetaram diretamente toda estrutura de uma sociedade, tanto no âmbito político, econômico e cultural [23].

No Brasil a década de 70 foi marcada pelo “milagre econômico” impulsionando a construção civil com obras como Rodovia dos imigrantes, ponte Rio-Niterói, usinas nucleares e outros [24]. Tanto que em 1970, as rodovias e pontes eram responsáveis por aproximadamente 73% do movimento de toda a carga brasileira, além de integralizar todo o território [25].

Com esta expansão desordenada e acelerada, algumas técnicas construtivas não foram aprimoradas, tanto que posteriormente com a crise econômica das décadas de 80 e 90, surgiram mão-de-obra pouco qualificada, materiais com pouca qualidade, manutenção inadequada [24].

Tal realidade contribuiu gradativamente para a deterioração das construções civis, caracterizado pelo abandono do Estado e atualmente, este proporciona um serviço de manutenção de péssima qualidade [25]. Tanto que progressivamente estudos são desenvolvidos para se realizar o monitoramento destas estruturas, a fim de que se garanta utilizá-las com segurança.

2.2 Patologias das construções

As Patologias das construções correspondem às enfermidades das estruturas civis, para as quais devem ser analisadas a origem, sintomas que se manifestam em anomalias nas estruturas e as consequências geradas por tais disfunções [26].

Tais disfunções podem ser associadas a fissuras, carbonatação, desagregação, disgregação, segregação, perda de aderência, corrosão das armações, corrosão do concreto, calcinação, reatividade álcali sílica, eflorescências, infiltração de água e expansão por umidade [27].

Segundo Souza e Ripper [19], as construções civis não possuem vida útil infinita, já que a sua durabilidade é influenciada por diversos fatores endógenos e exógenos como: material empregado para sua construção, ação ambiental, gravidade e mão-de-obra. Então a vida útil de utilização de uma estrutura consiste no tempo total em que a obra não perdeu a sua funcionabilidade e assim o seu uso [28].

Estas construções são submetidas a diversas ações que são: ações diretas que envolvem cargas permanentes que são fatores relacionados com a geometria de sua própria estrutura física e cargas acidentais causadas por sobrecargas de corpos externos; as ações indiretas que ocorrem devido às variações de aspecto físico-químico; e as ações excepcionais acometidas por ações ambientais e antrópicas do meio que as rodeia [27].

Baroni [28], descreve que a fadiga de uma construção civil é a mudança de sua estrutura interna devido a alterações contínuas de suas tensões em determinado intervalo de tempo. Estes danos de forma cíclica origina fissuras, caracterizando em um processo progressivo. Caso este ciclo de tensões for permanente gerando continuas deformações, podem atingir o limite de resistência do material causando a ruptura da estrutura [29].

2.2.1 Patologias das estruturas conforme os materiais utilizados:

2.2.1.1 Patologias do concreto

Atualmente o concreto é o material mais utilizado nas construções civis, como na construção de pontes. Tecnologias são aplicadas em sua fabricação e no seu uso, porém a execução de obras não acompanhou as práticas construtivas adequadas, ocasionando falhas nestas estruturas, além de gerar peças de concreto com qualidade inferior, já que fizeram uso de concreto mais fluido e com materiais mais finos, a fim de que pudesse diminuir o tempo de construção de um projeto civil [30].

Dentre as causas de patologias mecânicas e físicas pode-se citar o ciclo de gelo-degelo, que afeta o concreto antes do seu endurecimento impossibilitando o processo de hidratação do cimento, não tendo perdas significativas na resistência do material [31]. Ou depois do concreto já endurecido sem que tenha atingindo a resistência final, ocasionando no congelamento da água retida nos poros do material, causando a sua expansão e assim gerando uma pressão que dilata e provoca fissuração no concreto ao se descongelar [14].

Outro mecanismo de deteriorização, segundo Ferreira [14], são as tensões térmicas que ocasionam mudanças volumétricas como contrações e expansões no concreto devido às oscilações da temperatura na superfície que se ajusta rapidamente com a temperatura ambiental, diferentemente da temperatura interna do material. Tal processo proporciona o destacamento do concreto. O calor gerado internamente no concreto devido à hidratação do cimento, recebe destaque nas manifestações patológicas neste material, resaltando a ação do fogo [32].

A deformação lenta ou fluência, é uma deformação que o concreto sofre, devido ao carregamento contínuo, ocorre quando o mesmo está sob tração, compressão ou cisalhamento, sendo um fenômeno parcialmente reversível. A umidade ambiental também pode provocar deformação na estrutura, a que é denominada de fluência por secagem. Nesse caso, o concreto perde umidade para o ambiente, provocando uma retração [33].

O contato com substâncias químicas causa danos, também ao concreto, como o ácido, com a destruição do sistema poroso transformando a pasta do cimento, a alcalinidade provocando a corrosão das armaduras das estruturas deste material [34] [31].

A biodeterioração é a ação de microrganismos causando mudanças nas propriedades dos materiais do concreto, agindo na modificação da estética da pasta do cimento e comprometendo a integridade [11]. Outra forma de deteriorar este material muito utilizado na construção de pontes é a corrosão, com a oxidação dos metais além da corrosão das armaduras no concreto armado [10] [14].

2.2.1.2 Patologias do aço

O aço é um material bastante empregado na construção de pontes, é um elemento isotrópico que resiste a altas tensões, compressão e tração. Apresentam uma boa capacidade de deformação devido a ação de cargas, mas em altas temperaturas pode se torna frágil perdendo a sua resistência e ocorrendo deformação. Aços quando não revestidos podem sofrer corrosão, além de serem suscetíveis a sofrerem fadiga [35].

Vitório (2003) [27] cita que as vantagens de se empregar o aço em construções

civis, são: menor peso, menos custosa a construção, incombustibilidade e reutilização de estruturas. Porém, as suas desvantagens estão em necessidade de monitoramento constante, e a necessidade de mão de obra qualificada. Sabe-se que o aço possui uma elasticidade específica, tanto que ao ultrapassar este limite a estrutura pode sofrer uma deformação plástica, podendo ocasionar sua ruptura [35].

Segundo Brasil (2004) [35], a corrosão é o principal tipo de deterioração do aço, podendo se apresentar nas seguintes formas puntiformes, uniforme, generalizada, intergranular e intragranular. Os tipos de corrosão são: ambiental causado pela variação de temperatura, umidade e calor; a corrosão bacteriológica ocorre devido à ação de microorganismos presentes no meio em que este material se encontra; e corrosão sob tensões de tração ocorre quando o aço sofre altas trações, juntamente com o meio corrosivo.

O aço quando submetido a constantes ciclos de tensão pode estar sujeito a fissuras ou trincas de fadiga, cujas principais causas, são: tráfego alto de cargas pesadas, variações constantes da amplitude de tensões, qualidade do material e solda utilizada, e idade da ponte [35].

2.3 Pontes - Obra de Arte Especial Viárias (OEA's)

2.3.1 Contextualização de pontes

Conforme DNIT 010/2004 [35] uma OAE, constitui em:

”Estrutura, inclusive apoios, construída sobre uma depressão ou uma obstrução, tais como água, rodovia ou ferrovia, que sustenta uma pista para passagem de veículos e outras cargas móveis, e que tem um vão livre, medido ao longo do eixo da rodovia, de mais de seis metros. Ficam incluídos nesta definição viadutos, passagens superiores e passagens inferiores” (DNIT – NORMA 010/2004 – PRO, p. 3).

Milani e Kripka (2012) [36], citam que as pontes possuem diferentes finalidades, como: deve garantir a continuação de rodovias, ferrovias possibilitando ultrapassar obstáculos; tem que proporcionar o escoamento de cargas, tráfego de automóveis e pessoas em segurança; deve apresentar compatibilidade com o ambiente externo que o rodeia tanto em seu aspecto estrutural quanto estético.

O território brasileiro possui pontes de diferentes idades com diferentes finalidades, porém estas estruturas que já se encontram degradadas necessitam de periódica monitorações para que se realize a manutenção adequada [35].

Em 2007 o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) [37], fiscalizou 11 pontes situadas na BR-222 no trecho do rio Bacajá próximo a Rondo do Pará e Marabá, que garante o acesso a pequenas comunidades assim como escoamento de matérias primas, foi realizado vistorias fotográficas para a recuperação das mesmas, e todas apresentavam problemas no desgaste de suas estruturas que podem apresentar deformações e vibrações significativas podendo leva-las a ruptura.

Assim, é fundamental realizar vistorias, para garantir a vida útil destas estruturas, localizando os danos causados tanto pela fadiga gradual dos materiais que as constituem, quanto pelos agentes químicos ou ambientais.

2.3.2 Engenharia das pontes

A construção de uma ponte exige da engenharia civil condições fundamentais, como: estabilidade e durabilidade da obra, não se limitando a estes dois atributos necessitando analisar as patologias que esta estrutura pode vir a sofrer, como detectar as anormalidades e suas principais causas [11].

Estas OAE podem ser divididas, em: **infraestrutura** que é composta por elementos relacionado ao solo garantindo a sua fixação ao solo com fundações e encontros, a **mesoestrutura** compreende os pilares que faz a comunicação da infraestrutura com a **superestrutura**, esta última também chamada estrada, constitui na porção superior da ponte responsável pelo tráfego formada por tabuleiros de madeira, aço e concreto [13] [35].

Mattos (2001) [2] demonstra as partes constituintes de uma ponte na Figura 2.1. A infraestrutura é responsável por transferir os esforços provenientes da mesoestrutura e da superestrutura para o terreno. A mesoestrutura normalmente é composta por pilares. A superestrutura é a área útil da obra.

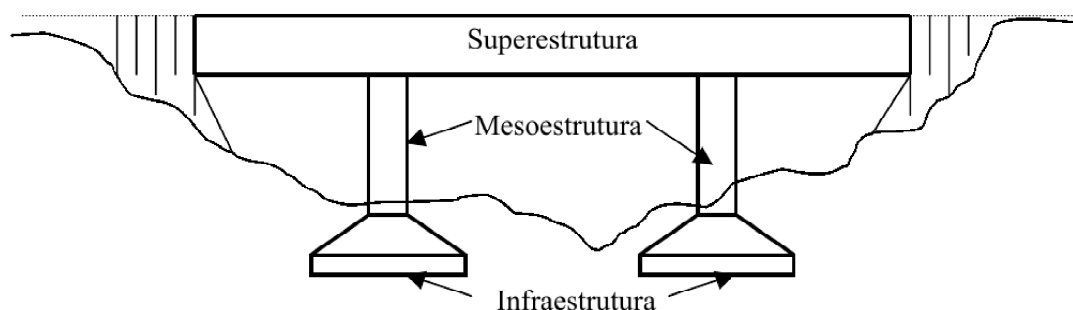


Figura 2.1: Representação básica de uma ponte. Fonte: [2]

Estas estruturas podem ser classificadas quanto a natureza do tráfego, em: rodoviárias, ferroviárias, aeroviárias, aquedutos, pedestres, canal e mistas [36].

2.4 Monitoramento das patologias das estruturas

Segundo Andrade (2012) [38], o SHM monitora as várias patologias sofridas pela estrutura, devendo gerar registros confiáveis, sendo utilizado vários sensores e sistemas auxiliares, como: sensoriamento, aquisição de dados, processamento de dados, comunicação, modelagem e detecção de dados. Então, para fazer esse monitoramento tem-se sensores mecânicos, fibra óptica e elétricos. No trabalho proposto faz-se uso de sensores elétricos, como: extensômetro e acelerômetro.

Assim, ensaios vem sendo realizados para identificar as patologias e o comportamento das estruturas de obras fazendo uso da evolução tecnológica, a fim de que possa garantir segurança [11].

Segundo Wenzel (2009) [39], um sistema de monitoramento de integridade estrutural para obter sucesso deve usar modelos realistas de monitoramento que identifiquem as deteriorações, associando leis de deformações, nível de segurança, símbolos e gráficos. Além disso devem possibilitar indicar situações críticas, servindo de suporte para a engenharia civil [40]. Este monitoramento deve prevenir as patologias em pontes, diminuindo os riscos em torno de 10% dos acidentes a nível global nestas estruturas [39].

Uma das formas para realizar a aquisição de dados de uma estrutura, é através do uso de sistemas de aquisição computadorizado. Para tanto, é necessário o uso de equipamentos capazes de ler um sinal analógico e converte-los em digital, dessa forma os dados podem processados e analisados em um computador, (Figura 2.2) este sensoriamento é um dos mais empregados para estruturas de OAE [38].

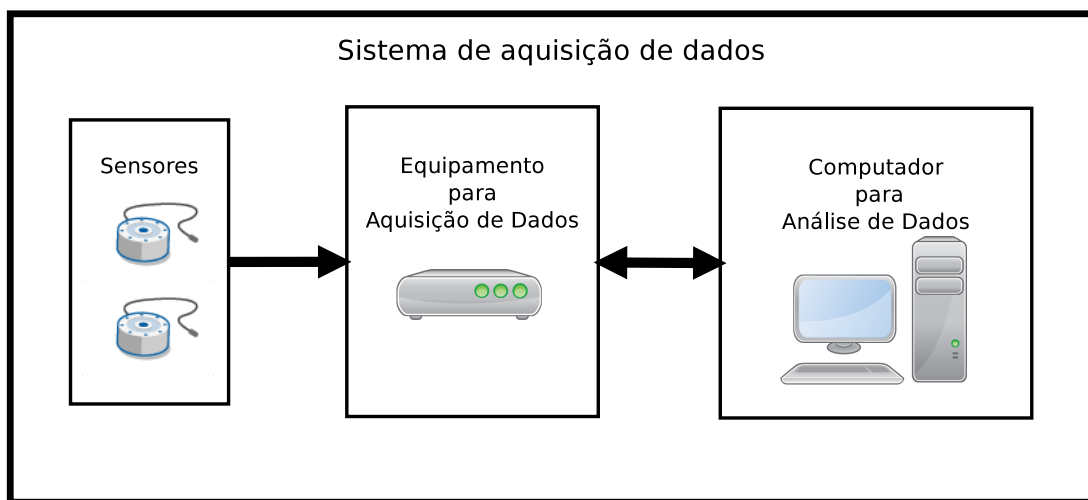


Figura 2.2: Esquema de um sistema computadorizado para aquisição de dados.

Uma das técnicas utilizadas para a monitoração de deformações é a extensometria

que emprega sensores denominados strain gages ou extensômetro de resistência elétrica que transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de resistência elétrica [40].

ADS2000 é um equipamento muito utilizado para realizar o condicionamento e a digitalização dos sinais elétricos, provenientes dos sensores instalados na edificação, fabricado pela LYNX [41]. Com este sistema, pode ser necessário empregar longos cabos entre os sensores e o sistema de aquisição, de modo que estes ficam expostos e acabam sofrendo variações de resistência com a temperatura ambiental (Figura 2.3), podendo ocorrer erros nas medições.



Figura 2.3: ADS2000 conectado a diversos cabos elétricos.

Capítulo 3

Fundamentos do sistema

3.1 Sinais analógicos e digitais

Sabe-se que a maioria das grandezas físicas são analógicas por natureza [6]. Grandezas analógicas são representadas por sinais com valores contínuos na amplitude [3]. Por outro lado, os sinais digitais apresentam valores discretos e finitos na amplitude [6].

Tanto que uma representação de um sinal analógico, convertido por um transdutor, possui o seu valor proporcional ao de uma tensão ou corrente elétrica, variando em um determinado intervalo de valores contínuos [6].

A vantagem na representação digital é que os dados podem ser armazenados no disco rígido do computador ou mídia digital, além de serem transmitidos de forma mais eficiente e confiável, já que os ruídos quase não afetam os sinais digitais quando comparados com os sinais analógicos [3]. Também podem ser aplicadas técnicas de processamento digital, por exemplo, filtragem digital.

Um sistema de conversão A/D, funciona da seguinte forma: o sinal analógico a ser aferido, entra por um sensor que produz um sinal elétrico de saída, que é análogo a grandeza física medida, este sinal é condicionado e filtrado por um circuito para assim ser convertido em um sinal digital, através de um conversor A/D [3]. Dependendo do sistema, também pode haver uma etapa de conversão do sinal digital para analógico, para tanto é empregado um conversor Digital/Analógico (D/A), como mostra a Figura 3.1 [42] [3].

a partir de um determinado sensor, acelerômetro e extensômetro. Cada tipo de sensor produz uma faixa de tensão analógica, que pode ser muito alta ou muito baixa para ser lida diretamente pelo conversor A/D. Nos dois casos pode-se ter problemas na leitura da tensão gerada pelo sensor, ou pelo fato de saturar ou pelo fato de não conseguir excitar a entrada do A/D.

O sinal amplificado é filtrado pelo filtro anti-aliasing e logo em seguida digitalizado pelo conversor analógico digital. O sinal digitalizado é encaminhado para o micro-controlador, onde é processado e transmitido pela rede de sensores até o *data logger*, sendo armazenado em uma memória não volátil.

1.2 Revisão da literatura

Os tradicionais sistemas de monitoramento baseados em extensômetros, que fazem uso de grandes cabos apresentam desvantagens significativas, apesar destes serem comprovadamente úteis. O SHM, determina um prógnostico da estrutura a partir da instrumentação instalada, fazendo a coleta dos dados de sinais de extensômetros e acelerômetros [18].

O SHM vem se tornando cada vez mais importante no cotidiano, já que diminui os custos de reparo e manutenção, além de evitar acidentes de estruturas mais antigas que começam a apresentar desgastes em seus elementos estruturais [19].

Os sistemas de aquisição baseado em pontes de wheatstone são bastante sensíveis às condições climáticas e interferências por ruído eletromagnético, afetando a análise dos dados [20].

Segundo o trabalho de Nikbin et al. (2012) [18] o SHM foi empregado para estruturas aeroespaciais, determinando a durabilidade e tolerância a danos. Também fizeram uso do Zigbee para o envio de dados para um computador, para serem armazenados e analisados.

As pontes podem ser classificada em OAE, sendo consideradas elementos fundamentais para o sistema de transporte, sua perda pode causar problemas na circulação de cargas. No Brasil, cerca de 61,1% das cargas são transportadas por rodovias e 20,7% por ferrovias do total de 794,903 Toneladas por Quilômetro Útil (TKU) (Figura 1.2) segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT) [1]. Segundo Soriano e Mascia [21], as pontes são obras fundamentais na transposição de obstáculos naturais ou não, tendo que garantir a segurança ao trafegar.

O trabalho em [22], apresenta o ATmega128RFA1, um chip composto por um microcontrolador e *transceiver* Rádio Frequência (RF) seguindo o padrão Zigbee, uma

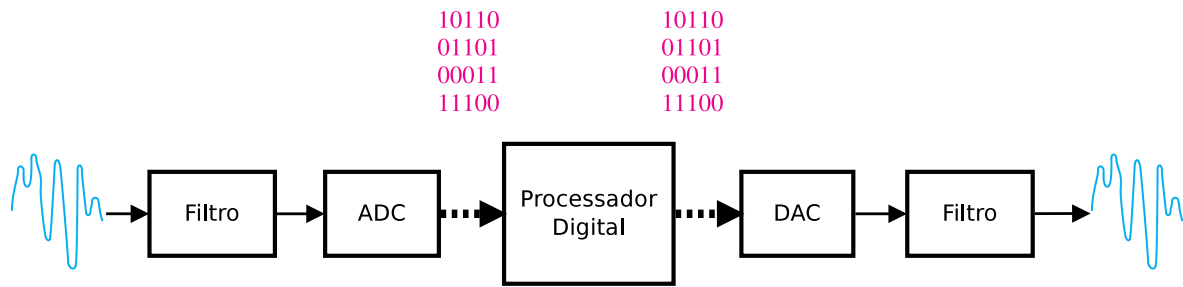


Figura 3.1: Elementos de um sistema para processamento digital de sinais. Fonte: [3] modificado

3.2 Extensômetros elétricos

Os extensômetros são sensores que se caracterizam por transformarem as pequenas variações das dimensões físicas do seu próprio corpo, em variações equivalentes a sua resistência elétrica. Tanto que são muito utilizados em inspeções, pois demonstram uma alta aplicabilidade e sensibilidade, precisão das medidas, já que convertendo as deformações em quantidade elétrica (V) precisamente garantem uma análise quantitativa eficiente [43].

Existem várias tipos de extensômetros, como: mecânicos, ópticos, acústicos e elétricos resistivos. Tanto que estes últimos tipos de extensômetros segundo Andolfato e seus colaboradores (2004) [44], pode ter material resistivo constituído de fios resistivos, lâmina, semicondutor e semicondutor por difusão, e de acordo com o material de base pode ser de papel, baquelita, poliéster, poliamida, assim como na sua configuração pode ser uniaxial, biaxial, roseta ou padronização especial, Figura 3.2 [4].

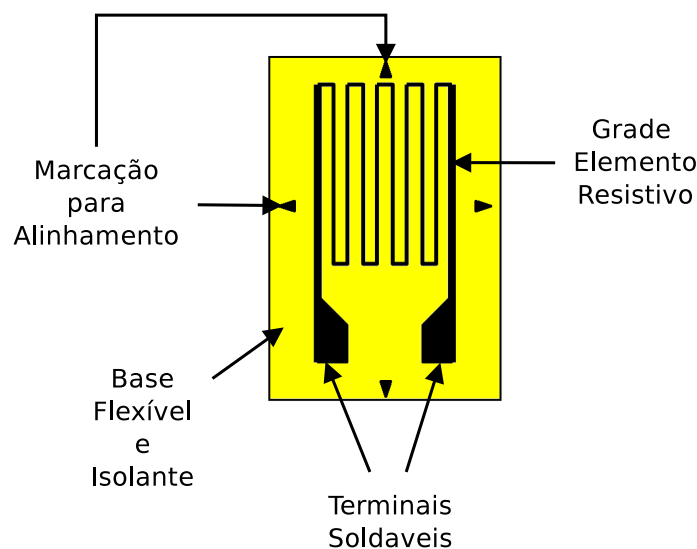


Figura 3.2: Elementos básicos de um extensômetro uniaxial. Fonte: [4] modificado

3.2.1 Princípios de funcionamento do extensômetro

Os extensômetros de resistência elétrica (Strain gages) são sensores construídos basicamente, com um fio condutor, depositado sobre uma base polimérica, resistente e flexível. Este condutor elétrico apresenta um comprimento L , uma resistência elétrica R e a uma resistividade ρ . A equação que relaciona os parâmetros supracitados com a resistência do fio condutor é dada por 3.1:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

Onde :

- R resistência do condutor (Ω);
- ρ resistividade do condutor - resistência específica do metal (Ωm);
- L comprimento do condutor (m);
- A área da seção transversal do condutor (m^2);

Segundo Almeida (1996) [45], os Strain gages, são sensores que medem deformações específicas, tanto que a resistência elétrica do condutor é proporcional a deformação linear. Ao aplicar uma força no condutor $\vec{F}$ (Figura 3.3), realizando uma tração ou compressão, essa solicitação mecânica, faz com que o comprimento sofra uma variação ΔL e a largura sofra uma variação ΔD , provocando assim, uma variação proporcional na resistência, ΔR .

Para entender melhor, como a variação das dimensões físicas influenciam a resistência do condutor elétrico, é necessário diferenciar a equação 3.1, da seguinte forma:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA \quad (3.2)$$

Sabendo que as derivadas parciais são:

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho = \frac{L}{A} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial R}{\partial L} dL = \frac{\rho}{A} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial A} dA = -\frac{\rho L}{A^2} \quad (3.5)$$

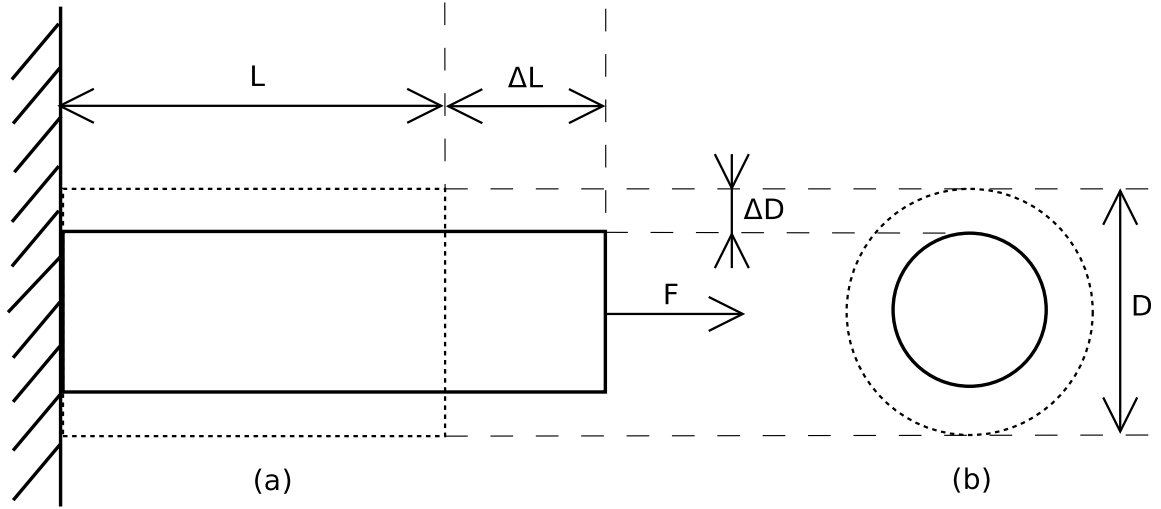


Figura 3.3: Representação da variação do comprimento L e da largura D , de um corpo, provocado pela ação de uma força F . **(a)** Corte longitudinal. **(b)** Corte transversal. Fonte: [4] modificado

Substituindo as equações 3.3, 3.4 e 3.5 em 3.2 e dividindo todos os termos da equação 3.2 por R , tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{L/A}{R} d\rho + \frac{\rho/A}{R} dL + \frac{-(\rho L)/A^2}{R} dA \quad (3.6)$$

Substituindo $1/R$ por $A/(\rho L)$, obtem-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{L}{A} \frac{A}{\rho L} d\rho + \frac{\rho}{A} \frac{A}{\rho L} dL + \frac{-(\rho L)}{A^2} \frac{A}{\rho L} dA \quad (3.7)$$

Resultando em :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (3.8)$$

A equação 3.8, mostra que a variação da resistência é influenciada pela resistividade (efeito piezoresistivo), pela mudança no comprimento e pela alteração na área da seção transversal do condutor.

Considerando um condutor com uma seção circular, como mostrado na Figura 3.3, a área é calculada da seguinte forma:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.9)$$

Diferenciando, tem-se que:

$$dA = \frac{\pi D}{2} dD \quad (3.10)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi D}{2} dD}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3.11)$$

Então:

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} \quad (3.12)$$

A relação entre o comprimento inicial do condutor e a variação final do comprimento é chamada de fator de deformação, também esse efeito pode ser percebido na seção transversal, como mostrado respectivamente pelas relações 3.13 e 3.14, pode-se observar que essa é uma razão adimensional, pois se trata de duas unidades de comprimento, por exemplo m/m ou in/in :

$$\varepsilon_a = \frac{dL}{L} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_t = \frac{dD}{D} \quad (3.14)$$

Onde:

- ε_a deformação axial:
- ε_t deformação transversal.

A relação entre a deformação transversal e axial é constante, respeitando os limites de elasticidade do material, e é denominada coeficiente de Poisson ν [46] [47]:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} = -\left(\frac{dD/D}{dL/L}\right) \quad (3.15)$$

Como ε_t e ε_a se relacionam pelo coeficiente de Poisson, pode-se assumir que:

$$\varepsilon_t = \frac{dD}{D} = -\nu \varepsilon_a \quad (3.16)$$

A equação 3.17 mostra como a deformação axial influencia na deformação transversal do condutor :

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\nu\varepsilon_a \quad (3.17)$$

Substituindo 3.13 e 3.17 na equação 3.8, resulta em:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_a + 2\nu\varepsilon_a \quad (3.18)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_a(1 + 2\nu) \quad (3.19)$$

Uma relação muito importante é a sensibilidade á deformação, K , ou *Gauge Factor*, como é usado na literatura em inglês. A sensibilidade depende da liga metálica empregada na fabricação do condutor elétrico, da forma construtiva e do tamanho, [46].

Organizando a equação 3.19, obtem-se:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_a \left(\frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon_a} + 1 + 2\nu \right) \quad (3.20)$$

$$K = \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon_a} + 1 + 2\nu \approx \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (3.21)$$

Dessa forma, entende-se que a relação entre a deformação axial ε_a e a variação da resistência ΔR do condutor, são diretamente proporcionais, como mostra a equação 3.22:

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (3.22)$$

Onde:

- K é a sensibilidade do extensômetro;
- ε é a deformação específica (m/m) do fio;
- R é a resistência elétrica nominal do fio (Ω), condutor;
- ΔR é a variação da resistência elétrica do fio (Ω), condutor.

Normalmente, o valor da sensibilidade K é especificado pelo fabricante do extensômetro, e fica descrito na embalagem do sensor. Como a maioria dos extensômetros são fabricados com ligas de cobre, níquel e manganês, a sensibilidade pode ser [46] [4] :

$$K \approx 2 \quad (3.23)$$

3.3 Ponte de wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito utilizado para medir a resistência de um resistor desconhecido. No caso da instrumentação é empregado em diversos tipo de sensores, pois esse tipo de circuito é extremamente sensível às variações nas resistências.

A ponte de Wheststone se caracteriza por um circuito que faz mensuração de variações relativas da resistência elétrica, apresentando maior precisão para medidas com variações pequenas da resistência [43]. O esquema básico de uma Ponte de Wheststone é mostrado na Figura 3.4, onde:

- V_e é a alimentação da ponte em excitação (V);
- R_i é a resistência elétrica;
- V_o é a saída da ponte (V);

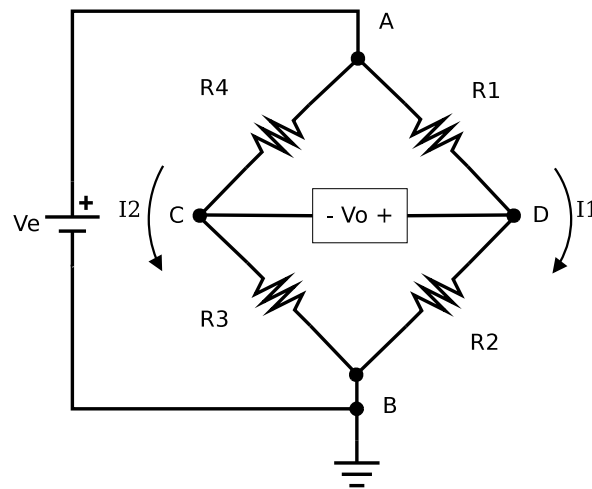


Figura 3.4: Ponte de Wheatstone.

A queda de tensão, V_i em cada resistor, é calculada utilizando a primeira Lei de Ohm:

$$V_i = R_i I_i \quad (3.24)$$

Para calcular a tensão em apenas um dos braços da ponte, primeiramente é necessário determinar a corrente que está circulando pelo respectivo braço da ponte. A corrente I_1 e I_2 é dada por 3.25 e 3.26:

$$I_1 = \frac{V_e}{R_1 + R_2} \quad (3.25)$$

$$I_2 = \frac{V_e}{R_3 + R_4} \quad (3.26)$$

Assim as tensões em V_{DB} V_{CB} , em relação ao terra (potencial de 0V), serão respectivamente:

$$V_{DB} = R_2 I_1 = R_2 \frac{V_e}{R_1 + R_2} \quad (3.27)$$

$$V_{CB} = R_3 I_2 = R_3 \frac{V_e}{R_3 + R_4} \quad (3.28)$$

Logo, a tensão de saída da ponte de wheatstone, pode ser calculada da seguinte forma

$$V_{DB} - V_{CB} = V_o = V_e \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.29)$$

Para que a ponte esteja em equilíbrio, $V_o = 0$, conclui-se a partir da equação 3.30, que os resistores devem assumir a seguinte relação 3.31.

$$V_o = V_e \left(\frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) \quad (3.30)$$

$$R_2 R_4 = R_1 R_3 \quad (3.31)$$

Segundo Camargo (2008) [46], para se obter a melhor sensibilidade da ponte de wheatstone, a resistência elétrica dos resistores devem ser iguais, isso implica dizer que as tensões V_{CB} e V_{DB} , serão a metade da tensão de excitação da ponte V_e (Figura 3.4).

3.3.1 Circuito em quarto-de-ponte

O circuito em quarto-de-ponte (Figura 3.5), ocorre quando há três resistores com resistência fixa e um extensômetro (elemento ativo).

Assim, $R_2 = R_3 = R_4 = R$ e $R_1 = R + \Delta R$ a deformação ε_1 a pode ser calculada pela seguinte equação 3.33 ou a tensão de saída pode ser expressa da seguinte forma 3.32.

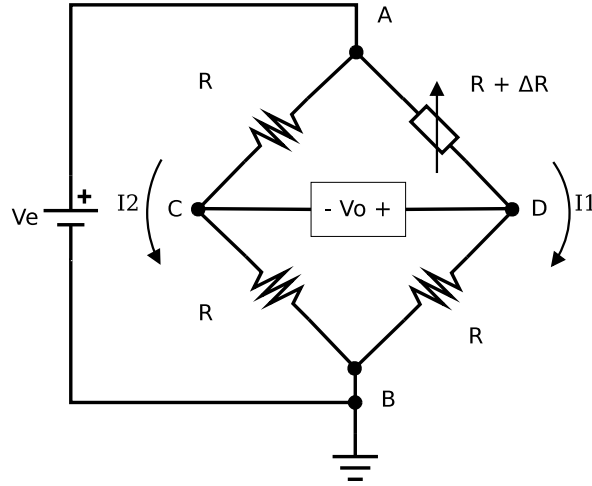


Figura 3.5: Ponte de wheatstone, com apenas um elemento ativo. Fonte: [5]

$$V_o = -\frac{V_e}{4} \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \quad (3.32)$$

Substituindo a Equação 3.22 em 3.32, obtem-se a deformação:

$$\varepsilon_1 = -\frac{4V_o}{(V_e - 2V_o)K} \quad (3.33)$$

3.3.2 Circuito em meia-ponte - No mesmo braço

O circuito de meia ponte (Figura 3.6) é usado quando se precisa melhorar a sensibilidade da leitura da ponte de wheatstone, nesse caso $R1$ sofre uma compressão ao mesmo tempo que $R2$ sofre uma tração e vice-versa, observa-se que os sensores estão conectados no mesmo braço da ponte de wheatstone. A Equação da tensão de saída, V_o , é dada por 3.34:

$$V_o = \frac{V_e}{2} \frac{\Delta R}{R} \quad (3.34)$$

A deformação é calculada pela seguinte Equação 3.35:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{4V_o}{V_e K} \quad (3.35)$$

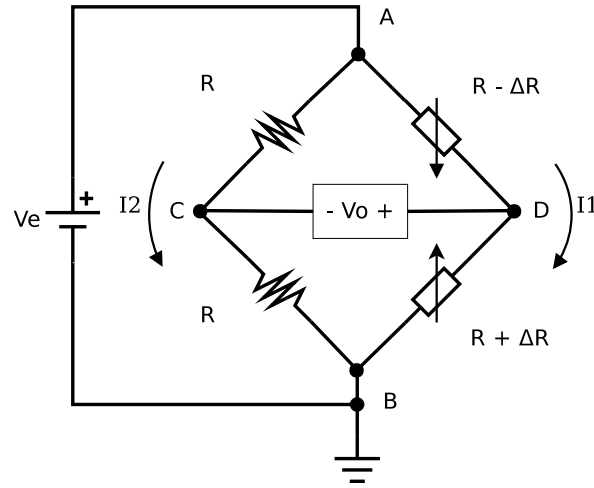


Figura 3.6: Ponte de wheatstone, com dois extensômetros ativos, no mesmo braço da ponte.

Fonte: [5]

3.3.3 Circuito em meia-ponte - Em braços opostos

O segundo caso para meia ponte é quando os dois extensômetros estão sob a mesma tensão mecânica. Nesse caso os sensores estão conectados em braços opostos da ponte de wheatstone, essa configuração melhora a sensibilidade em comparação ao circuito quarto-de-ponte, Figura 3.7, a tensão de saída é calculada por 3.36.

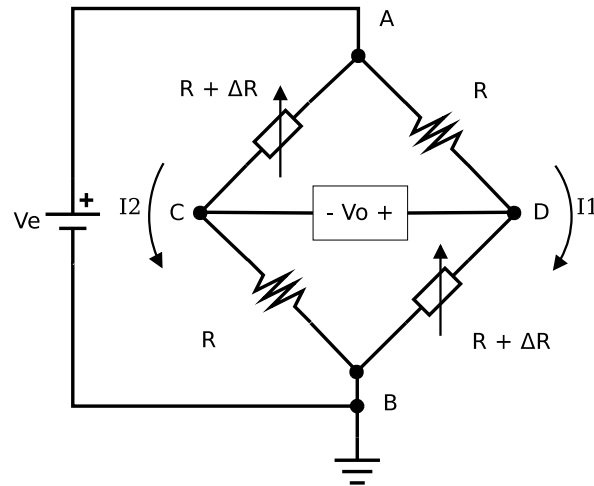


Figura 3.7: Ponte de wheatstone, com dois extensômetros ativos, em braços opostos da ponte.

Fonte: [5]

$$V_o = \frac{V_e}{2} \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \quad (3.36)$$

A deformação é calculada pela seguinte Equação 3.37:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_4 = \frac{2V_o}{(V_e - V_o)K} \quad (3.37)$$

3.3.4 Circuito em ponte completa

Quando a ponte é completa (Figura 3.8), todos os extensômetros devem sofrer deformação iguais, aumentando a sensibilidade (3.39). A tensão de saída ponte é dado por 3.38;

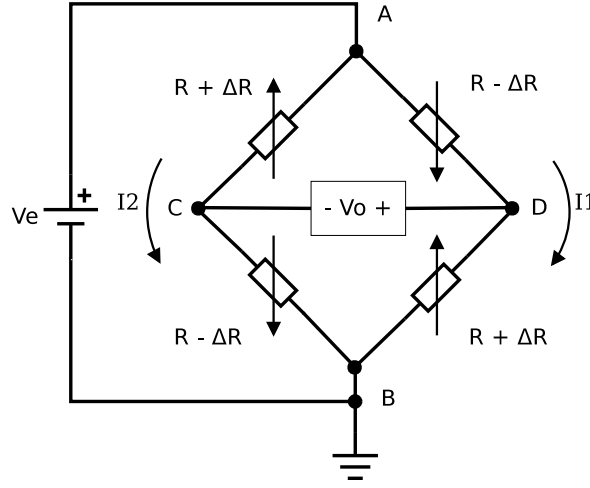


Figura 3.8: Ponte de wheatstone, com todos os extensômetros ativo. Fonte: [5]

$$V_o = V_e \frac{\Delta R}{R} \quad (3.38)$$

A deformação é calculada pela seguinte Equação 3.39:

$$\varepsilon = \frac{V_o}{V_e K} \quad (3.39)$$

3.4 Amplificador operacional

O Amplificador Operacional (AmpOp) é um componente analógico muito versátil, pois permite construir diversos tipos de circuitos. Pode-se citar integrador, diferenciador, somador, comparador, entre outros tipos de configuração. Considerando o caso ideal, o amplificador é

um componente com dois terminais de entrada (IN_+ e IN_-) e um de saída (V_o), a tensão de saída é calculada pela diferença de tensão entre os terminais de entrada multiplicado, idealmente, por um ganho infinito [6], mas apenas acrescentando alguns resistores e um resistor entre IN_- e V_o , o ganho pode se controlado.

3.4.1 Amplificador de diferenças - Subtrator

Entre as diversas configurações conhecidas de montagem de AmpOp , o amplificador de diferenças é o mais indicado para sinais muito pequenos, normalmente sobreposto a um nível tensão (modo comum) 3.9 [6]. A tensão de saída é calculado pela Equação 3.40:

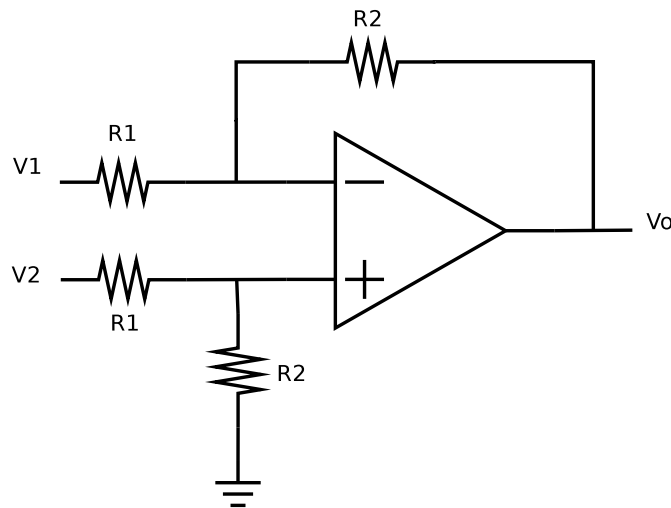


Figura 3.9: Amplificador da diferença. Fonte [6] modificado

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (3.40)$$

3.4.2 Amplificador de instrumentação

Para aumentar a impedância de entrada do circuito e melhorar a rejeição do modo comum, emprega-se mais dois amplificadores na entrada do AmpOp subtrator, esse novo arranjo de circuito é denominado amplificador de instrumentação, como mostrado na Figura 3.10.

Este circuito é muito empregado para amplificar sinais diferenciais, gerados por sensores baseado em ponte de wheatstone. A tensão de saída é calculada através da Equação 3.41.

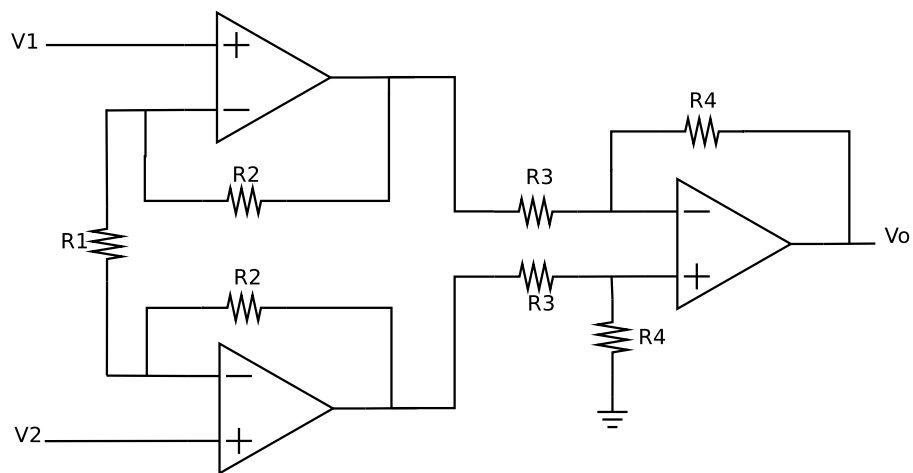


Figura 3.10: Amplificador de instrumentação. Fonte [6] modificado

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1) \quad (3.41)$$

Capítulo 4

Projeto do hardware

Este capítulo abrangerá o desenvolvimento do nó sensor, descrevendo sobre o sensor, condicionador de sinal, digitalização do sinal e sobre a comunicação entre o nó sensor mestre (Monitor) e o nó escravo.

O nó sensor é o responsável por realizar a leitura dos sensores que estão instalados na estrutura, fazendo a conversão de sinal analógico para o digital. Não utiliza longos cabos, deste modo não acabam sofrendo interferências de intempéries físicas, garantindo maior confiabilidade na aquisição dos sinais captados pelos extensômetros e acelerômetros.

Então, foi planejado um nó sensor versátil composto de duas partes, sendo uma placa para o processamento dos sinais e comunicação digital. E a segunda placa contendo condicionador de sinal específico para um tipo de sensor (extensômetro ou acelerômetro), incluindo o conversor analógico-digital. Deste modo, facilitou-se o desenvolvimento do condicionador de sinal para o extensômetro, essa estratégia permite integrar novos sensores.

4.1 Módulo de controle de sinal - Placa base

O módulo de controle de sinal (placa base), é uma parte do circuito responsável pelo suporte das placas condicionadoras e gerenciamento dos dispositivos conectados a mesma. Este módulo foi desenvolvido no LASSE da Universidade Federal do Pará, Belém.

Para o esquemático e leiaute do projeto foi utilizado o software da Mentor Graphics, que auxiliou no desenho de circuitos impressos, gerando arquivos Gerber, que foram encaminhados para uma empresa externa. Deste modo, foi confeccionada uma PCI em fibra de vidro com dupla face de cobre. Posteriormente realizou-se o posicionamento e soldagem dos componentes eletrônicos.

Os seus constituintes, são: fonte de alimentação, microcontrolador, interfaces de comunicação, sistema para relógio em tempo real, entrada para o cartão de memória e a interface para a conexão das placas condicionadoras de sinais (Figura 4.1), o tamanho do circuito impresso do protótipo foi de 10x10 cm (Figura 4.2).

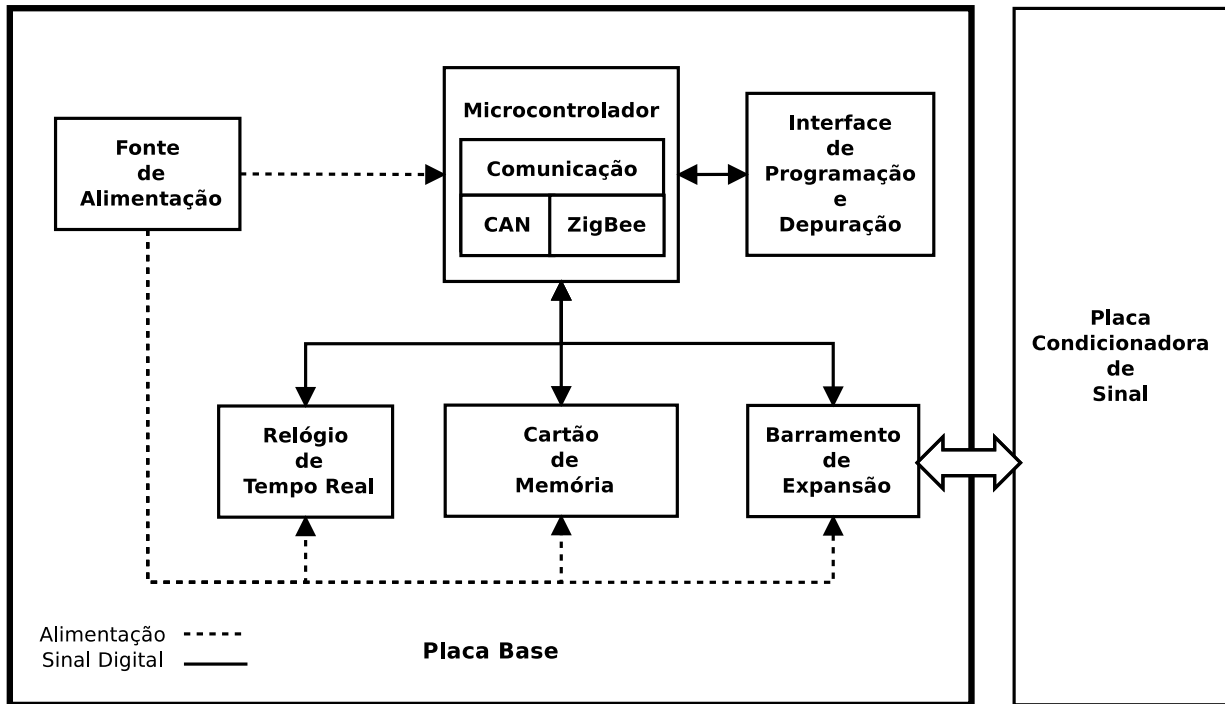


Figura 4.1: Diagrama da placa base

4.1.1 Fonte da alimentação

O projeto do nó sensor incluiu uma fonte de alimentação chaveada e um pequeno regulador low-dropout (LDO), sendo escolhido um regulador chaveado, pois se fez necessário uma alimentação de 24 volts para os acelerômetros.

Este primeiro regulador foi capaz de trabalhar com tensões variando entre 7 à 40 volts Direct Current (DC), regulando para 5 volts. O segundo regulador é um LDO. Este é empregado para baixar a tensão para 3.3V, ao mesmo tempo diminuir o ruído que a fonte chaveada possa gerar e passar para os circuitos mais sensíveis, que inclui o microcontrolador, o conversor A/D e os condicionadores de sinal analógico e assim garantir uma estabilidade na leitura dos sensores. A Figura 4.3 mostra a distribuição dos reguladores de tensão.

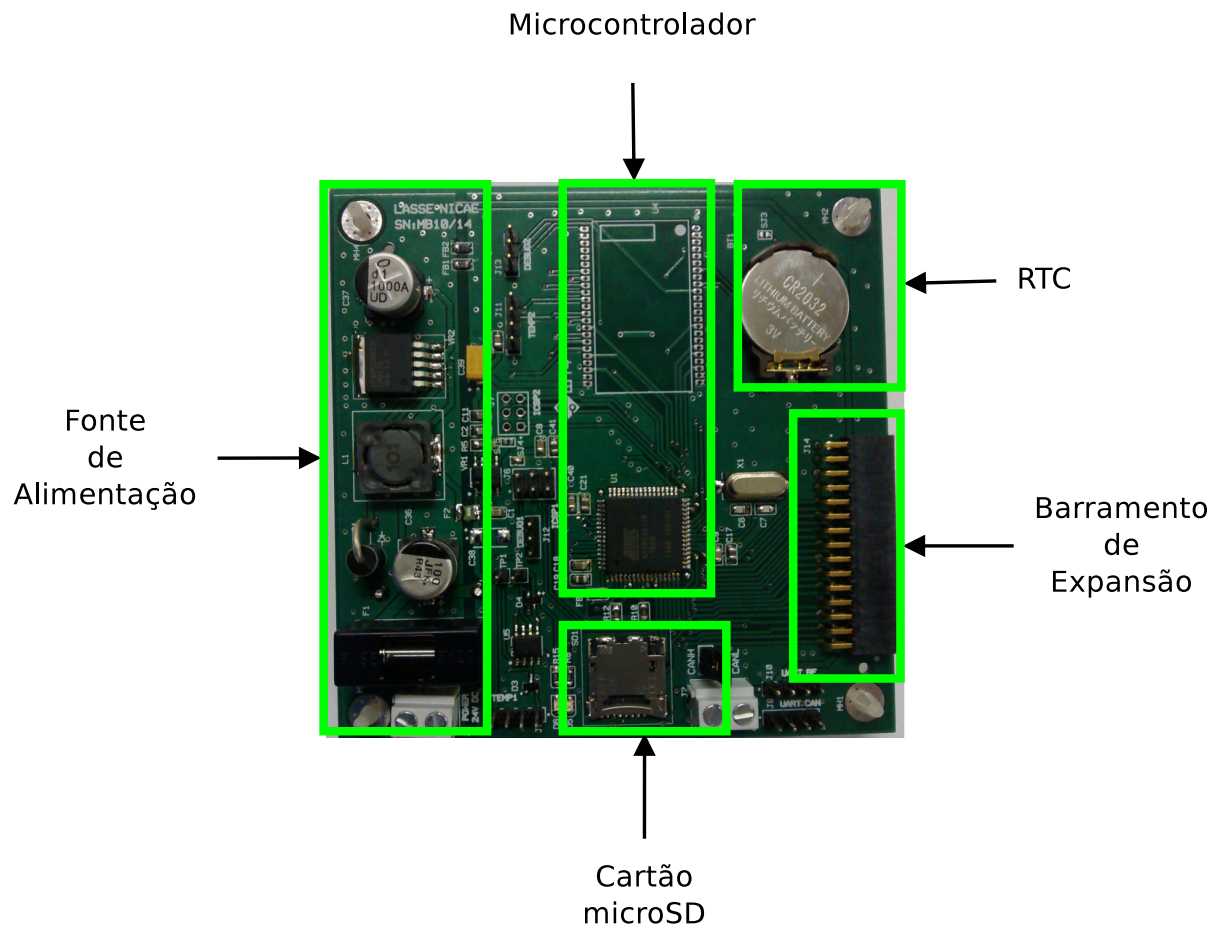


Figura 4.2: Leiaute da placa base

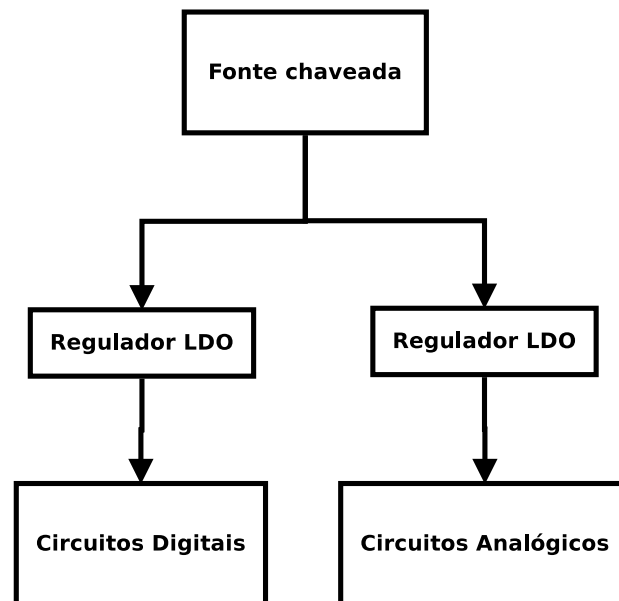


Figura 4.3: Diagrama da fonte de alimentação

4.1.2 Microcontrolador e interfaces de comunicação

Responsável por executar o Software no nodo sensor, gerenciando os demais dispositivos do circuito, utilizou-se um microcontrolador AT90CAN128 da Atmel [48], o que possui suporte a comunicação CAN, com memória *Flash* de 128K Bytes e Random-Access Memory (RAM) 4K Bytes.

Utilizou-se General Purpose Input/Output (GPIO) que são pinos programáveis para ativar ou desativar determinados dispositivos do nodo sensor. O Serial Peripheral Interface (SPI) possibilitou a comunicação com o cartão de memória e com placa condicionadora de sinal. A interface Inter-Integrated Circuit (I²C) controlou o relógio de tempo real. Os Timers/Counters e a Interrupt Unit auxiliaram na determinação de uma base de tempo para realização da leitura dos sensores em intervalos regulares, fixando uma taxa de amostragem.

A interface Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) foi usada para a comunicação entre o nodo sensor e o computador, mas foi necessário o uso de um conversor Universal Serial Bus (USB) para USART. A utilização do CAN possibilitou uma comunicação em rede, que permitiu realizar o gerenciamento dos dados entre os diversos nós sensores (Figura 4.4).

4.1.3 Relógio em tempo real

O relógio em tempo real auxiliou no registro dos dados recebidos, contando a hora e o dia em que determinado sinal foi gerado, fazendo parte da função do *data logger*, que armazenou no cartão de memória os sinais/dia/hora. Elegeram-se o DS3231 [49], por se avaliar em testes que este componente apresenta pouco atraso, no máximo 0.2 segundos por dia, em comparação a outros modelos disponíveis no mercado.

4.1.4 Entrada para cartão de memória e interface para a conexão das placas condicionadoras de sinais

Fez-se a opção pela entrada de cartão de memória, pois expande-se a capacidade de armazenamento de informações, sendo um item facilmente encontrado nas lojas. O cartão possui capacidade maior ou igual a 2GBytes, além de demonstrar simplicidade em sua utilização e a facilidade de encontrar exemplos na internet, para auxiliar na programação do *firmware*.

A interface para a conexão das placas condicionadoras de sinais é um conector, que

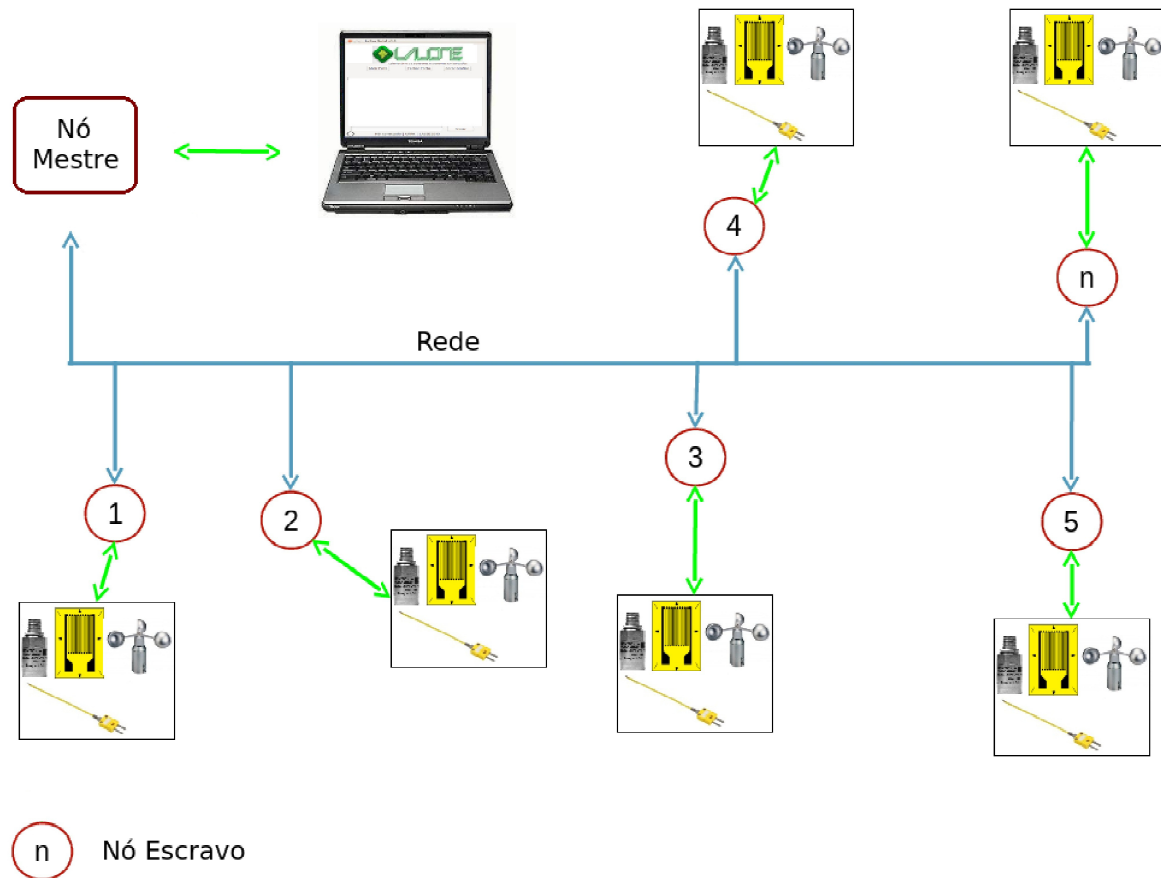


Figura 4.4: Topologia rede CAN. Nó sensores com os possíveis sensores (1,2,3,4,5,...,n).

apresenta uma disposição de pinos contendo os principais tipos de comunicações que o microcontrolador dispõe, além de proporcionar pinos de alimentação. São 15 pinos organizados em duas linhas, que compartilham tanto alimentação quanto caminho para dados. Elegeu o padrão de espaçamento de 2,54 mm entre pinos, devido a sua facilidade de ser encontrado no mercado local.

4.2 Módulo do condicionador de sinal

O módulo condicionador foi projetado de forma a adequar os sinais capturados pelos sensores, garantindo assim que a faixa de excursão do sinal fique dentro dos limites aceitáveis de tensão, definidos pelo fabricante do conversor A/D.

O sinal primeiramente é amplificado, em seguida vai para Filtro anti-aliasing e posteriormente é digitalizado através do conversor analógico digital (Figura 4.5). Este sinal digitalizado é conduzido para o micro-controlador através de um barramento de comunicação

digital, onde é processado, organizado dentro do frame CAN e transmitido pela rede de sensores até o *data logger* (nó mestre), podendo armazená-lo em uma memória não volátil, cartão micro-SD ou salvando em um computador.

Foi desenvolvida uma PCI de forma a se encaixar na placa base (Figura 4.6)

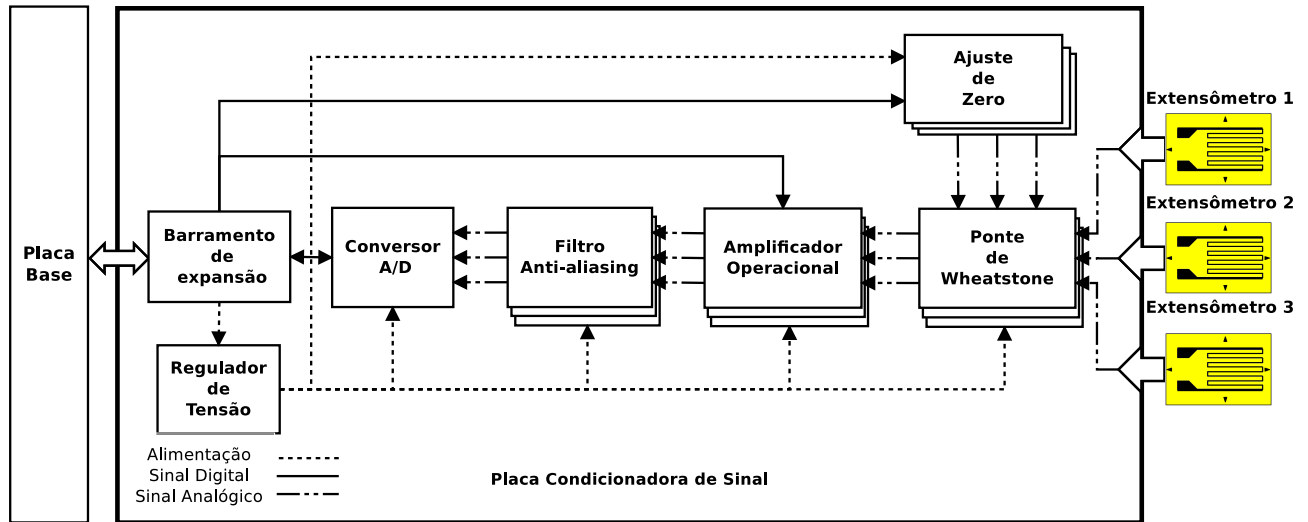


Figura 4.5: Diagrama da placa condicionadora de sinal

4.2.1 Ponte de wheatstone

A ponte de wheatstone é a etapa inicial, a partir dela é possível ler um valor de tensão devido a deformação do extensômetro. O diferencial no presente trabalho, está na inserção do pontenciômetro nos braços da ponte de forma a balancear a mesma, definindo um valor inicial de entorno de 0 Volts, garantindo uma referência para os valores que serão lidos.

É um $\frac{1}{4}$ de ponte para sensores de 120Ω , valor pré-definido aos objetivos do projeto. Por ser fixa, impossibilita empregar sensores de outros valores, por exemplo de 350Ω ou 1000Ω . Sendo formada pelos resistores R_3 , R_4 e R_5 , o sensor é inserido na ponte pelo conector J_1 , o circuito de balanceamento é formado pelo resistor R_6 e pelo pontenciômetro digital U_4 , como mostrado na Figura 4.7.

Para os cálculos foi considerando um desvio de $+1\%$ na resistência dos resistores R_3 e R_4 e de -1% em J_1 e R_5 , e aplicando na Equação 3.29, obteve-se a faixa de ajuste, que foi de $\pm 33mV$.

Observando o circuito da Figura 4.8, as tensões V_a e V_b não se modificam, com a variação da posição do cursor do pontenciômetro U_4 . Logo, esses dois valores foram os limites do ajuste

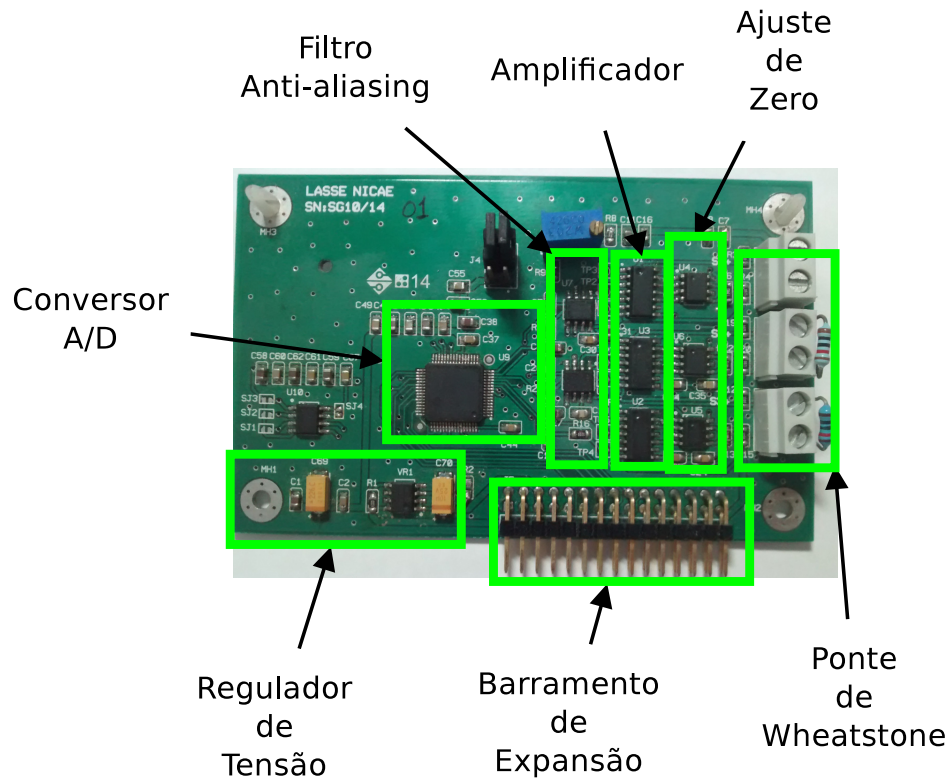


Figura 4.6: Módulo condicionador de sinal para extensômetro.

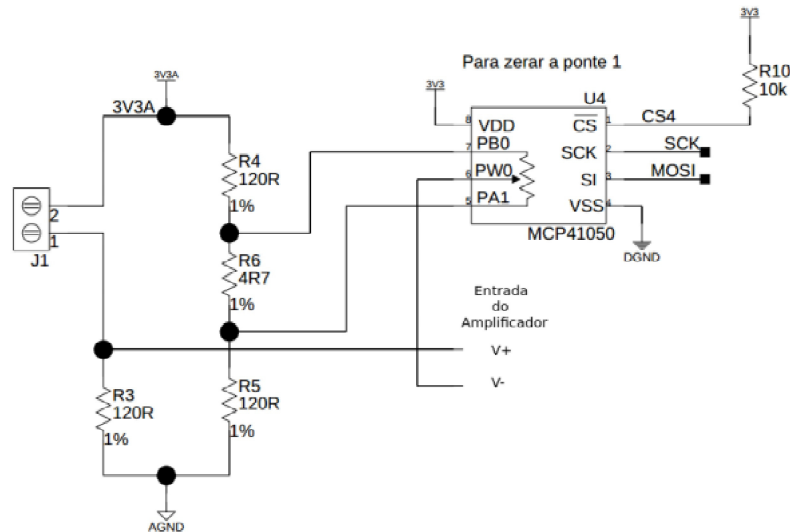


Figura 4.7: Ponte de wheatstone do projeto.

para zerar a tensão de saída da ponte, sendo V_a igual a 1,683V e V_b igual a 1,616V. O R_6 foi escolhido de forma a permitir esse ajuste, mas testes mostraram que esse resistor poderia ser menor, melhorando a precisão no ajuste.

A Equação 4.1 e a 4.2 demonstram a faixa de ajuste para correção do *offset*, e realizar

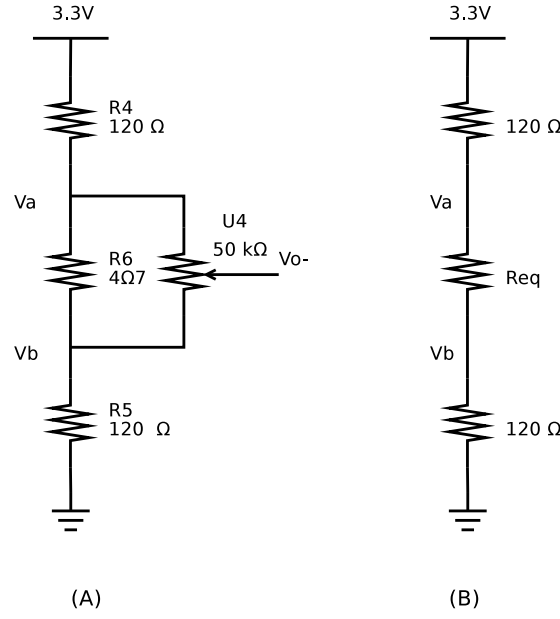


Figura 4.8: Simplificação do circuito de balanceamento, para calculo de V_a e V_b . Em **A**, circuito com o potenciômetro de 50kΩ. Em **B**, circuito equivalente.

o balanceamento da ponte de wheaststone.

$$V_a = \frac{V_{cc}(R_5 + R_{eq})}{R_4 + R_{eq} + R_5} \quad (4.1)$$

$$V_b = \frac{V_{cc}R_5}{R_4 + R_{eq} + R_5} \quad (4.2)$$

$$V_{o-} = n(V_a - V_b) + V_b \quad (4.3)$$

Onde:

n é um número entre 0 e 1 ou porcentagem, que representa o movimento do cursor do potenciômetro, como mostrado no esquema da Figura 4.9.

4.2.2 Controle de ganho

O circuito de aquisição permite o ajuste do ganho de sinal para os sensores, esse ajuste é realizado através dos amplificadores com controle digital. Empregou-se o LMP8358 [50], pois este é um amplificador de instrumentação, próprio para circuitos baseados em ponte de wheatstone.

O circuito de aquisição foi projetado para trabalhar com uma grande faixa de valores de deformação, conforme a Tabela 4.1, os valores apresentados são teóricos.

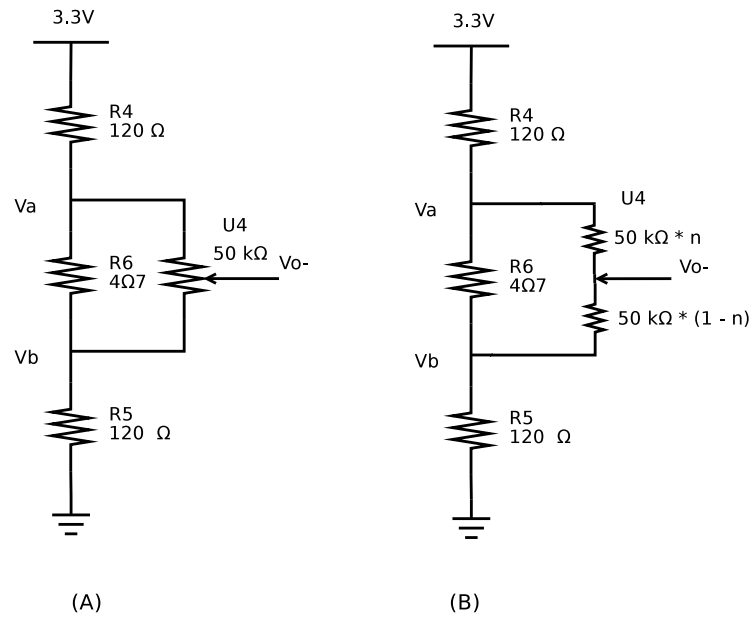


Figura 4.9: Substituição do potenciômetro por resistores, para auxiliar no calculo. Em **A**, circuito com o potenciômetro de 50kΩ. Em **B**, circuito equivalente, $0 \leq n \leq 1$.

Tabela 4.1: Limites da deformação ($\mu m/m$) relacionado ao ganho

Ganho	Máxima deformação	Minima deformação
10	93973.9	5.75820
100	9397.39	0.57582
500	1879.47	0.11516
1000	939.739	0.05758
3000	313.246	0.01919
6000	156.623	0.00959
12000	78.3116	0.00479

Para ter a capacidade de ajuste, foi empregado um amplificador com ganho ajustável, esse ajuste é realizado por um programa instalado no computador.

A etapa de amplificação é composta por dois amplificadores, o primeiro está conectado diretamente na saída da ponte de wheatstone, este apresenta os maiores ganhos, com os seguintes valores 10, 20, 50, 100, 200, 500 ou 1000. O segundo amplificador está integrado dentro do conversor A/D, e também pode ser configurado por software usando um dos seguintes valores 1, 2, 3, 4, 6, 8, ou 12, o ganho total é a composição dos ganhos de cada amplificador.

4.2.3 Conversor A/D

Foi empregado o circuito integrado ADS1194 [51], pois este componente possui algumas características importantes que são, a amostragem simultânea de todos os canais analógicos, apresenta uma resolução de 16 bits, a taxa de amostragem que pode chegar a 8000 amostras por segundo e também levou-se em consideração a disponibilidade no mercado local.

A conversão do sinal analógico e seu correspondente digital está resumido na Tabela 4.2, sendo V_{REF} a tensão de referência do conversor A/D.

Tabela 4.2: Tabela de conversão entre o sinal analógico e o código digital do ADS1194

Sinal de entrada	Código correspondente
$\geq V_{REF}$	0x7FFF
$+V_{REF}/(2^{15} - 1)$	0x0001
0	0x0000
$-V_{REF}/(2^{15} - 1)$	0xFFFF
$\leq -V_{REF}(2^{15}/(2^{15} - 1))$	0x8000

Capítulo 5

Projeto do software

O presente capítulo abarangerá o desenvolvimento de dois software, sendo este o responsável por controlar o nó sensor, estando embutido no microcontrolador, e o outro encarregado de gerenciar os nós sensores, este último fica em um computador.

O software do microcontrolador é responsável por gerenciar a comunicação entre o nó sensor e o computador, podendo ser realizado através do barramento CAN ou da USART. Além de realizar o controle dos amplificadores e a leitura do conversor A/D externo.

Já o software do computador, ficou responsável por enviar comandos básico, como: ajustar o ganho, iniciar ou pausar a leitura dos sensores, salvar os dados capturados pelo nó sensor. Porém, para poder interpretar os dados salvos, utilizou-se o Matlab.

5.1 Firmware

O firmware é um pequeno programa encarregado de controlar toda a placa do nó sensor, também é responsável pela comunicação, recebimento e envio dos dados ao computador, ajustar o ganho dos amplificadores, balancear as pontes através dos potenciômetros digitais, configurar o conversor A/D, e iniciar ou parar a conversão dos sinais dos sensores.

Utilizou-se uma estratégia de desenvolvimento baseado na teoria de "Máquinas de estados finitos", que consistem em resolver problemas (que no presente estudo é o controle do nó sensor) executando apenas um comando por vez, que são fornecidos pelo computador, então tem-se um conjunto finito de instruções, que são executadas de forma sequencial. Esses comandos, são: balancear a ponte, configurar o ganho do amplificador, iniciar e finalizar a conversão analógico para digital, como mostrado na Figura 5.1.

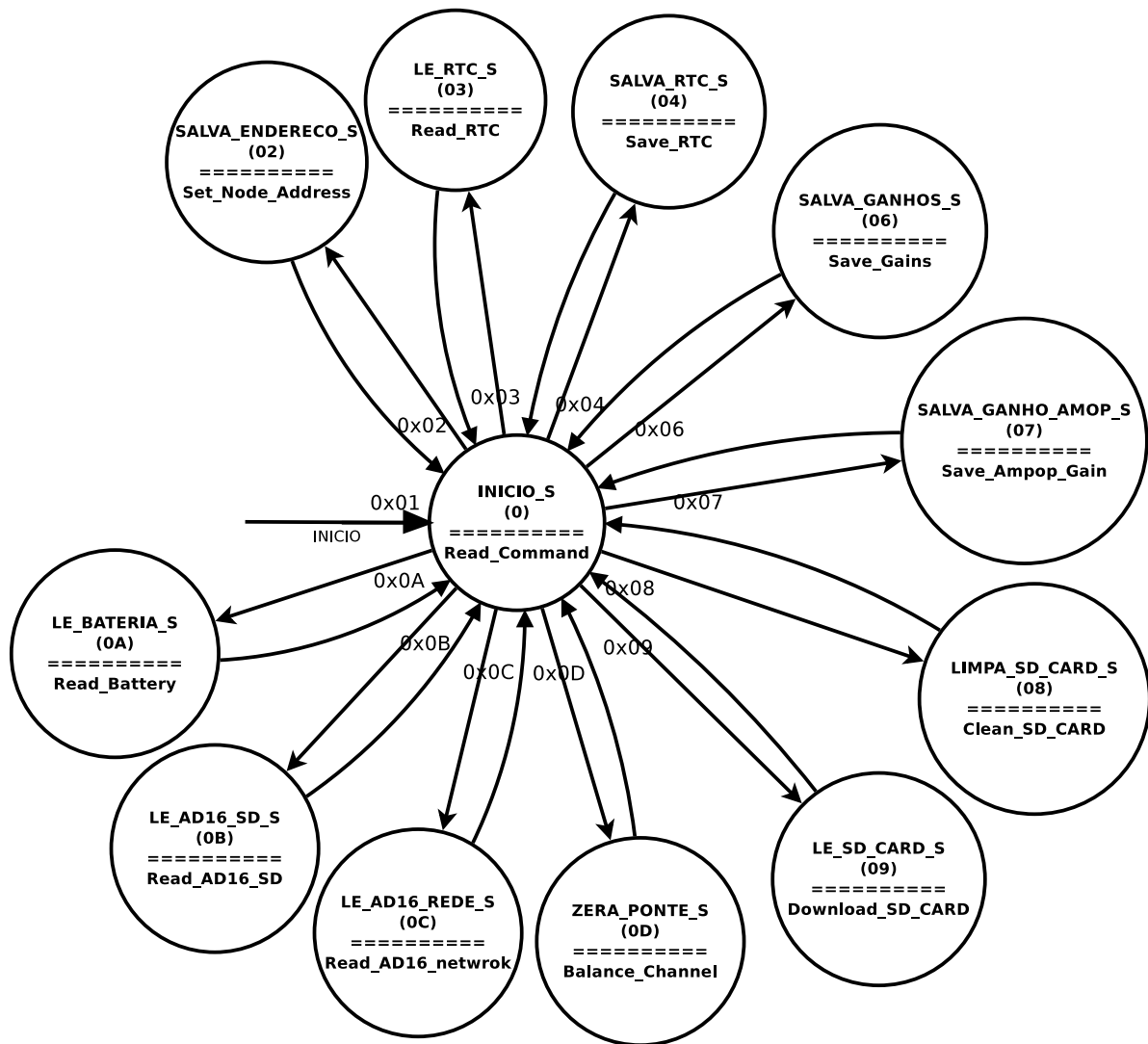


Figura 5.1: Máquina de estados finitos, representando o funcionamento da placa base.

As principais funções foram:

- INICIO_S - estado inicial do nó sensor, fica aguardando um comando para realizar alguma operação;
- SALVA_ENDERECO_S - usado para armazenar o endereço do nó sensor, é uma identificação única na rede de sensores;
- LE_AD16_REDE_S - responsável por realizar a amostragem do sinal dos sensores e enviar os dados para o computador;
- LE_AD16_SD_S - responsável por realizar a amostragem do sinal dos sensores e armazenar no cartão micro SD do próprio nó sensor;
- ZERA_PONTE_S - usada para balancear a ponte de wheatstone do extensômetro;

- SALVA_GANHOS_S e SALVA_GANHO_AMPOP_S - responsáveis por configurar os ganhos dos amplificadores;
- LE_RTC_S - o nó sensor apenas verifica se a data e a hora estão sincronizadas com o nó mestre;
- SALVA_RTC_S - o nó sensor sincroniza a data e a hora com o nó mestre;
- LE_BATERIA_S - verifica a tensão da bateria, mas só é útil quando o nó sensor está configurado com a comunicação sem fio e alimentado por bateria;
- LIMPA_SD_CARD_S - rotina responsável por apagar os dados do cartão micro SD, objetivando liberar espaço;
- LE_SD_CARD_S - usado para transferir os dados salvos no cartão micro SD , para o nó mestre e assim repassar ao computador;

5.1.1 Ajustar o ganho do circuito condicionador

O ajuste do ganho consiste em ser uma etapa fundamental do condicionador de sinal, pois permite elevar a tensão medida pelo sensor a um nível que possa ser lido pelo conversor A/D.

O ganho é dado por dois amplificadores, o ganho total é calculado pela multiplicação dos ganhos de cada amplificador.

Este ajuste do ganho é determinado pelo operador do sistema, que escolhe através de um programa rodando no computador, que é transmitido para o nó sensor. Assim, o nó sensor decodifica o protocolo de comunicação, e deste modo há a seleção de ganho para cada amplificador.

O protocolo de comunicação, foi definido como uma sequência de 93 bits, onde os 29 primeiros apresentam o cabeçalho da informações como: endereço do nó sensor, comando a ser executado e contador de mensagem. O restante dos bytes, representa o transporte dos dados de configuração de cada sensor (a cada dois bytes contem informação de um sensor), como demonstrado nas tabelas a seguir, Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Cabeçalho do protocolo de comunicação

Função	Frame CAN			
	Comando	Reservado	Endereço	Contador de mensagem
Bits	b28-b21	b20-b18	b17-b08	b07-b00
Quantidade de bits	8	3	10	8

Tabela 5.2: Dados do protocolo de comunicação

Função	Sensor 3	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 0
Bits	b63-b48	b47-b32	b31-b16	b15-b00
Quantidade de bits	16	16	16	16

5.1.2 Algoritmo para correção do offset

No projeto do circuito condicionador foi incluído um circuito capaz de balancear a ponte de wheatstone automaticamente, mas para tanto foi necessário desenvolver um pequeno algoritmo capaz de zerar ou chegar o mais próximo possível do zero.

Para executar a rotina de balanceamento, o nó sensor precisa receber um comando, indicando o canal que se deseja ajustar.

Quando o nó sensor recebe o comando para balancear a ponte, este passa a controlar o potenciômetro digital de forma a aumentar ou diminuir a tensão em um dos braços do ponte, em seguida é realizada uma leitura com o conversor A/D e o valor obtido é comparado com o valor anterior ao ajuste do potenciômetro.

Caso esteja acima de 0 volts, há um decremento do potenciômetro digital e se estiver abaixo há um incremento. Deste modo, tentando achar um valor mais próximo de zero, ou, até que o número de iterações seja maior que 128 vezes, como mostra o fluxograma na Figura 5.2.

5.1.3 Rotina de leitura para realizar a conversão analógico digital

Após configurar os ganhos e a correção do *offset*, pode-se iniciar a leitura dos sinais provenientes dos sensores. O momento para realizar a conversão da amostragem deve ser determinado pelo operador do sistema, definindo o intervalo de tempo da conversão.

Como requisito do projeto, foi estabelecido uma taxa de amostragem fixa de 200 amostras por segundos, ou uma amostragem a cada 5 milissegundos.

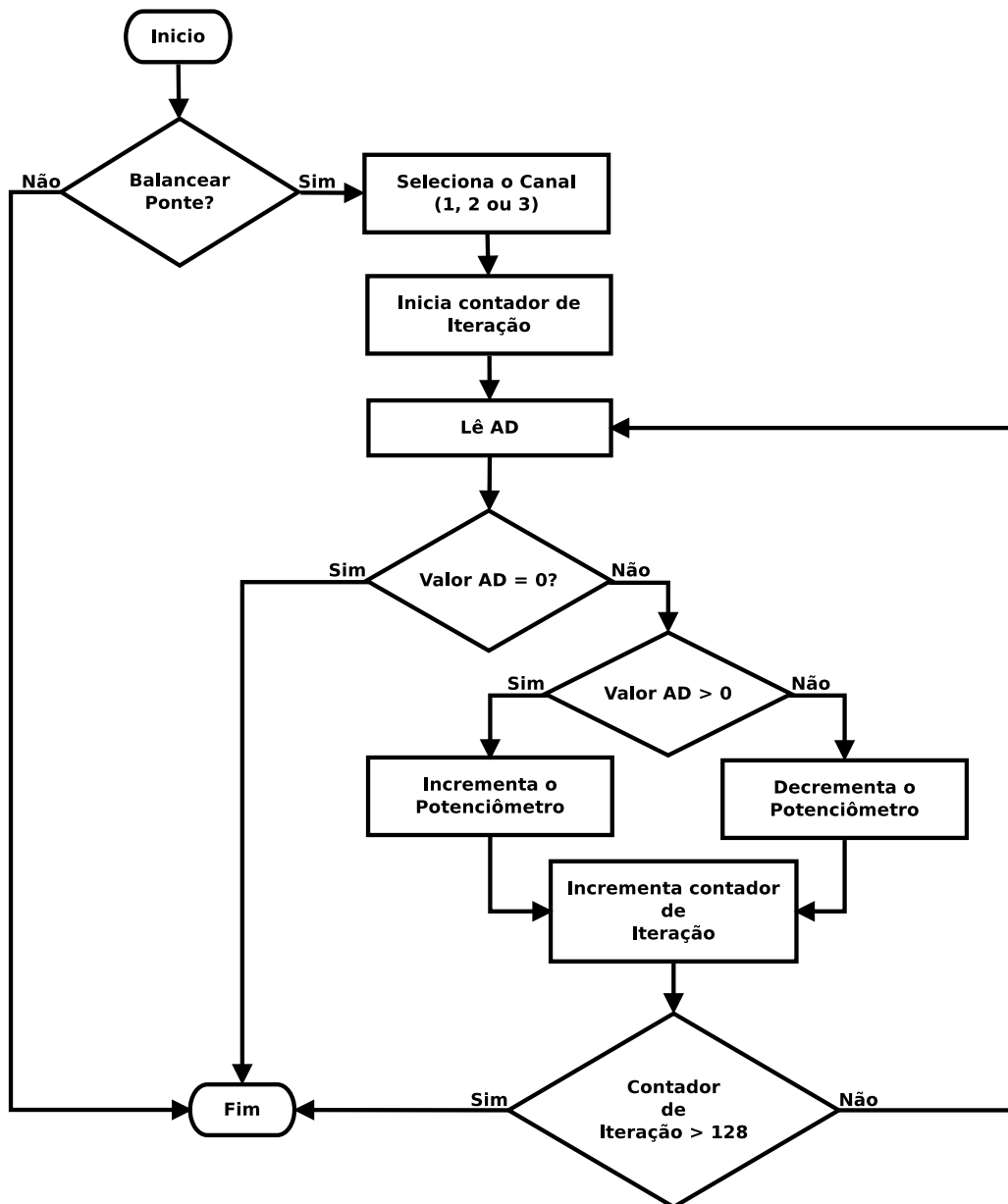


Figura 5.2: Fluxograma do algoritmo, usado para balanceamento da ponte de wheatstone.

Para que tal manobra fosse possível, foi utilizado o recurso do microcontrolador chamado de interrupção por *timer*, que consiste em um contador configurável capaz de gerar uma interrupção do processador do microcontrolador em tempos regulares, para realizar as leituras dos sensores, essa técnica garante uma precisão do momento em que se deve realizar a leitura do sensor.

As amostras são posteriormente enviadas para o computador ou armazenadas no cartão micro SD.

5.2 Software de gerenciamento de rede

O software de gerenciamento controla os nós sensores, sendo o operador responsável por definir o ganho, correção do offset, período em que deve ser lido os sensores e permite salvar os dados capturados nos sensores.

O seu funcionamento ocorre através de uma interface com o usuário em modo texto, os comandos são eleitos a partir de um pequeno menu que possibilita selecionar apenas uma configuração por vez, como mostra a Figura 5.3 as configurações são enviadas por vez, de modo sequencial, da mesma forma como no firmware do nó sensor, foi empregado o conceito das máquinas de estados finitos a Figura 5.4 mostra o comportamento do software de controle.

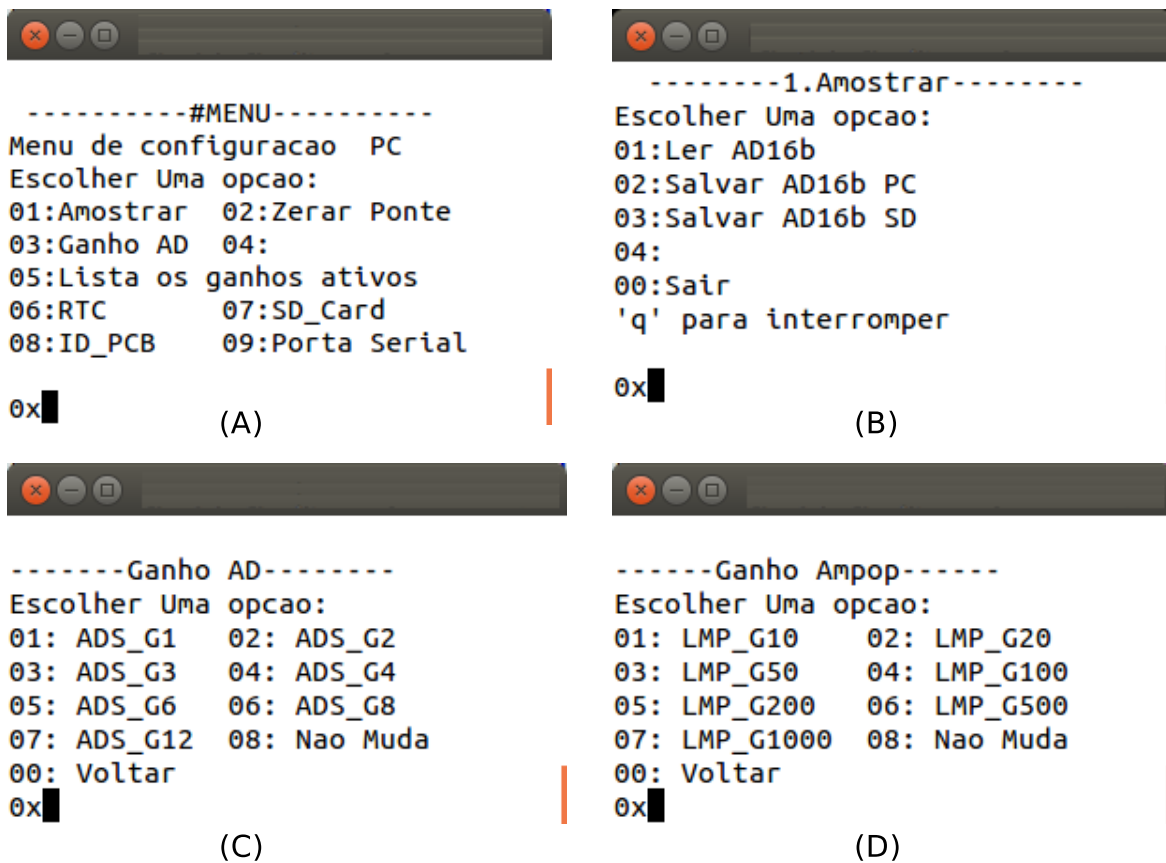


Figura 5.3: Software de controle. Em **A**: Tela inicial, exibindo as principais configurações. Em **B**: mostra os modos de armazenamento dos dados, no PC ou no cartão SD. Em **C** e **D**, são exibidos os possíveis ganhos, que podem ser aplicados pelo circuito condicionador.

Os estados que são representados pelos círculos, indicam a execução de uma determinada função como descrito a seguir:

- **INICIO_S** estado inicial do software gerenciador, fica aguardando um comando por parte do usuário;

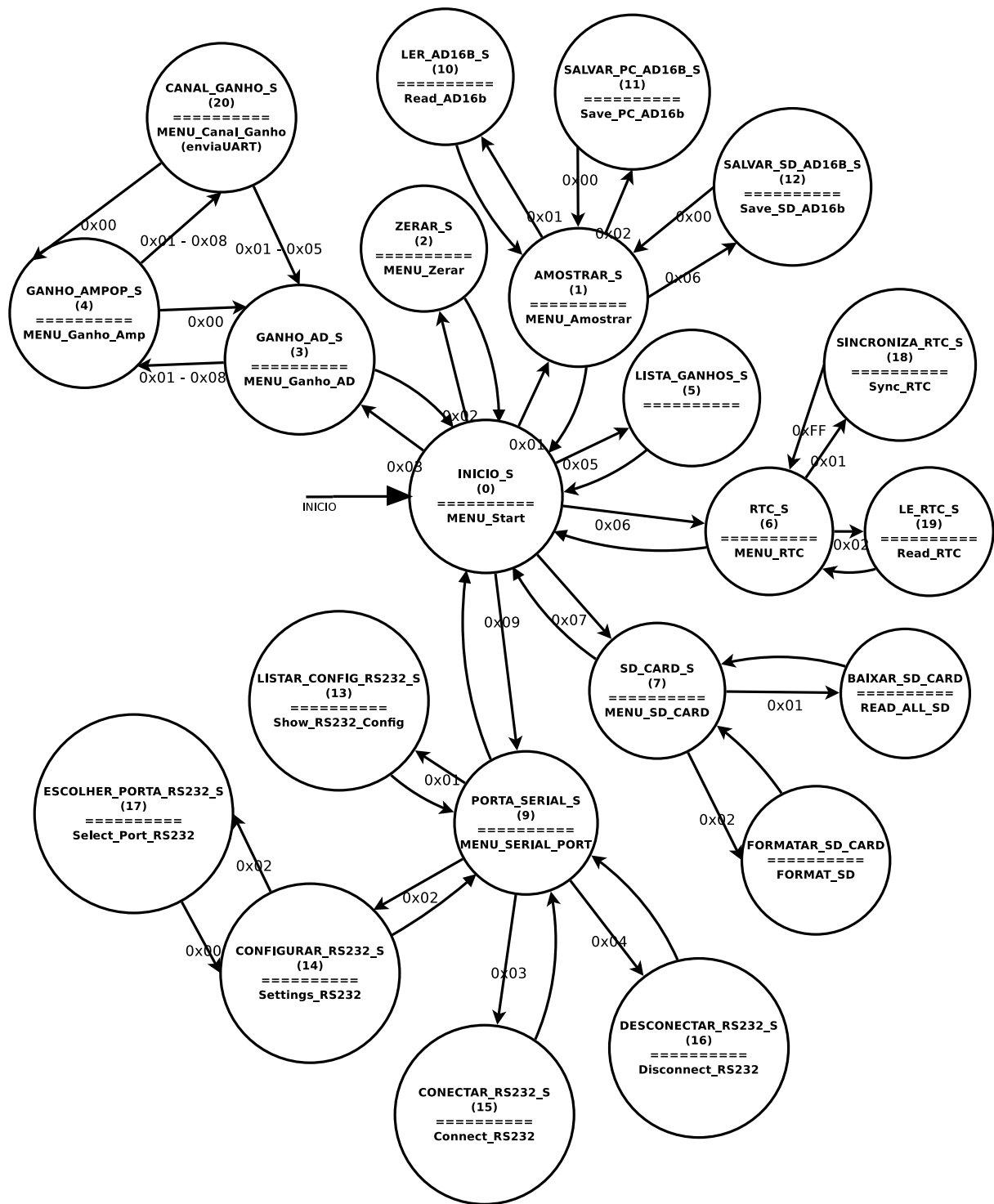


Figura 5.4: Máquina de estados finitos, representando o funcionamento do Software gerenciador

- GANHO_AD_S, GANHO_AMPOP_S são responsáveis, por definir os ganhos que o circuito condicionador deverá aplicar ao sinal proveniente do sensor e CANAL_GANHO_S é usado para escolher em qual canal serão aplicadas as modificações

do ganho;

- ZERAR_S envia o comando para o nó sensor realizar o balanceamento da ponte de wheatstone;
- AMOSTRAR_S exibe uma tela de seleção para definir o local onde os dados serão armazenados;
- LER_AD16B_S envia um comando para o nó sensor apenas amostrar o sinal do sensor, sem salvar as amostrar;
- SALVAR_PC_AD16B_S informa ao nó sensor que deve iniciar a mostragem e enviar os dados pela rede, os dados serão salvos no computador;
- SALVAR_SD_AD16B_S informa ao nó sensor que deve iniciar a mostragem e salvar os dados no cartão SD da própria placa;
- LISTA_GANHOS_S faz uma requisição ao nó sensor, pedindo para informar os ganhos dos amplificadores, que estão ativos;
- RTC_S mostra um menu, com opções para sincronização e checagem de data e hora;
- SINCRONIZA_RTC_S o computador envia para o nó sensor a data e hora atual;
- LE_RTC_S envia uma requisição ao nó sensor para que ele informe a data e a hora, do próprio nó sensor;
- SD_CARD_S mostra um menu, com as operações relacionadas ao cartão micro SD;
- BAIXAR_SD_CARD_S envia um comando para o nó sensor transferir todo o conteúdo armazenado no cartão micro SD.
- FORMATAR_SD_CARD_S envia um comando para o nó sensor apagar todo o conteúdo armazenado no cartão micro SD.
- PORTA_SERIAL_S exibe uma tela de seleção, para a configuração da comunicação serial do computador;
- LISTAR_CONFIG_RS232_S mostra as informações referentes a comunicação entre o computador e o nó mestre, tais como baudrate, paridade, o nome da porta serial e indidica se a comunicação ativa;
- CONECTAR_RS232_S o computador inicia a comunicação com o nó mestre e com a rede de sensores;

- DESCONECTAR_RS232_S o computador encerra a comunicação com o nó mestre e com a rede de sensores;
- CONFIGURAR_RS232_S exibe uma tela de seleção, para baudrate, paridade e opções de portas seriais;
- ESCOLHER_PORTA_RS232_S permite escolher a porta de comunicação entre o computador e o nó mestre.

Após a confirmação de uma determinada configuração é empregado o mesmo protocolo para transmissão dos dados de configuração para o nó sensor.

Para salvar os dados da leitura dos sensores, criou-se uma rotina específica, de forma que após enviar a requisição de leitura para o nó sensor, ao mesmo tempo no computador é criado um arquivo para armazenar os dados coletados pelo nó sensor. Então, enquanto estiver ativa a placa transmite os dados para o computador e este salva os dados no presente arquivo.

E para finalizar o usuário deve apenas enviar um sinal de parada de leitura para placa, e imediatamente é suspensa a transmissão dos dados, e em seguida o computador finaliza o arquivo contendo as amostras.

5.3 Interpretando os dados

A versão atual do software de controle da rede, não possui uma interface gráfica capaz de produzir gráficos dos dados. Deste modo, fez-se a utilização do Matlab.

Então, desenvolveu-se um script Matlab capaz de ler os dados salvos e plotar os gráficos, ajustando-se as unidades de tempo e deformação. Para tanto, o script necessita de algumas informações tais como, a taxa de amostragem, ganho dos circuitos de condicionamento, fator de deformação, número de bits, referencia de tensão do conversor A/D.

A Equação 5.1, converte os valores digitais D em valores analógicos, mostrando a tensão da ponte de wheatstone, V_o . A Equação 5.2 converte a tensão da ponte de wheatstone, V_o em deformação, ε .

$$V_o = \frac{V_{REF} \times D \times (2^{15} - 1)}{G_{AD} \times G_{AmpOp}} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = -\frac{4 \times 10^6 \times V_o}{(V_e - 2V_o)K} \quad (5.2)$$

Onde:

- V_o tensão de saída da ponte de wheatstone;
- V_{REF} tensão de referência do conversor A/D;
- D código digital que representa o sinal analógico convertido para digital;
- G_{AD} ganho do amplificador integrado no conversor A/D;
- G_{AmpOp} ganho do amplificador de instrumentação;
- ε representa a deformação em micro strain;
- V_e tensão de alimentação da ponte de wheatstone, nesse caso é igual a V_{REF} ;
- K fator de deformação.

Capítulo 6

Testes e resultados

O presente capítulo detalhará os testes realizados no projeto, assim como os resultados adquiridos no entorno do seu desenvolvimento.

Uma ressalva para os três últimos testes, estes foram realizados em condições diferentes, pois usou-se outro transdutor de força, isso provocou variações nas leituras em comparação com os valores de deformação dos primeiros testes.

6.1 Testes de aferição do nó sensor

O presente teste teve como objetivo realizar uma comparação de valores de deformações, aferido pelo nó sensor, desenvolvido pelo projeto do LASSE, e pelo sistema para aquisição de dados ADS2000 do Laboratório Didático de Engenharia Civil (LABDID) .

Primeiramente foi utilizado um transdutor de força semelhante ao mostrado na Figura 6.1, que consiste em uma barra sujeita à flexão, contendo dois sensores sendo um para tração e outro compressão. Dessa forma, os extensômetros mediram a mesma deformação, mas com sinais opostos. Então fixou-o em um suporte e foram aplicados diversos pesos-padrão, como mostra a Figura 6.2. O sensor superior foi conectado no ADS2000 e o inferior foi conectado no nó sensor.

Posteriormente, o nó sensor e o ADS2000 foram calibrados para a criação de uma valor de referência. Sendo calibrados a cada vez que se realizava a modificação do valor do ganho, foram feitos testes com pesos diferentes, que variavam em 0, 1 e 2 Kg (Figura 6.3).

A cada teste selecionava-se o valor do ganho, que constituíram nos valores de 10, 100 e 500 v/v, fazendo a calibração para cada ganho selecionado. A correção de offset, consistiu

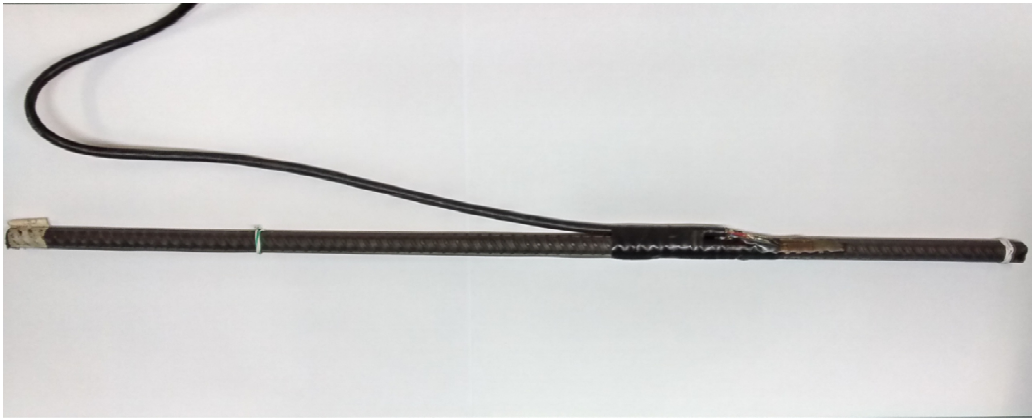


Figura 6.1: Transdutor de força, criado para realizar testes em laboratório.

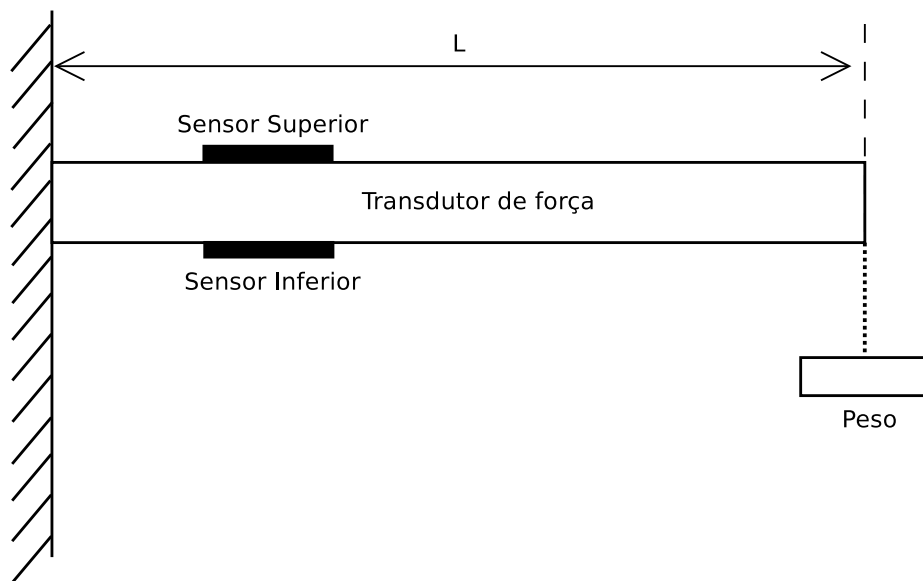


Figura 6.2: Esquema mostrando o uso do transdutor de força.

em deixar o transdutor em estado de repouso, assim solicitando a calibração da ponte de wheatstone.

Então, para todos os testes fixos definiu-se um intervalo de tempo de 30 segundos, assemelhando-se para o teste dinâmico que foi realizado em 90 segundos com acréscimo contínuo de peso. Deste modo, os equipamentos coletavam todos os dados do transdutor de modo simultâneo, tanto no ADS2000 e como no nó sensor (Figura 6.4).

Os dados salvos em valores digitais foram tratados e plotados no Matlab, notando-se uma diferença dos valores gerados pelo ADS2000 e pelo nó sensor desenvolvido.



Figura 6.3: Balança mostrando que o valor da massa é exatamente 1Kg, de um dos pesos-padrão.

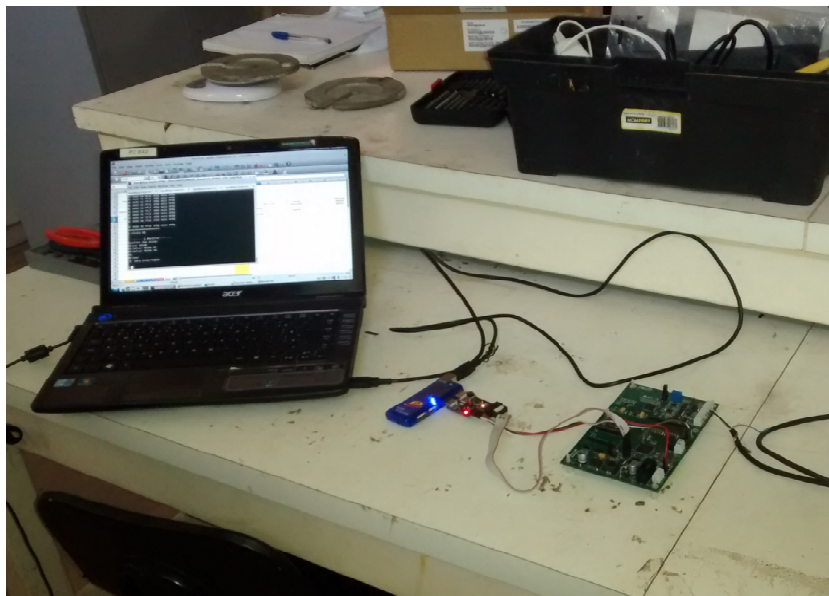


Figura 6.4: Nó sensor realizando a aquisição da deformação.

6.2 Testes de repetitividade do nó sensor

Dando continuidade a série de testes realizados no nó sensor, procurou-se utilizar mais corpos de prova. Os novos corpos de prova consistiram em garrafas Polyethylene terephthalate (PET) contendo água, de forma que sua massa fosse de 2Kg, como mostra a Figura 6.5.

Da mesma forma como no teste de comparação com o ADS2000, foi utilizado um



Figura 6.5: Balança mostrando o valor da massa de exatamente 2Kg, de um dos pesos-padrão.

transdutor de força (Figura 6.1) seguindo o mesmo esquema de montagem da Figura 6.2, mas apenas o sensor superior foi utilizado.

Foram utilizados duas placas, sendo um nó sensor e um nó mestre, um extensômetro e um notebook para armazenar os dados coletados. O nó sensor estava conectado ao nó mestre através de um barramento CAN para o envio das amostras, mas foi utilizado a interface USART para criar uma comunicação entre o nó mestre e o computador, para assim salvar as amostras, a interface USART no nó sensor serviu para acompanhar a configuração do mesmo Figura 6.6.

Depois de montado os nó sensores e conectado ao computador, através da interface de configuração foi selecionado o ganho de $500V/V$ para circuito condicionador de sinal e em seguida foi realizado o balanceamento da ponte de wheatstone. Foram feitos dois testes, o primeiro consistiu em adicionar as garrafas ao transdutor de força, a cada 30 segundos era pendurada uma massa de 2Kg até um limite de 8Kg, totalizando 4 garrafas. O segundo foi o processo inverso, as garrafas eram removidas a cada 30 segundos, sendo que as amostras foram armazenadas no computador.

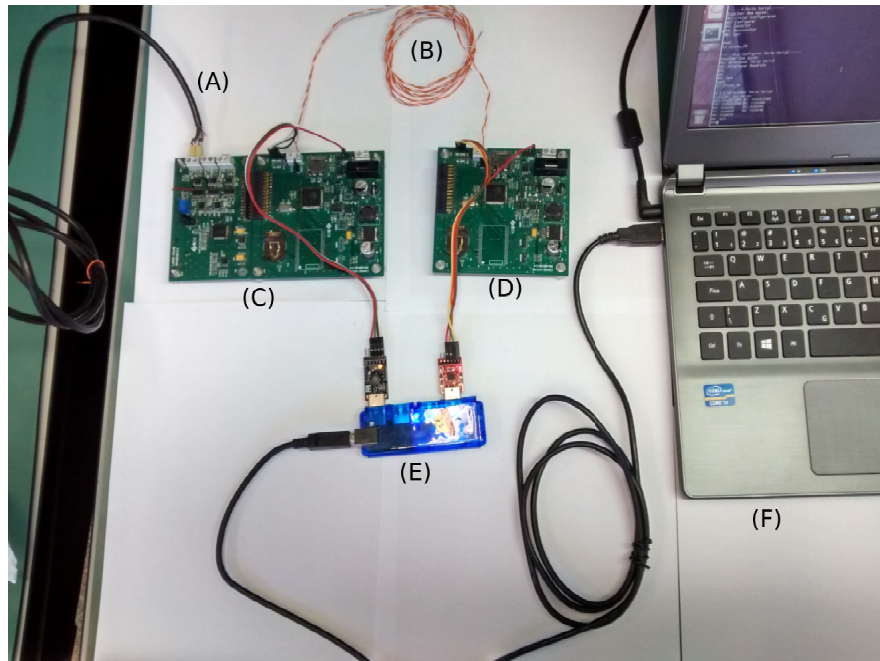


Figura 6.6: Nó sensores interligados pelo barramento CAN. Em **A**: cabo para ligação do extensômetro, em **B**: cabo do barramento CAN, em **C**: placa do nó sensor, em **D**: placa do nó mestre, em **E**: conversor USB-Serial e **F**: computador.

6.3 Testes de oscilação da massa

Um outro tipo teste foi realizado com o intuito de apenas verificar a deformação provocada pela oscilação da massa, o sistema teve o comportamento semelhante a de um pêndulo. Nesse teste a massa era empurrada para um dos lados (Figura 6.7) e em seguida era solta, para assim balançar por um momento.

6.4 Resultados

Os gráficos gerados no Matlab demonstram a deformação para um ganho específico considerando uma determinada massa em um intervalo de tempo. Vale ressaltar, que os gráficos apresentaram sinais contrários devido a natureza dos sensores, sendo que um mede tração e o outro compressão.

Os sinais lidos pelo nó sensor, foram plotados como exibidos na Figura 6.8, Figura 6.9 e Figura 6.10. Como pode-se notar estes sinais demonstraram maior estabilidade ao ruído, quando comparado com os gráficos dos sinais capturados pelo ADS2000, mostrados na Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13.



Figura 6.7: Teste de oscilação da massa, para provocar uma deformação variável.

Sugere-se que a estabilidade observada pode esta atribuída aos diversos filtros empregados no projeto do nó sensor, de forma a garantir a qualidade na alimentação dos circuitos analógicos, que inclui o extensômetro e o circuito condicionador de sinal.

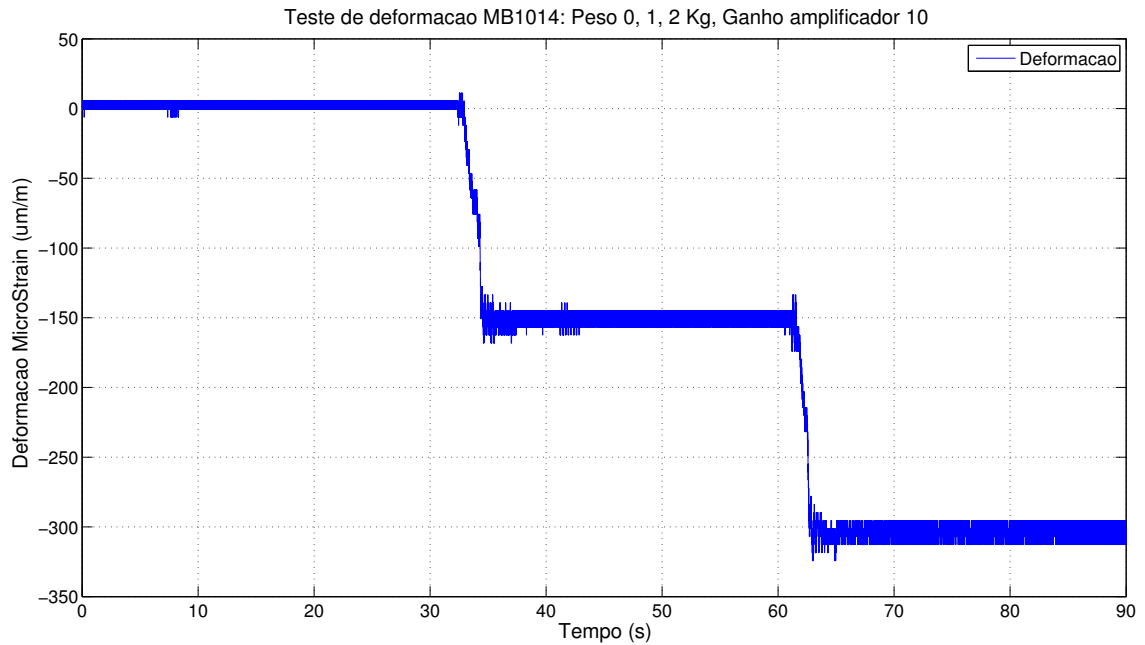


Figura 6.8: O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 10 V/V.

As tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 demonstram o desvio padrão e a média da deformação lida pelo ADS2000 e pelo nó sensor. Sendo que cada tabela foi obtida a partir de diferentes testes, já que foram aplicados ganhos diferentes. Então, verifica-se que o desvio padrão do nó sensor é menor que o do ADS2000, assim o ruído captado pelo projeto desenvolvido foi menor, provocando pouca interferência na leitura do sinal.

Tabela 6.1: Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 10V/V, comparativo de média e desvio padrão

Peso (Kg)	ADS2000		Nó Sensor	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	-4.49	± 28.99	0.00	± 4.13
1	107.27	± 29.00	-153.33	± 3.00
2	226.27	± 30.62	-304.64	± 2.99

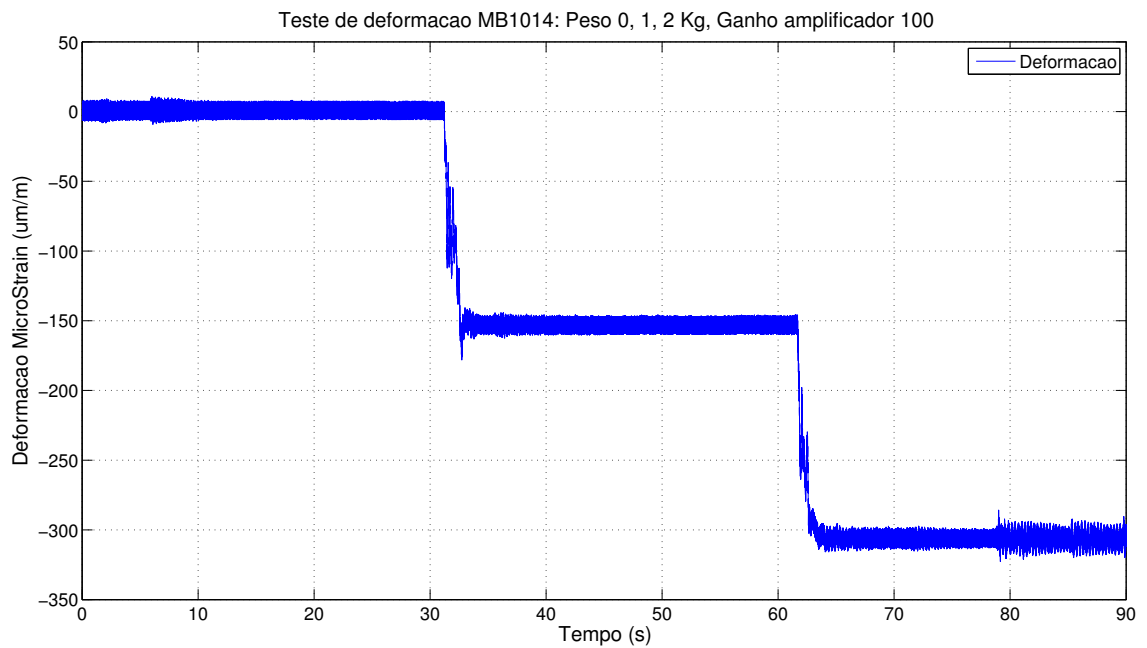


Figura 6.9: O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 100 V/V.

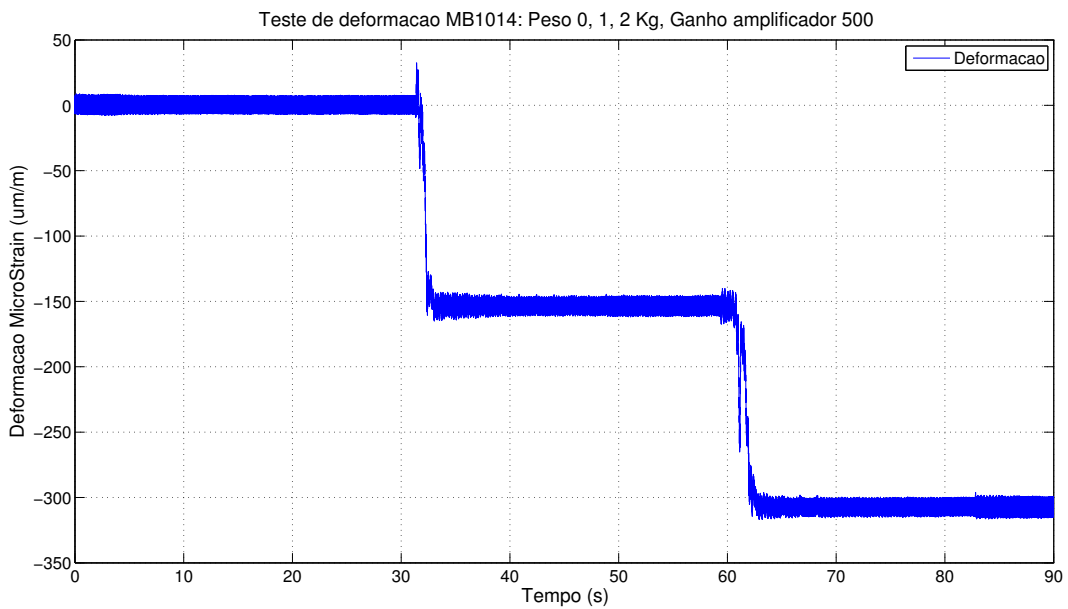


Figura 6.10: O gráfico do nodo sensor, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.

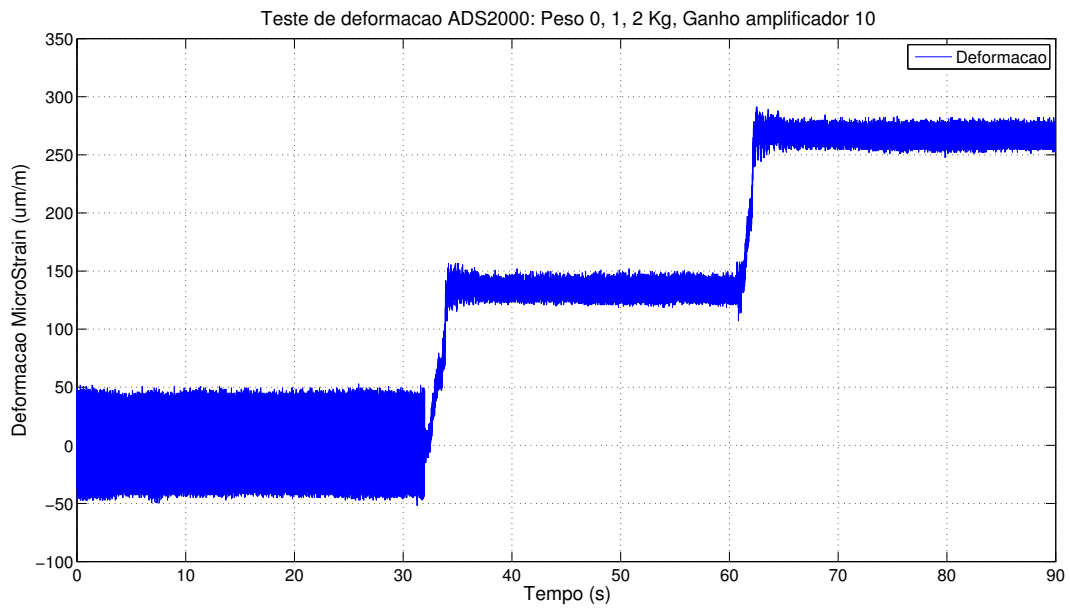


Figura 6.11: O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 10 V/V.

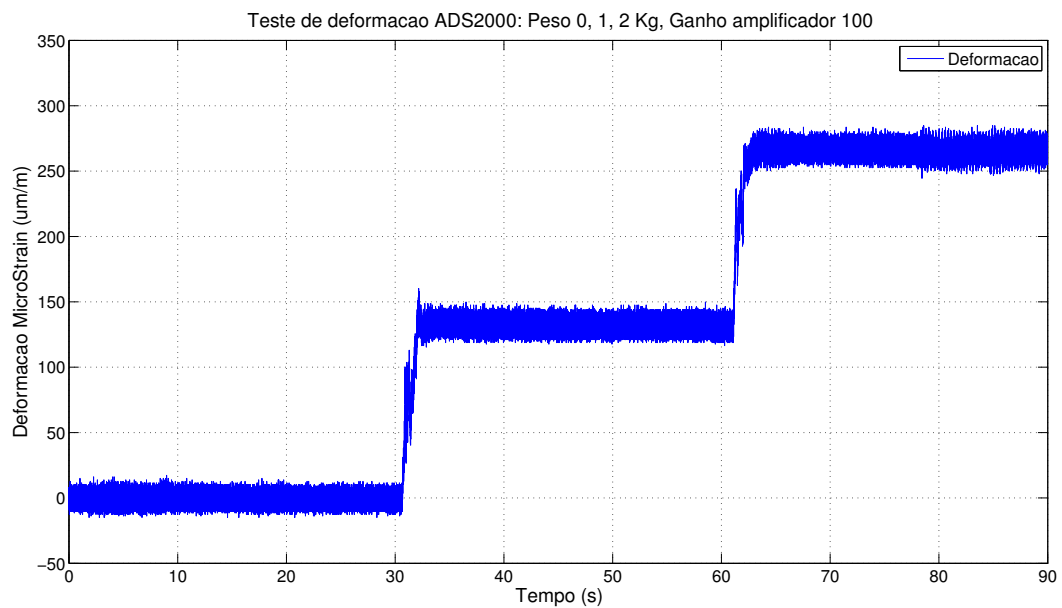


Figura 6.12: O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 100 V/V.

Foram feitos mais dois testes, o primeiro consistiu na adição e remoção de massa a cada

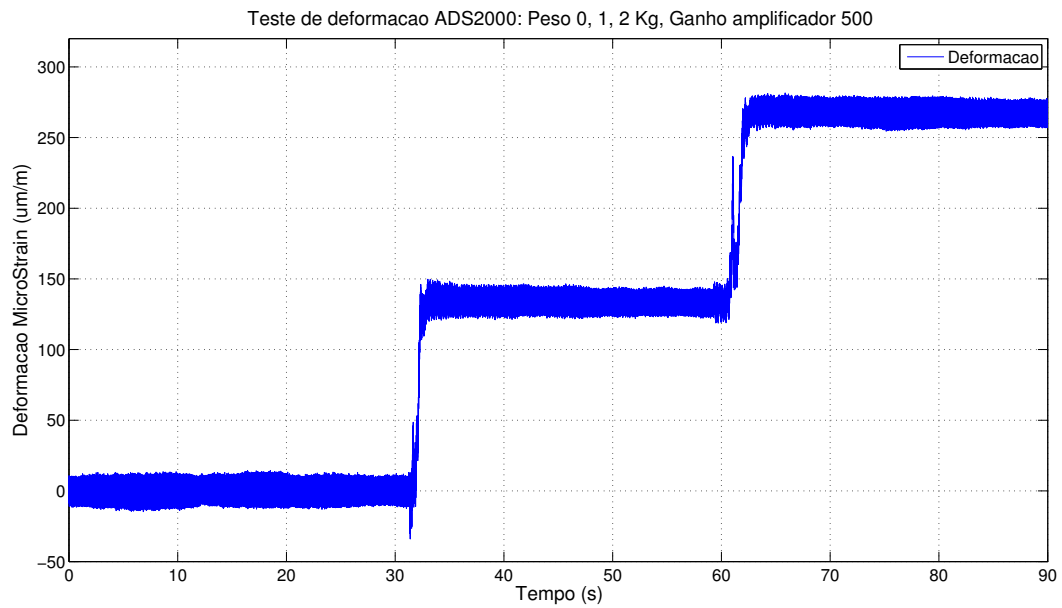


Figura 6.13: O gráfico do ADS2000, teste dinâmico com variações 0, 1 e 2Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.

Tabela 6.2: Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 100V/V, comparativo de média e desvio padrão

Peso (Kg)	ADS2000		Nó Sensor	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	-4.60	± 33.62	0.00	± 3.69
1	124.50	± 35.25	-153.37	± 3.75
2	255.59	± 8.19	-307.43	± 5.13

Tabela 6.3: Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 500V/V, comparativo de média e desvio padrão

Peso (Kg)	ADS2000		Nó Sensor	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	-2.25	± 32.35	0.00	± 3.44
1	129.17	± 32.52	-153.68	± 3.31
2	260.04	± 7.94	-307.63	± 5.14

30 segundos, as Figuras 6.14 e 6.15 mostram a deformação provocada, a Tabela 6.4 resume os valores médios da deformação. O segundo foi observar o comportamento da deformação influenciada pelo balanço da massa.

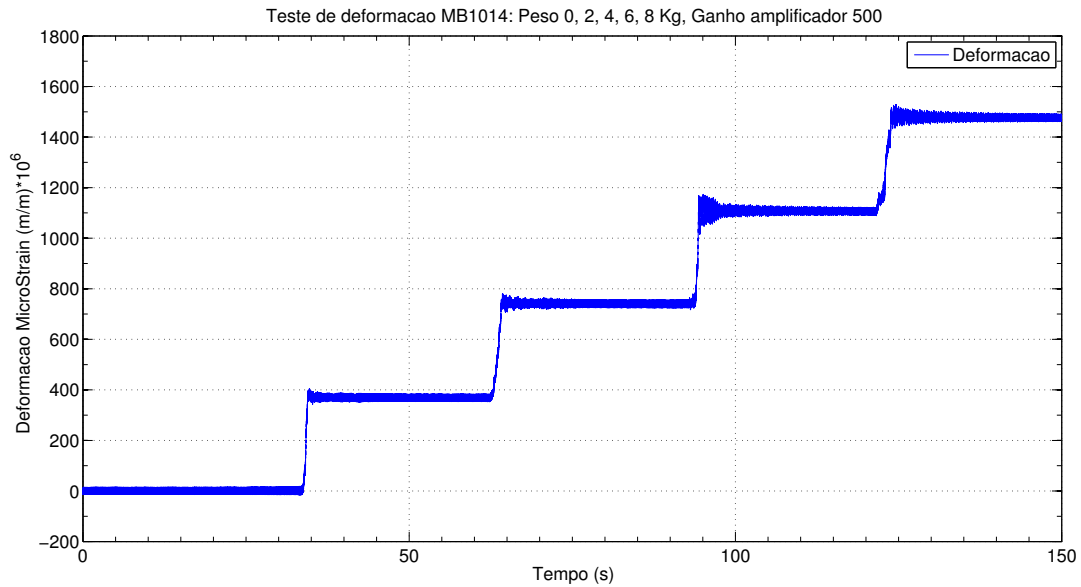


Figura 6.14: O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com variações 0, 2, 4, 6 e 8Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.

Tabela 6.4: Resumo dos testes de deformação, aplicando um ganho de 500V/V

Peso (Kg)	Adição de massa	Remoção de massa
0	1.0	-5.4
2	369.1	364.7
4	740.4	732.8
6	1107.0	1100.5
8	1477.0	1472.0

Fazendo uma análise pelo gráfico exibido na Figura 6.16, pode-se estimar que a frequência com que a massa oscilou foi de aproximadamente de 0.88Hz.

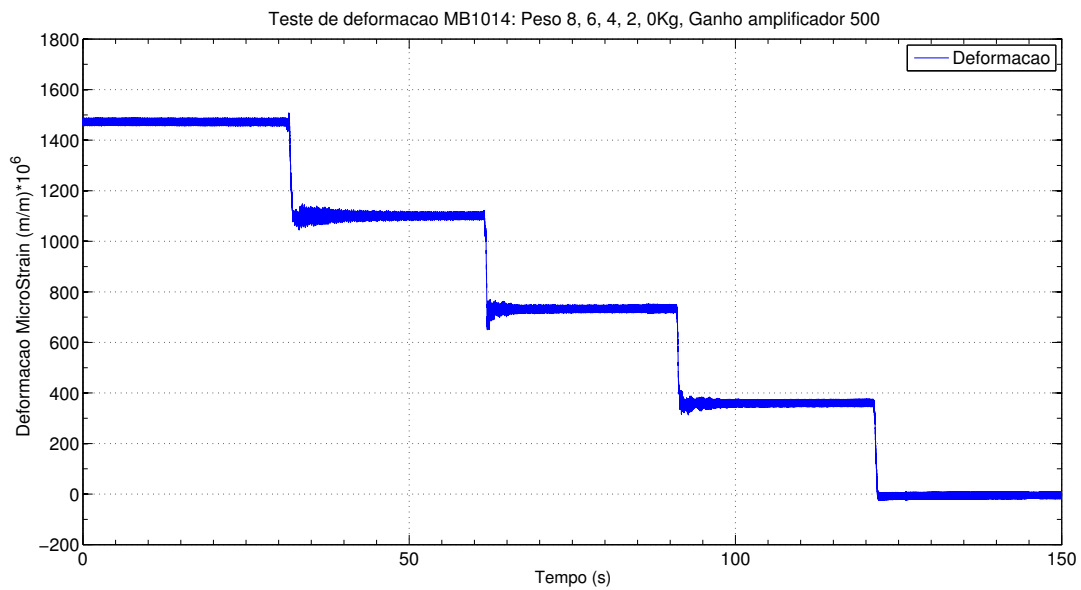


Figura 6.15: O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com variações 8, 6, 4, 2 e 0Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.

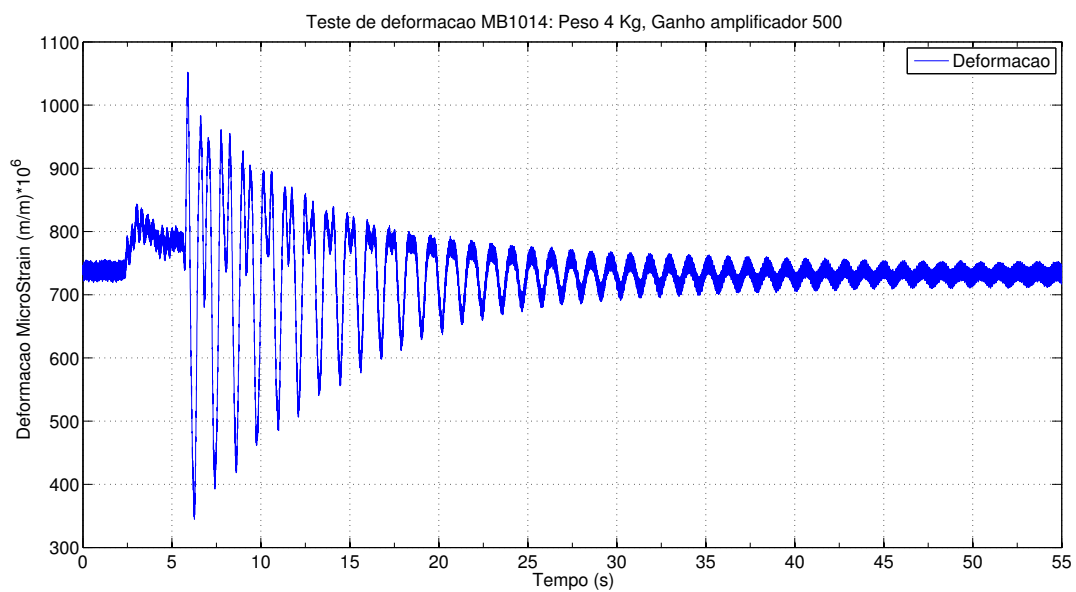


Figura 6.16: O gráfico do nó sensor, teste dinâmico com a massa balançando com comportamento semelhante a um pêndulo, com uma massa e 4Kg, aplicando um ganho de 500 V/V.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1 Conclusão

No presente trabalho foi proposto o desenvolvimento do projeto do nodo sensor, a parte do software para o gerenciamento do controle do circuito condicionador quanto na transmissão dos dados. Definiu-se um protocolo de comunicação da placa e do computador para auxiliar na transmissão dos dados do nó sensor para o computador, e o software do computador capaz de controlar as funções básicas que foram a captura, controle de ganho, sistema de correção automática do *offset* e o armazenamento dos dados no computador.

Pode se observar que o nó sensor desenvolvido conseguiu atingir os objetivos que foram de realizar a leitura do extensômetro, digitalizar os dados e envia-los ao computador. A sua sensibilidade foi corrigida e aplicado diferentes ganhos, permitindo diferentes faixas de deformação, sendo que os protótipos anteriores desenvolvidos por Ataide [16] apresentavam valores fixos, e assim limitando a aplicação da placa.

Além do que, a sua forma de construção em módulos, placa base e placa condicionadora de sinal, facilita o projeto de circuitos condicionadores para diferentes tipos de sensores, possibilitando a leitura de diversas grandezas físicas como por exemplo temperatura, velocidade do vento e umidade.

Verifica-se um sistema distribuido, o qual diminui a quantidade de cabos empregados para a realização desse tipo de leitura, facilitando a instalação para a realização de monitoramento de estruturas. Além do que, a redução da quantidade de cabos acarreta

na diminuição dos ruídos sofridos pelos sinais analógicos, já que os dados são transmitidos de forma digital para o computador.

7.2 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de continuar este trabalho, alguns assuntos podem ser incluídos:

- Desenvolver um software com uma interface homem-máquina, capaz de gerar gráficos e relatórios;
- Incluir no software, algoritmos capazes de prever possíveis defeitos nas estruturas;
- Projetar circuitos condicionadores para outros sensores;
- Estudar o limite de nó sensores inseridos em uma mesma rede.

Referências Bibliográficas

- [1] CNT. Confederação Nacional do Transporte, “Boletim Estatístico - CNT,” Brasília, Jan. 2016, Disponível em <http://www.cnt.org.br/>. Acesso em 24 de Maio 2016.
- [2] Mattos, T.S., *Programa para análise de superestruturas de pontes de concreto armado e protendido*, p.156. Tese (Doutorado), Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro , 2001.
- [3] Floyd, T., *Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações*, Bookman, 2009.
- [4] National Instruments Corporation, *Strain Gauge Measurement - A Tutorial*, Application note 078. National Instruments, 1998.
- [5] Jung, W.G., *Op Amp Applications*, Analog Devices Technical Reference Bks. Analog Devices. ISBN 9780916550264, 2002.
- [6] Sedra, A.S.; Smith, K. C. , *Microelectronic Circuits*, The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. Oxford University Press, USA, 6 edition, 2009.
- [7] Arms, S.W.; Townsend, C.P., “Wireless Strain Measurement Systems–Applications & Solutions,” in *NSF-ESF Joint Conference on Structural Health Monitoring, Strasbourg, France*, 2003, pp. 3–5.
- [8] Brownjohn, J. et al., “A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure,” 2004, vol. 28, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, United Kingdom.
- [9] Arms, S.W., et al., “Remotely Reprogrammable Sensors for Structural Health Monitoring,” in *ICCES International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences, Medeira, Portugal*, 2004.
- [10] Andrade, W.P., *Abrasão do concreto de superfícies hidráulicas*, In: Congresso Brasileiro do Concreto. REIBRAC. Curitiba - PR. Anais. São Paulo: IBRACON.32., 1992.

-
- [11] Silva, M.R; Pinheiro, S.M.M, *Biodeterioração do Concreto*, .v.cap.28.p.857-878., In: ISAIA. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.
- [12] França, A. L. V. F., *Métodos Executivos de Obras de Arte Especiais: Estudo de Caso em Construção em Meio Urbano*, 99 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil). UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2011.
- [13] BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, *Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais*, 225p. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica, Rio de Janeiro, 1996.
- [14] Ferreira, R.M., *Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Betão*, 200. 246 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Braga, 2000.
- [15] Sohn, H. et al, “A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001,” Jan 2002, Los Alamos National Laboratory, Third World Conference on Structural Control, Como, Italy.
- [16] Ataíde, R. W. R., *Projeto e Implementação de um Nodo Sensor para Aquisição de Sinais de Extensômetros em Redes de Sensores Sem Fio Aplicado ao Monitoramento de Deformações em Estruturas*, 69 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2012.
- [17] Atmel, “ATmega128RFA1 datasheet,” 2012, Disponível em <http://www.atmel.com/Images/doc8266.pdf>. Acesso em 10 Abril 2014.
- [18] Nikbin, K.; Abdi, F., *Development of an in-situ wireless strain monitoring system and its integration with FEA SHM simulation models*, Proc. SPIE 8368, Photonic Applications for Aerospace, Transportation, and Harsh Environment III, 2012.
- [19] Ripper, T.; Souza, V. C. M., *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*, 256 p., Editora Pini, São Paulo, 1998.
- [20] Karl F. Anderson, “Your Successor to the Wheatstone Bridge? NASA’S Anderson’s Loop,” *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, March 1998.
- [21] Soriano, J.; Mascia. N. T., “Estruturas Mistas em Madeira-concreto: Uma Técnica Racional para Pontes de Estradas Vicinais,” Jul 2009, vol. 39, pp. 1248–1257, Ciência Rural, Santa Maria.

-
- [22] Cansado, J. C. A., *Instrumentalização de Redes de Sensores Sem Fio*, 181p., Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [23] Isaia, G.C., *O Concreto: da Era Clássica à Contemporânea*, in *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, IBRACON, São Paulo, 2005.
- [24] Lapa, J.S., *Patologia, Recuperação e Reparo das estruturas de concreto*, p.9-23. Curso de especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de engenharia. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção., 2008.
- [25] Galvão, O. J. A, *Desenvolvimento dos transportes e integração regional no Brasil: uma perspectiva histórica.*, Planejamento e Políticas Públicas, 1996.
- [26] Santos, S.S., *Patologias das construções*, v.1.n.7.p.1-14. Revista Especialize On-line IPOG. Goiânia, 2014.
- [27] Vitorio, A, *Fundamentos da Patologia das Estruturas nas Perícias de engenharia*, p.12-53. Instituto Pernambucano de Avaliações e Perícias de Engenharia. Recife., 2003.
- [28] Baroni, H. J. M., *Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados*, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2010.
- [29] Meneghetti, L. C., *Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida*, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2007.
- [30] Vasconcelos, A. C.; Carrieri Júnior, R, Ed., *A Escola Brasileira do Concreto Armado*, 207p. 1 ed. Axis Mundi. São Paulo, 2005.
- [31] Silva, T., *Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro*, 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola técnica superior d enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.
- [32] Costa, C. N. et al, *O fenômeno do lascamento (spalling) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica*, In: Congresso Brasileiro do Concreto REIBRAC, 44, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002.

-
- [33] Hasparyk, N. P. et al, *Deformações por Retração e Fluência*, In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON v. 1 cap. 22, p. 655- 685. ISBN 85- 98576 - 04- 2, 2005.
- [34] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J.M., *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, Tradução de Paulo Helene et al. 1. ed. São Paulo, PINI, 580p. ISBN 85- 7266- 040- 2, 1994.
- [35] BRASIL. DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPOTES., *Manual de inspeção de pontes rodoviárias*, Ed. 2°. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. p. 97-224, 2004.
- [36] Milani, C.J.; Kripka, M., *A Identificação de Patologias em Pontes de Madeira: Diagnóstico Realizado no Sistema Viário do Município de Pato Branco-Paraná*, REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil 4.n.1p.23-33, 2012.
- [37] BRASIL. DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPOTES., *Projeto executivo, para recuperação, reforço e reabilitação (alargamento) de 11 pontes na rodovia BR-222/PA*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Superintendência Regional do Estado do Pará/Amapá, 2007.
- [38] Andrade, R. G. M., *Monitoramento de Curta Duração em uma Ponte Curva em CConcreto Armado*, 144 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas Geotécnica, São Paulo, 2012.
- [39] Wenzel, H., *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2009.
- [40] Der-Cherng, L., “A Network Topology Design for Structural Health Monitoring,” *Control Conference (ASCC), 2011 8th Asian*, pp. 665–670, 2011.
- [41] Lynx Tecnologia, “Lynx Produtos,” Disponível em http://www.lynxtec.com.br/prod_ads2000.htm. Acesso em 2 de Jun 2015.
- [42] Tocci, R. J., *Sistemas digitais, princípios e aplicações*, Prentice Hall, São Paulo, Brasil, 8 edition, 2003.
- [43] Weber, A.L, *Metrologia e Intrumentação*, Departamento de Engenharia Mecânica. UCS. p.1-16., 2008.

-
- [44] Andolfato, R. P.; Camacho, J. S.; Brito, G. A., *Extensometria Básica*, p.1-46. Universidade Estadual Paulista. Núcleo de Ensino e pesquisa da alvenaria estrutural. Ilha Solteira., 2004, Disponível em <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em 12 Fev. 2015.
- [45] Almeida, P.F.O., *Introdução à extensometria elétrica de resistência - notas de aula.*, p.1-22. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais., 1996.
- [46] Camargo, V. L. A., *Desenvolvimento e Implementação de uma Plataforma para Monitoramento Estrutural Utilizando Sensores Extensométricos Conectados em Rede*, Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.
- [47] Hewlett-Packard Company, *Practical Strain Gage Measurements*, Application note 290 - 1. Hewlett Packard, 1981.
- [48] Atmel, *AT90CAN128 datasheet*, 2008, Disponível em <http://www.atmel.com/images/doc7679.pdf>. Acesso em 20 Fev. 2015.
- [49] Maxim Integrated, *DS3231 datasheet*, 2015, Disponível em <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>. Acesso em 25 Fev. 2015.
- [50] Texas Instruments , *LMP8358 datasheet*, 2014, Disponível em <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp8358.pdf>. Acesso em 10 Out. 2014.
- [51] Texas Instruments , *ADS1194 datasheet*, 2010, Disponível em <http://www.ti.com/lit/ds/sbas471c/sbas471c.pdf>. Acesso em 15 Out. 2014.