



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



BRUNO FERREIRA DE JESUS JUNIOR

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE EXTENSOMETRIA
APLICADO A UM TAMBOR DESCASCADOR DE TORAS DE
MADEIRA**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2019

BRUNO FERREIRA DE JESUS JUNIOR

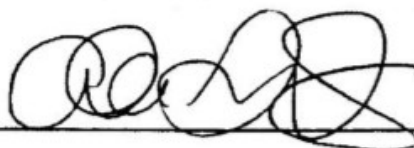
**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE EXTENSOMETRIA
APLICADO A UM TAMBOR DESCASCADOR DE TORAS DE
MADEIRA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Dezembro/2019

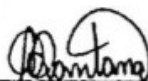
Monografia intitulada SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE EXTENSOMETRIA APLICADO A UM TAMBOR DESCASCADOR DE TORAS DE MADEIRA defendida e aprovada em 20 de dezembro de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Orientador



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado



Profa. Me. Adrielle de Carvalho Santana – Professora Convidado

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que me deram a oportunidade de conhecer o mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, aos meus pais por todo esforço, amor e carinho para eu conseguir chegar até aqui, a minha namorada Flávia, que vem sendo uma grande companheira, aos meus tios e avós, aos amigos de Ouro Preto, Ouro Branco e Cachoeira do Campo, aos amigos de UFOP e UFSJ e ao ISQ Brasil.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de extensometria aplicado a um tambor descascador de toras de madeira, visando a análise de integridade estrutural do equipamento. O tambor descascador opera com movimento de rotação para descascar toras de madeira, que são lançadas dentro da estrutura onde ocorre o contato com a parede com fendas. O experimento consiste em instalar extensômetros em áreas críticas da estrutura do tambor e realizar a aquisição de dados por meio de um sistema baseado no microcontrolador ESP32, visando o estudo da integridade estrutural do equipamento. A transmissão dos dados é realizada por meio de comunicação sem fio, o que facilita a instalação dos extensômetros na estrutura do tambor. Com base nos resultados apresentados, pode-se avaliar os impactos sofridos pelo equipamento durante o seu ciclo de funcionamento.

Palavras-chaves: Extensometria. Aquisição de Dados. Sistema Embarcado. Arduino IDE. Wi-Fi. Strain Gage.

ABSTRACT

This work presents the development of an extensometer data acquisition system applied to a wood debarking drum, aiming at the structural integrity analysis of the equipment. The debarking drum operates in a rotating motion to debar wood logs, which are thrown into the structure where contact with the cracked wall occurs. The experiment consists of installing strain gauges in critical areas of the drum structure and performing data acquisition through a system based on the ESP32 microcontroller, aiming to study the structural integrity of the equipment. Data transmission is performed via wireless communication, which facilitates the installation of strain gauges in the drum structure. Based on the results presented, it is possible to evaluate the impacts suffered by the equipment during its operating cycle.

Key-words: Extensometer. Data Acquisition. Embedded System. Arduino IDE. Wi-Fi. Strain Gage.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico $\sigma \times \epsilon$	12
Figura 2– Extensômetro de Huggenberger. Fonte: DOEBELIN, 1995.....	14
Figura 3 - Extensômetro Marten.....	15
Figura 4 – Deformação em um fio tracionado.....	16
Figura 5 – Diagrama esquemático de um extensômetro de fita metálica, colado sobre um corpo de prova.	17
Figura 6 – Extensômetro Uniaxial.....	17
Figura 7 – Extensômetro Biaxial.....	17
Figura 8 – Extensômetro Triaxial.....	18
Figura 9 – Circuito elétrico da ponte de Wheastone.	18
Figura 10 – Diagrama esquemático do sistema em um quarto ponte.....	19
Figura 11 – Diagrama esquemático do sistema em meia ponte.	20
Figura 12 – Diagrama esquemático do sistema em ponte completa.	20
Figura 13 – Layout do sistema de comunicação sem fio.....	21
Figura 14 – Modelo 3D do equipamento.....	23
Figura 15 – Placa ESP32 Thing Sparkfun.....	24
Figura 16 – Placa HX711.	25
Figura 17 – Diagrama de blocos da aplicação de uma célula de carga com HX711.....	26
Figura 18 – Esboço dos pontos de calibração da haste.....	26
Figura 19 – Diagrama esquemático do sistema de aquisição de dados representando um ponto de aquisição.	29
Figura 20 – Placa do sistema de aquisição de dados.	29
Figura 21 – Pontos de instalação dos extensômetros e caixa do equipamento de aquisição....	30
Figura 22 – Pontos de fixação dos extensômetros no tambor descascador de toras.	30
Figura 23 – Pontos de fixação dos extensômetros no tambor descascador de toras.	31
Figura 24 – Ponto de fixação do sistema de aquisição de dados no tambor descascador de toras.	31
Figura 25 – Gráfico da curva de calibração.....	32
Figura 26 – Medições de tensão no ponto 1.	33
Figura 27 – Medições de tensão no ponto 2.	33
Figura 28 – Medições de tensão no ponto 3.	33
Figura 29 – Medições de tensão no ponto 4.	34
Figura 30 – Fluxograma do estudo numérico-experimental para determinação das cargas atuantes.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de dados de Calibração.	32
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa do Trabalho	9
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	10
1.3	Estrutura do Trabalho	10
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1	Lei de Hooke	12
2.2	Extensômetros	13
2.2.1	Tipos de Extensômetros	13
2.2.1.1	Extensômetros Mecânicos.....	13
2.2.1.2	Extensômetros Ópticos.....	14
2.2.1.3	Extensômetro Elétrico de Resistência	15
2.3	Circuito de medição.....	18
2.4	Comunicação do sistema	20
2.5	Sistemas Embarcados	21
2.6	Tambor descascador de toras de madeira	22
2.6.1	Características do equipamento	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	O ESP32	24
3.2	Conversor analógico-digital HX711.....	25
3.3	Método de calibração.....	26
3.4	Funcionamento e montagem do Sistema	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Calibração do sistema.....	32
4.2	Coleta de dados.....	32
5	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A aquisição de dados (DAQ) é o processo de medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador. Um sistema DAQ é formado por sensores, hardware de aquisição e medição de dados e um computador com software programável. Em comparação aos sistemas tradicionais de medição, os sistemas DAQ baseados em PC exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de conectividades dos computadores padrão da indústria. Com isso, tem-se uma solução de medição mais poderosa, flexível e de melhor custo-benefício (NI, 2019).

O sensor de deformação é uma das ferramentas mais importantes na técnica de medição elétrica aplicada à medição de grandezas mecânicas. Tecnicamente, “deformação” pode ser causada por tração e por compressão, diferenciados por um sinal positivo ou negativo. Portanto, os sensores de deformação são utilizados para captar expansão e contração (Omega, 2017).

O sistema de aquisição de dados de extensometria pode auxiliar nos estudos de integridade estrutural, validando estudos com dados coletados em campo. Neste trabalho, pretende-se apresentar o desenvolvimento e a aplicação de um sistema baseado em microcontrolador para coleta de dados de extensômetros instalados na estrutura de um tambor descascador de toras de madeira, com finalidade de estudos de integridade estrutural.

O tambor descascador tem como função descascar toras de madeira. Ele faz parte da primeira etapa do trabalho com a madeira após a extração, deixando-a preparada para as próximas etapas do processo de fabricação do papel.

1.1 Justificativa do Trabalho

Indústrias que possuem equipamentos que sofrem grandes esforços mecânicos, muitas vezes necessitam das trocas do equipamento periodicamente, pois o esforço ali é muito concentrado, causando um desgaste elevado de suas estruturas, estudos com extensômetros, podem ajudar na vida útil de cada equipamento, pois a identificação dos pontos de maior tensão fica mais evidente, criando a possibilidade de reforços e monitoramento contínuo, ajudando em manutenções dos mesmos.

Equipamentos de medição de extensometria são na maioria das vezes muito caros e robustos, como o equipamento da National Instruments que variam de R\$6500,00 a

R\$23000,00. Sistemas de aquisição de dados baseados em IoT podem ter um custo até 20 vezes menor que o valor de mercado, e apresentar menores dimensões, podendo atender o mercado de uma forma mais acessível.

Com a necessidade de um sistema de aquisição de dados de baixo custo, baixo consumo energético, com comunicação sem fio e com robustez ao ambiente fabril e tendo em vista o alto custo de um sistema similar no mercado, foi criado um sistema de aquisição de dados de extensometria baseado em microcontroladores, conversores A/D e amplificadores operacionais, tendo seu primeiro teste em um tambor descascador de toras de madeira, em que buscou-se atender todos os requisitos do sistema.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de extensometria para uso em um tambor descascador de toras de madeira. O sistema deve apresentar baixo custo, comunicação sem fio, robustez, tamanho compacto e baixo consumo energético. No futuro, os resultados obtidos com esse sistema podem auxiliar no estudo da integridade estrutural e da vida útil de equipamentos, podendo propor reforços ou trocas de elementos no equipamento avaliado.

Os objetivos específicos são:

- Realizar um estudo sobre o tipo de sensor utilizado na aplicação;
- Realizar o condicionamento do sinal de saída do sensor;
- Desenvolver um sistema de envio e armazenamento dos dados do sistema;
- Calibrar o sistema de medição de deformação;
- Validar a aplicação em campo.

1.3 Estrutura do Trabalho

Na revisão bibliográfica foi apresentada a lei de Hooke, para dar uma introdução aos extensômetros que usam do princípio da mesma para o funcionamento. Os extensômetros são apresentados junto nos seus diversos tipos e formas, de acordo com a aplicação desejada. Extensômetros elétricos-resistivos são apresentados de uma forma mais aprofundada, exibindo-se funcionamento e aplicações dos seus diversos tipos, de acordo com o esforço mecânico desejado e as direções de tensão. Passando pelo condicionamento do sinal de saída

do extensômetro é apresentada a ponte de Wheastone e suas diversas formas de montagem para medida do sinal de saída. O sistema de comunicação usado na aplicação é apresentado junto do motivo pelo qual foi escolhido. No intuito de realizar uma contextualização é apresentado a definição de sistemas embarcados e qual tipo de sistema embarcado é usado na aplicação. Por fim, o tambor descascador de toras é apresentado com suas dimensões e características.

Nos materiais e métodos são apresentados cada componente do sistema de aquisição de dados, junto da calibração do sistema para aplicação em campo. São apresentadas imagens do sistema pronto, croqui de aplicação no tambor descascador, modelo esquemático de ligação, os sensores aplicados na estrutura, e local de fixação do sistema.

Na parte de resultados e discussão é mostrada a curva de calibração do sistema, os gráficos gerados a partir da coleta em si e futuras aplicações possíveis para o sistema.

O trabalho é concluído com a validação dos dados e envio para futuras análises de integridade estrutural, junto de futuras evoluções no sistema, com incrementos para inovações referentes a indústria 4.0.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Lei de Hooke

A lei de Hooke é aplicada em estados de tensão uniaxial, biaxial ou multiaxial, possibilitando o cálculo de tensões em locais específicos de uma peça sob análise. Neste trabalho, a análise de esforços se limitou apenas ao cálculo de tensões uniaxiais, devido às particularidades da aplicação, que serão descritas ao longo do trabalho.

No trecho onde ocorre deformação elástica em um corpo de prova, as tensões são baseadas na Lei de Hooke, dada pela Equação 1:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

em que ε é a deformação (adimensional), σ é a tensão (MPa) e E é o módulo elástico (MPa), aplicados somente a tensões uniaxiais.

Diferentes tipos de materiais apresentam diferentes valores de E , como por exemplo: 210000 MPa para o aço, 10000 MPa para a madeira e 200000 MPa para o concreto. O gráfico tensão versus deformação de um material pode ser observado na Figura 1.

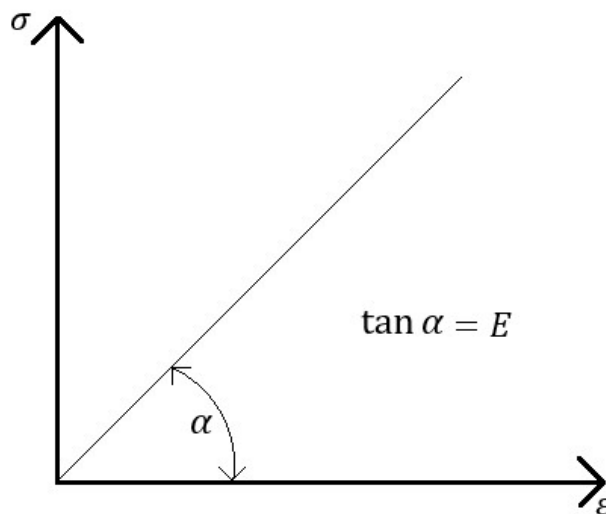


Figura 1 – Gráfico $\sigma \times \varepsilon$.

Ao substituir $\varepsilon = \Delta l/l$ e $\sigma = N/A$ na Equação 1, em que l é o comprimento (m), N é a força (N) e A é a área (m^2), tem-se:

$$\frac{N}{A} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Isolando-se Δl na Equação 2, tem-se:

$$\Delta l = \frac{N l}{E A} \quad (3)$$

Na Equação 3 mostra-se que o alongamento uniaxial é proporcional à carga e ao comprimento, e inversamente proporcional ao módulo elástico e à área da seção.

A deformação existente em solicitações unidimensionais pode ser medida por um extensômetro unidirecional, colado na direção da solicitação mecânica (tração, compressão ou flexão pura) (MINELA, 2017).

2.2 Extensômetros

Extensometria significa medição de extensões, medição de alargamentos ou medição de deformações em torno de um ponto.

2.2.1 Tipos de Extensômetros

Os extensômetros são transdutores capazes de medir deformação mecânica em corpos de prova. A seguir, são apresentados alguns tipos de extensômetros e os seus princípios de funcionamento.

2.2.1.1 Extensômetros Mecânicos

Extensômetros mecânicos são muito confiáveis e se adaptam melhor a formas didáticas. Eles são usados apenas para aplicações estáticas e são formados por sistemas de alavancas e barras, que amplificam a deformação. O extensômetro mecânico mais comum é o extensômetro de Huggenberger (Figura 1), usado em laboratórios para ensaios de tração e compressão de grande poder de amplificação. O extensômetro de Huggenberger consiste na ponta fixa A, enquanto a ponta B faz parte da alavanca que gira em torno do pivô inferior, empurrando a barra contra a agulha indicadora, variando o comprimento na base de medição multiplicado por uma proporção característica.

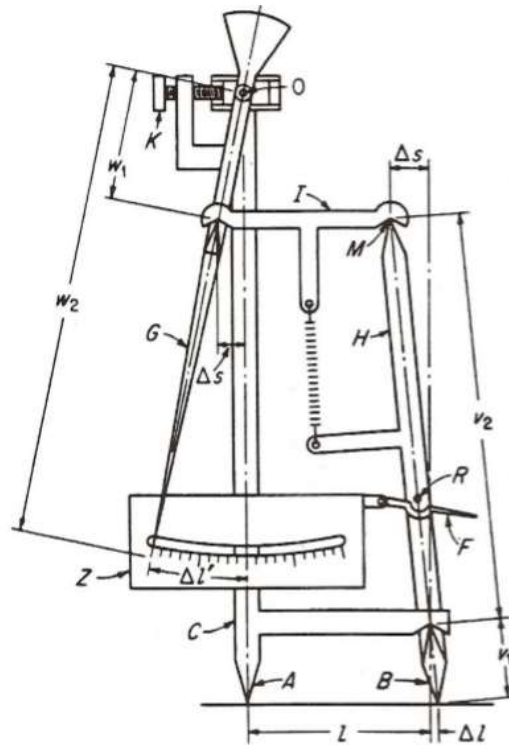


Figura 2– Extensômetro de Huggenberger.
Fonte: DOEBELIN, 1995.

2.2.1.2 Extensômetros Ópticos

Os extensômetros ópticos utilizam feixes luminosos para registrar alongamentos, tendo a vantagem de não sofrer ruídos de fricção e inércia. O mais conhecido é o extensômetro de espelhos de Martens (Figura 3). Os efeitos preliminares do atrito nos pontos de articulação e a inércia das alavancas mecânicas podem ser evitados usando um feixe de luz como meio de ampliação. Um pequeno espelho plano está preso a uma lâmina de dois gumes. Quando a lâmina gira, devido à variação no comprimento da amostra, o feixe de luz gira em ângulo duplo. O fator de amplificação depende da distância entre o espelho e a escala.

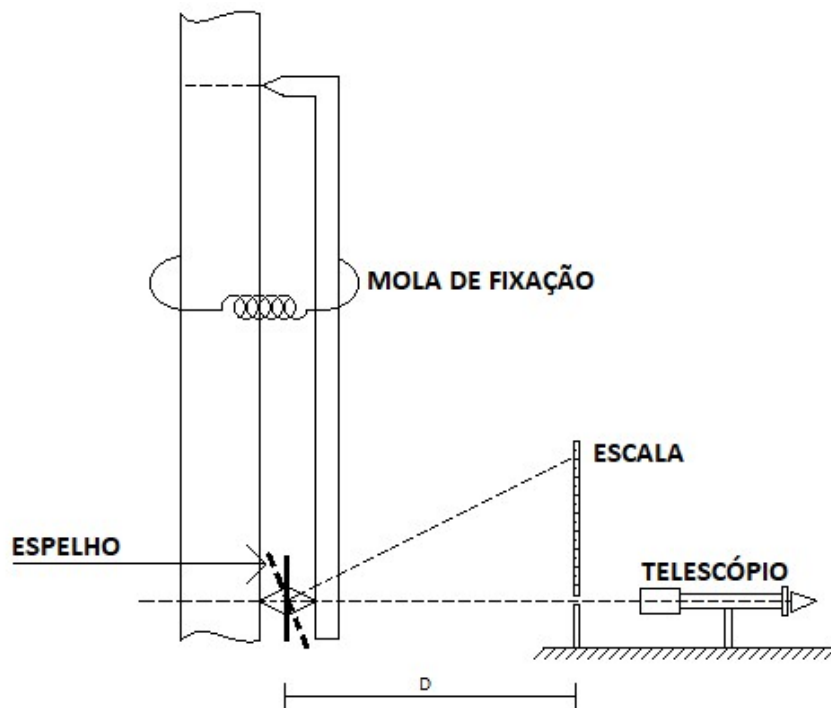


Figura 3 - Extensômetro Marten.

2.2.1.3 Extensômetro Elétrico de Resistência

Os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados entre os engenheiros de instrumentação. O extensômetro é a unidade fundamental destes dispositivos (WEBER, 2008).

Extensômetros elétricos de resistência (ou em inglês, *strain gauges*) são sensores usados para medir deformações mecânicas em corpos de prova. A medida é realizada colando-se um extensômetro no local de interesse e medindo-se a variação da sua resistência elétrica, que é função da sua deformação mecânica. Para isso, é necessário transformar a variação da resistência elétrica em variação de diferença de potencial elétrico e, posteriormente, amplificar este sinal antes de realizar a leitura. Dessa forma, deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, pode-se realizar uma análise quantitativa da distribuição da deformação sob condições reais de operação (ANDOLFATO, 2004; Silva, 2019).

Para exemplificar o princípio de funcionamento de um extensômetro, na Figura 4 apresenta-se um desenho representativo de um fio e sua seção transversal, mostrando-se a deformação de um fio tracionado.

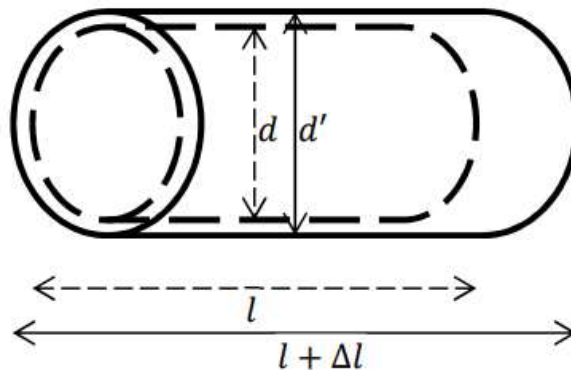


Figura 4 – Deformação em um fio tracionado

A resistência elétrica dos materiais metálicos se altera diante de uma deformação mecânica. Na Figura 1, por exemplo, o fio metálico sem sofrer nenhuma deformação, i. e., de comprimento l e diâmetro d , apresenta resistência elétrica R de acordo com a 2ª lei de Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4)$$

em que l é o comprimento do fio (m), A é a área da seção transversal do fio (m^2), ρ é a resistividade do material metálico ($\Omega \cdot \text{m}$) e d é o diâmetro do fio (m).

Caso o material sofra alguma deformação no comprimento (Δl) ou no diâmetro (Δd), e considerando-se a área da seção do fio condutor $A = (\pi d^2)/4$, a sua resistência sofre uma alteração ΔR , ou seja:

$$(R + \Delta R) = 4\rho \frac{l + \Delta l}{\pi(d + \Delta d)^2} \quad (5)$$

No caso de um extensômetro típico, tem-se um formato de grade constituído por um fio percorrendo em ziguezague o caminho entre os seus dois terminais. Dessa forma, torna-se possível mensurar os esforços submetidos a um corpo de prova por meio da medição da variação da resistência elétrica do extensômetro. O formato de um extensômetro comercial é apresentado na Figura 2, juntamente com a base onde ele é fixado.

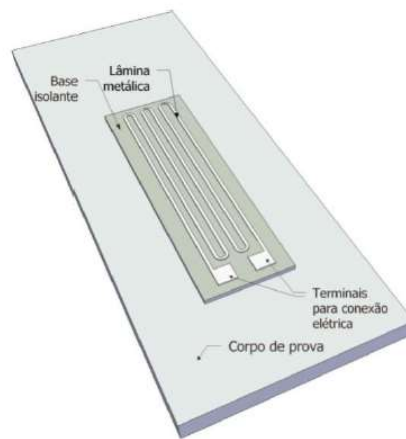


Figura 5 – Diagrama esquemático de um extensômetro de fita metálica, colado sobre um corpo de prova.

Fonte: GUADAGNINI, 2015.

Os extensômetros podem ser comercializados de diversas formas, de acordo com a aplicação desejada:

- Extensômetro uniaxial (Figura 6) – são usados para medir esforços em uma única direção, quando se sabe a direção de medição desejada (**utilizado na aplicação da análise em questão**);
- Extensômetro do tipo roseta dupla (Figura 7) – são usados para medir esforços em duas direções conhecendo-se as direções de medição desejadas;
- Extensômetro do tipo roseta tripla (Figura 8) – são utilizados para medição de tensão em duas direções, quando não se sabe a direção correta da medição.

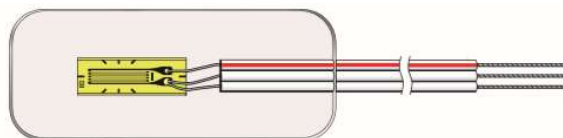


Figura 6 – Extensômetro Uniaxial

Fonte: KFWB, 2018.

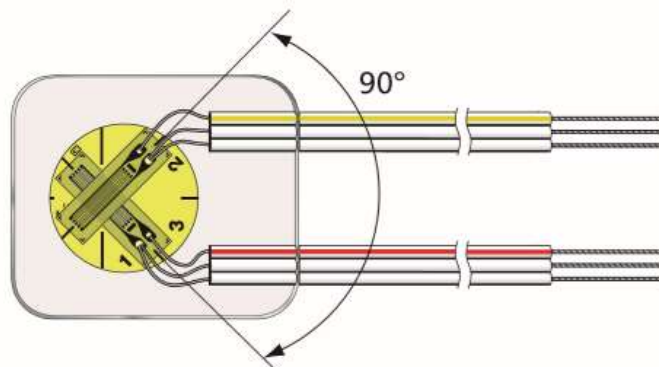


Figura 7 – Extensômetro Biaxial.

Fonte: KFWB, 2018.

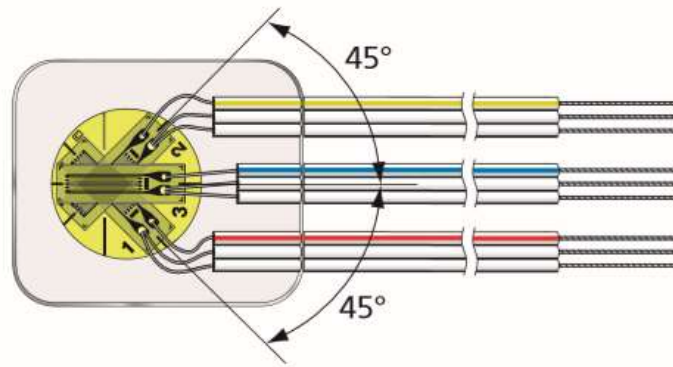


Figura 8 – Extensômetro Triaxial.
Fonte: KFWB, 2018.

2.3 Circuito de medição

Em extensometria, utiliza-se o circuito de ponte de Wheastone para transformar a variação da resistência elétrica do(s) extensômetro(s) em variação de diferença de potencial, apresentado na Figura 9.

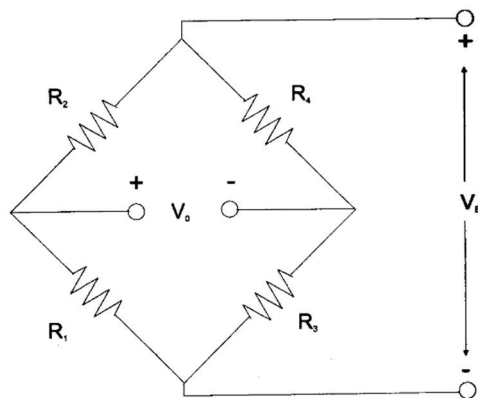


Figura 9 – Circuito elétrico da ponte de Wheastone.

De acordo com a Figura 9, aplicando-se uma tensão de entrada V_{EX} no circuito, tem-se uma tensão de saída V_0 de acordo com:

$$V_0 = V_{ex} \left[\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)} \right] \quad (6)$$

em que R_1, R_2, R_3, R_4 são as resistências da ponte de Wheastone (Ω).

Caso todos os resistores tenham o mesmo valor, a tensão de saída V_0 é igual a zero, logo, o circuito está balanceado. Qualquer desbalanceamento gera um sinal de tensão de saída diferente de zero.

Para medição em ambiente com baixa variação de temperatura em direção uniaxial é utilizada a ligação em um quarto de ponte, pois ele não sofrerá alterações de resistividade por dilatação térmica, não tendo a necessidade de um extensômetro passivo, como mostrado na Figura 10. Esse sistema também necessita de uma amplificação de sinal maior, pois a variação será menor.

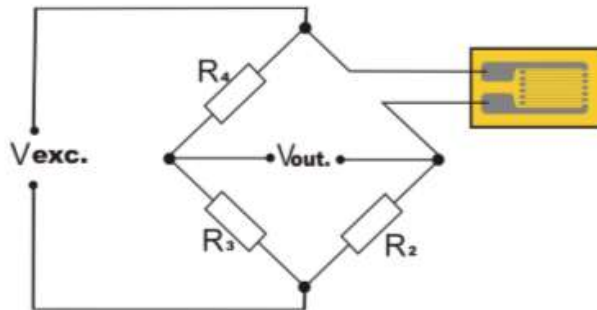


Figura 10 – Diagrama esquemático do sistema em um quarto ponte.
Fonte: PAULINO, 2011.

Para a aplicação no tambor descascador foram medidas deformações uniaxiais em meia ponte, para medir deformação em uma direção. O primeiro extensômetro é responsável pela medida da deformação na estrutura e o outro é utilizado como uma resistência variável de acordo com a temperatura (*dummy gauge*), contrapondo esse efeito na resistência no primeiro extensômetro; e os outros dois são resistências fixas que completam a ponte Wheastone, como apresentado na Figura 11.

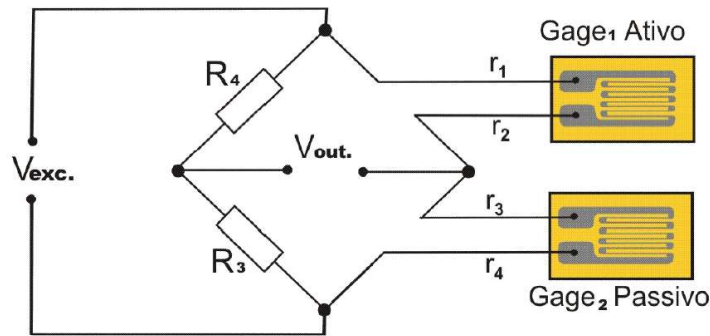


Figura 11 – Diagrama esquemático do sistema em meia ponte.
Fonte: PAULINO, 2011.

Em medições biaxiais com variação de temperatura pode-se utilizar a ponte completa, onde existirão quatro extensômetros ativos, cada um em uma direção, compensando qualquer deformação oriunda de temperatura, deixando assim a ponte em equilíbrio e com uma qualidade melhor de sinal, como mostrado na Figura 12, coletando qualquer deformação nas direções posicionadas.

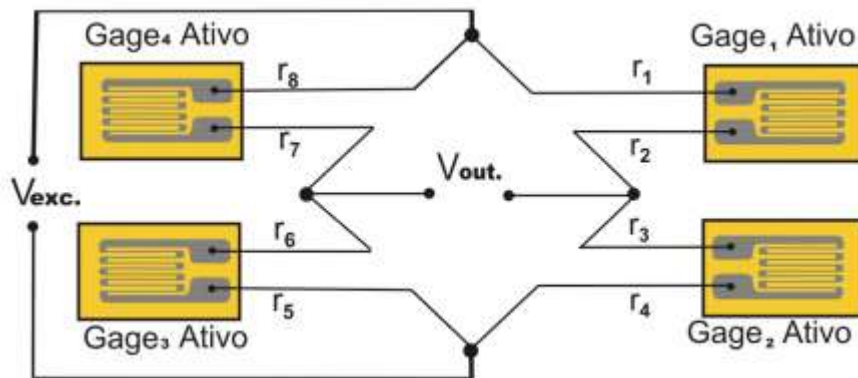


Figura 12 – Diagrama esquemático do sistema em ponte completa.
Fonte: PAULINO, 2011.

2.4 Comunicação do sistema

O ESP32 é um microcontrolador que permite comunicação sem fio via Bluetooth e Wi-Fi. O Bluetooth é de baixo alcance e baixa velocidade, não atendendo ao ambiente industrial em questão, que exigia um alcance de 50 m com possibilidades de interferências. O Wi-Fi foi a melhor opção encontrada. O protocolo de comunicação Wi-Fi TCP perde um pouco para o protocolo UDP em questão de velocidade de transmissão, pois ele realiza testes de segurança. Logo, para a aplicação foi escolhido o protocolo UDP.

O sistema funciona com comunicação UDP (User Datagram Protocol) onde o ESP32 da placa de aquisição envia o pacote de dados sem fio a um ESP32 servidor, que conectado à porta USB do computador faz a aquisição, como mostrado na Figura 13.

O protocolo UDP é baseado no envio de pacotes de dados, de forma mais ágil que o protocolo TCP, mas perde um pouco em questão de segurança. Tendo em vista que a aplicação em questão envolve uma aquisição de dados simples, um cliente envia para o servidor que aquisita, e que necessita de uma grande quantidade de dados para análise, o protocolo UDP foi mais útil.

O protocolo UDP muitas vezes é utilizado em transmissões de streaming, onde a transmissão ocorre de forma mais rápida e em requisitos de tempo real, enviando pacotes a todo momento sem necessidade de resposta de recebimento.

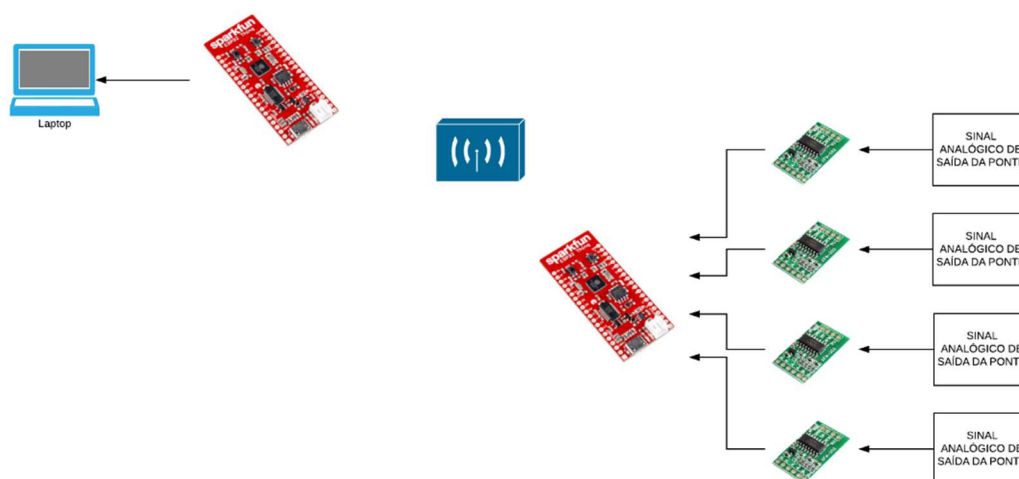


Figura 13 – Layout do sistema de comunicação sem fio.

2.5 Sistemas Embarcados

Um sistema é classificado como embarcado quando é dedicado a uma única tarefa e interage continuamente com o ambiente a sua volta por meio de sensores e atuadores (BALL, 2005). Por exigir uma interação contínua com o ambiente, esse tipo de sistema requer do projetista um conhecimento em programação, sistemas digitais, noções de controle de processos, sistemas de tempo real, tecnologias de aquisição de dados (conversão analógico/digital e sensores) e de atuadores (conversão digital/analógico, acionamento eletromecânico e PWM), e cuidados especiais na eficiência de estruturação do projeto e do código produzido (CHASE, 2007).

O principal componente do sistema embarcado geralmente é um microcontrolador, que funciona como o cérebro do sistema, fazendo o gerenciamento de tudo o que acontece.

Sistemas de aquisição de dados são chamados de datalogger. São sistemas que coletam dados de temperatura, pressão, umidade, pH, tensão mecânica dentre vários outros. Eles podem tanto coletar quanto controlar o sistema de acordo com o dado recebido, como por exemplo controlar a temperatura a um certo valor, acionando uma resistência ou um ventilador, de acordo com o valor desejado pelo projetista.

No sistema de aquisição de aplicado ao tambor descascador de toras de madeira, a tomada de decisão para ação não é feita, deixando todo o sistema por conta de salvar os dados que nele chega e enviá-los ao servidor.

2.6 Tambor descascador de toras de madeira

Usado no início do processo da produção de celulose, o tambor descascador de toras de madeira é utilizado para retirar as cascas da madeira para que o produto final, a polpa da árvore, contenha um baixo teor de impureza.

O equipamento usado neste trabalho encontrava-se em funcionamento e, devido ao surgimento de trincas em algumas regiões do tambor, tornou-se necessária uma avaliação das solicitações impostas e identificação de pontos críticos, de maneira a estimar a vida do equipamento e propor soluções para otimizá-la.

2.6.1 Características do equipamento

O tambor descascador de toras possui 5 metros de diâmetro por 30 metros de comprimento e é composto basicamente por 7 unidades soldadas longitudinalmente, construídas em chapas, barras quadradas e anéis de aço, como mostrado na Figura 14.

Pode-se dividir uma unidade do tambor em duas regiões distintas:

- Região lisa – local onde há atrito com os pneus, proporcionando o giro do tambor;
- Região ranhurada – local situado entre os anéis por onde as cascas de madeira são expelidas.

O movimento de giro é proporcionado pelo atrito da superfície externa do tambor com 72 pneus acionados por motores elétricos acoplados a redutores instalados sobre 7 *trucks* de acionamento dispostos ao longo de seu comprimento.

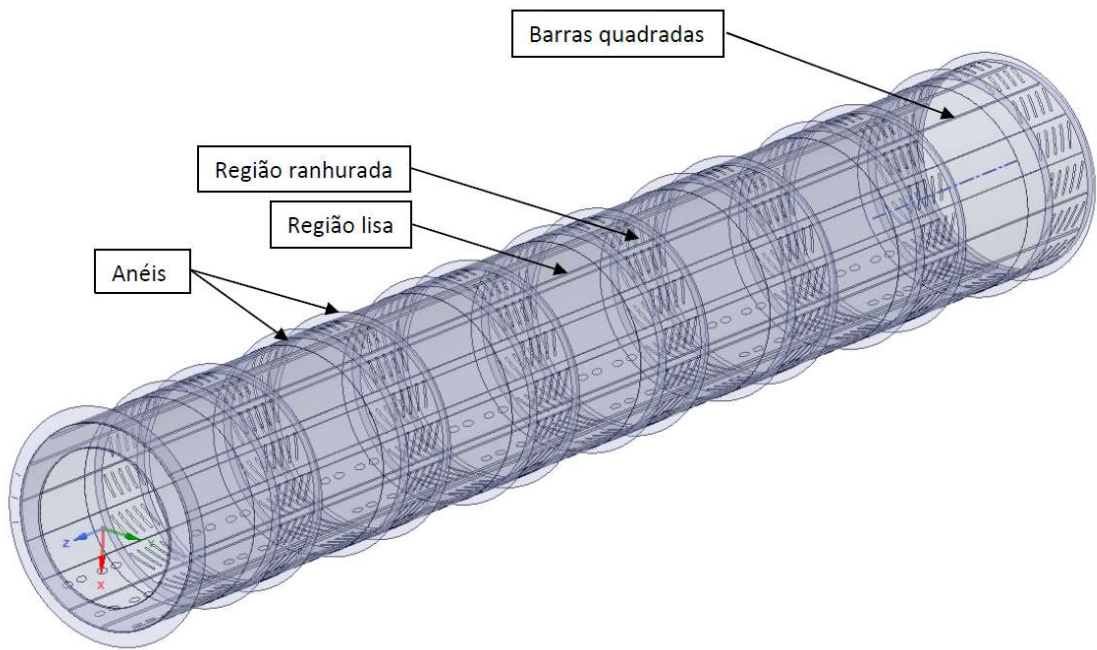


Figura 14 – Modelo 3D do equipamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em uma empresa fabricante de papel e celulose. Para a fabricação do sistema de aquisição de dados foram utilizados dois microcontroladores ESP32, quatro HX711 (Conversor analógico-digital de 24 bits para balanças de pesagem), oito extensômetros, oito resistores de 120 Ω e quatro trimpots de 100 Ω . Com uma frequência de aquisição de aproximadamente 40 Hz, o HX711 é um circuito que atende a esta aplicação, pois apresenta uma taxa de aquisição máxima de 80 Hz e também apresenta filtros para amenização de ruídos, tornando-se uma boa opção para aplicação.

3.1 O ESP32

O ESP32 é um chip que contém Wi-Fi e Bluetooth de 2,4 GHz, projetado com o sensor de ultrabaixa potência, com finalidade de um coprocessador, da TSMC. Tendo em vista o tamanho reduzido da placa, boa capacidade de processamento e sua possibilidade de trabalhar com o envio de dados sem fio, o ESP32 foi selecionado como boa alternativa para aplicação dentro do sistema de aquisição.

Com a IDE Arduino como opção de compilar e carregar programas, o ESP32 se torna uma ferramenta simples e habitual para o desenvolvimento. A placa de desenvolvimento utilizada no sistema de aquisição de dados, baseada em ESP32, é a ESP32 Thing da Sparkfun (Figura 15), que realiza a coleta e o envio dos dados de extensometria.



Figura 15 – Placa ESP32 Thing Sparkfun.
Fonte: Sparkfun, 2019.

3.2 Conversor analógico-digital HX711

O circuito integrado HX711, representado na Figura 16, é um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits de resolução. Ele pode ser ligado diretamente a um sensor em ponte, sendo projetado para uso em balanças de pesagem (SEMICONDUCTOR, 2011).



Figura 16 – Placa HX711.
Fonte: SEMICONDUCTOR, 2011.

O CI HX711 recebe o sinal analógico de saída da ponte Wheastone, amplifica-o, com ganho de 64 vezes ou 128 vezes, e o converte para um sinal digital de 24 bits, que é enviado ao ESP32 via comunicação I2C.

Esse dispositivo foi selecionado pela sua facilidade de utilização, pois já possui as entradas indicadas e os filtros necessários para diminuição de ruídos.

Na Figura 17 apresenta-se o circuito esquemático do HX711 mostrando a ligação de uma célula de carga ao circuito. Filtros capacitivo, multiplexador, amplificador com ganho variável, conversor analógico digital e mais componentes são explicitados no diagrama de blocos, deixando mais claro o funcionamento do HX711.

A seleção do ganho é feita com base na escolha das entradas: INA+ e INA- para selecionar o ganho de 128 vezes; e INB+ e INB- para selecionar o ganho de 64 vezes. E+ e E- recebem os sinais de excitação da ponte.

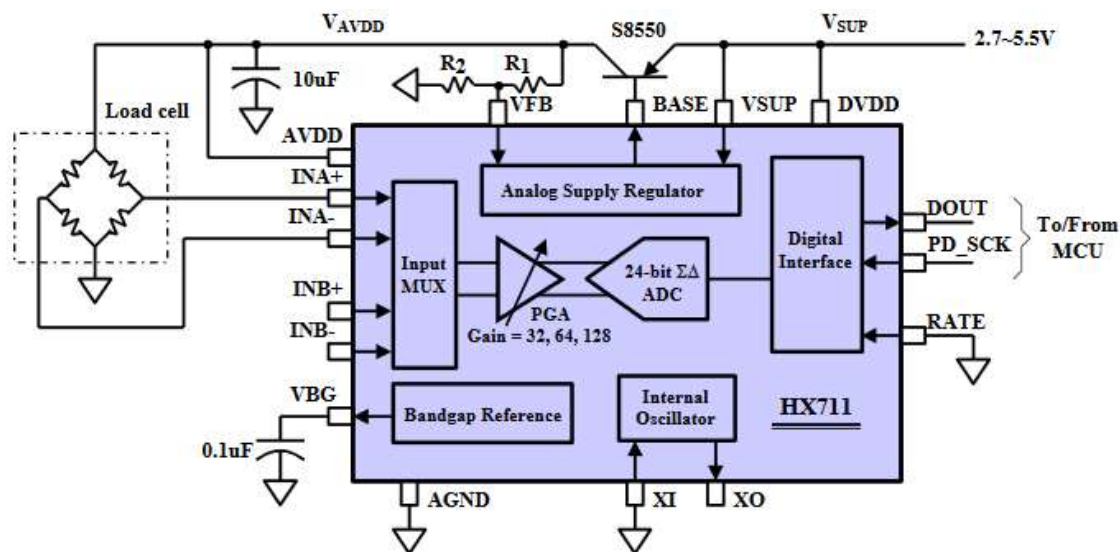


Figura 17 – Diagrama de blocos da aplicação de uma célula de carga com HX711.
 Fonte: SEMICONDUCTOR, 2011.

3.3 Método de calibração

A calibração do sistema foi realizada por meio de um teste de bancada utilizando uma haste de aço. Uma de suas extremidades foi fixada em uma mesa, e a outra foi submetida a uma força de 2,18 N (um corpo com valor de peso conhecido) em quatro posições, de forma progressiva (quatro pontos entre as duas extremidades), como mostrado na Figura 18. Os extensômetros foram fixados próximo à extremidade fixa da barra.

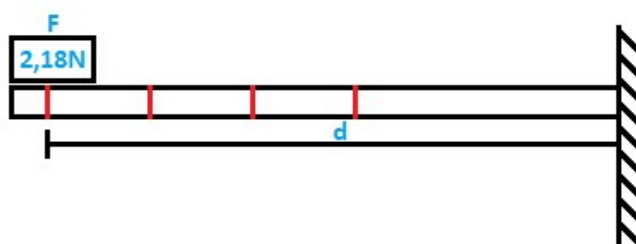


Figura 18 – Esboço dos pontos de calibração da haste.

Para se obter a curva de calibração, os resultados da conversão analógico-digital (ADC) do sinal do extensômetro foram correlacionados com a tensão mecânica (MPa) aplicada ao sistema, em cada ponto, por meio de regressão linear.

Observa-se o momento em cada ponto e calcula-se a tensão atuante naquele ponto para se obter o gráfico de calibração, de acordo com a Equação 7:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

em que M é o momento (N.mm), c é a distância da linha neutra até a linha externa, ou seja, metade da largura da haste (mm) e I é o momento de inércia da secção reta transversal do corpo de prova (mm⁴). O momento M pode ser calculado como

$$M = Fd \quad (8)$$

em que F é a força aplicada (N) e d é a distância da extremidade fixa da haste ao centro do corpo de prova (mm).

O momento de inércia I da secção reta transversal do corpo de prova, usado em formas retangulares, é dado por

$$I = \frac{ba^3}{12} \quad (9)$$

em que a é a altura (mm) e b é a largura (mm) da secção transversal da haste.

3.4 Funcionamento e montagem do Sistema

O microcontrolador ESP32 envia um sinal de excitação para o HX711 que ativa a ponte de Wheastone composta por dois strain gages e dois resistores de mesma resistência. O HX711, por sua vez, amplifica o sinal coletado com ganho de sinal 128 vezes maior que a saída da ponte. Esse sinal analógico, é convertido para digital digital pelo ADC de 24 bits e, posteriormente, é enviado para o ESP32, que envia os dados via Wi-Fi a um servidor criado em outro ESP32. Por meio da porta serial do ESP32, realiza-se a aquisição de dados em um computador, usando um aplicativo gratuito que faz a leitura e aquisição dos dados na porta serial. O sistema completo é composto por 8 resistores e 4 potenciômetros de ajuste, 8 extensômetros, 4 HX711 e 2 ESP32 Sparkfun Thing (cliente e servidor), que coletam e enviam os dados de deformação em 4 pontos diferentes em um tambor descascador de toras de madeira. Na Figura 19 mostra-se um circuito simplificado para um ponto de coleta, em forma esquemática; e na Figura 20 é apresentada uma imagem do sistema montado de forma completa.

De acordo com o desenho 3D da fixação na Figura 21 foram fixados os extensômetros na estrutura do tambor descascador, conforme mostrado nas Figuras 22 e 23, o extensômetro de medição unidirecional e seu compensador térmico, apresentando a forma correta de fixação para capturar tensões nas partes desejadas. Na Figura 24, apresenta-se a fixação do sistema de aquisição no tambor.

UM PONTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

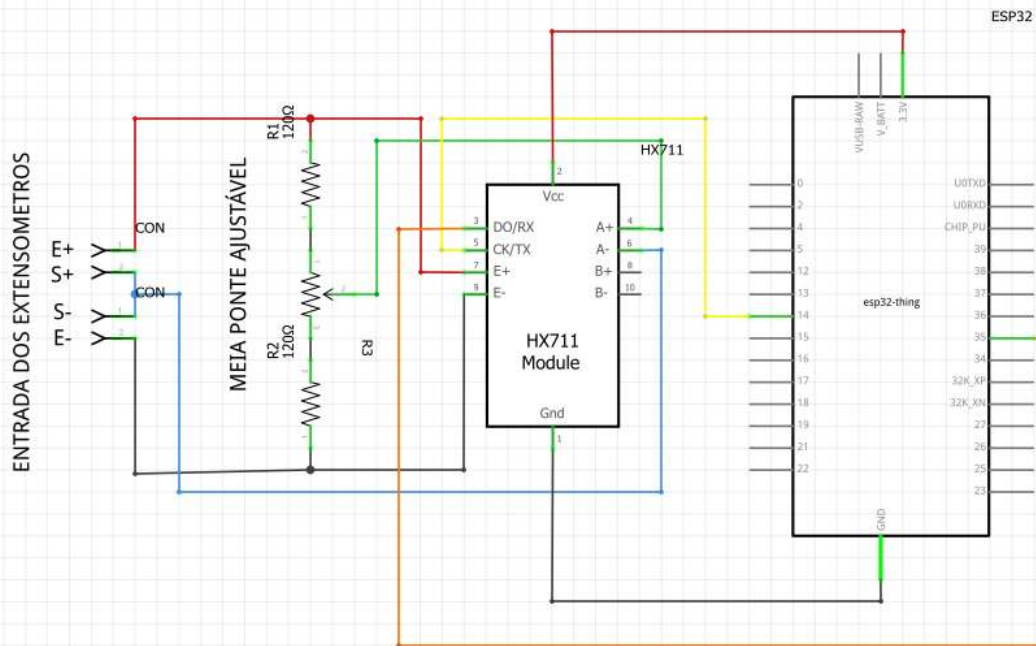


Figura 19 – Diagrama esquemático do sistema de aquisição de dados representando um ponto de aquisição.

O sistema protótipo, da Figura 20, foi criado em uma placa perfurada 10x10 cm com os HX711 posicionados lado a lado, logo após os conjuntos de meia ponte de compensadores e as entradas para conectores tubulares, mais ao fundo ESP32 tendo espaço para a entrada do cabo de energização.



Figura 20 – Placa do sistema de aquisição de dados.

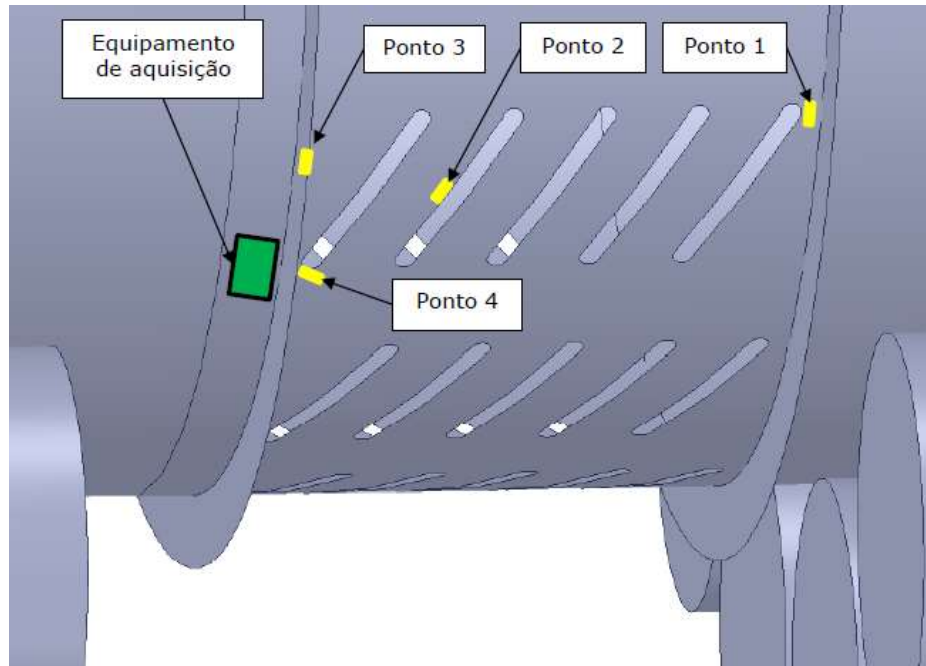


Figura 21 – Pontos de instalação dos extensômetros e caixa do equipamento de aquisição.

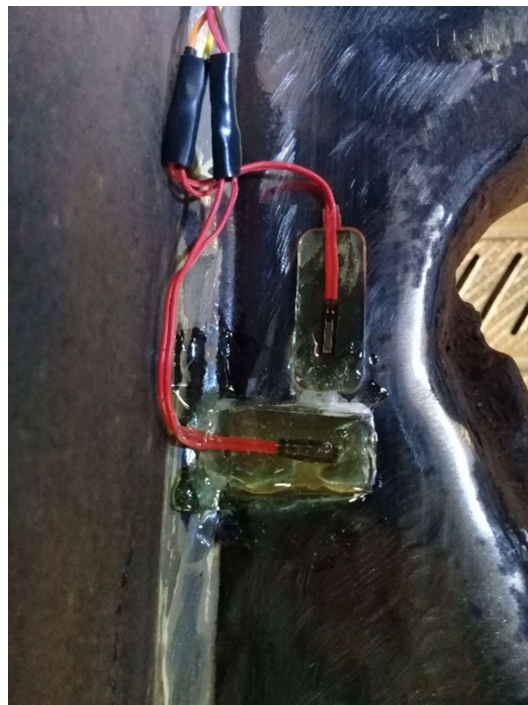


Figura 22 – Pontos de fixação dos extensômetros no tambor descascador de toras.



Figura 23 – Pontos de fixação dos extensômetros no tambor descascador de toras.

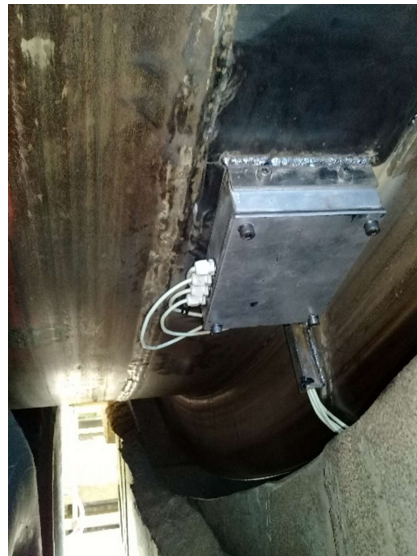


Figura 24 – Ponto de fixação do sistema de aquisição de dados no tambor descascador de toras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados do sistema de aquisição de dados na medição dos impactos em um tambor descascador.

4.1 Calibração do sistema

Os dados coletados durante o processo de calibração estão apresentados na Tabela 1. Por meio desses dados, ajustou-se a curva de calibração, apresentada na Figura 25.

Tabela 1 – Tabela de dados de Calibração.

Posição	Peso [N]	Distância [mm]	Momento [N.mm]	Tensão [MPa]	Resultado do ADC
1	2,18	100	218	4,8	24849
2	2,18	150	327	7,21	36490
3	2,18	200	436	9,61	50540
4	2,18	250	545	12,01	64121

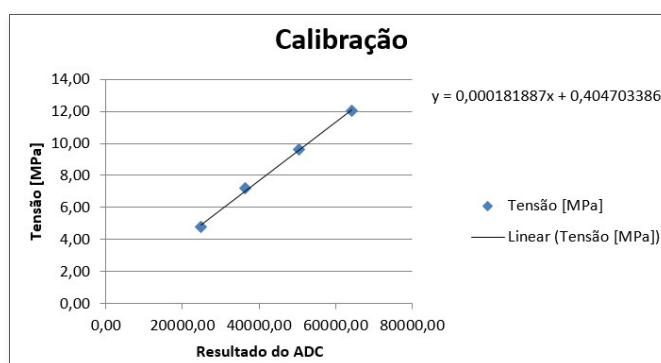


Figura 25 – Gráfico da curva de calibração.

4.2 Coleta de dados

Após a instalação do sistema no tambor, os dados foram coletados a 40 Hz, por aproximadamente 30 minutos, gerando os dados de cada ponto coletado. Em seguida, os dados foram aplicados à equação de calibração para se obter as medições de cada ponto em tensão (MPa), como mostrados nos gráficos das Figuras 26, 27, 28 e 29.

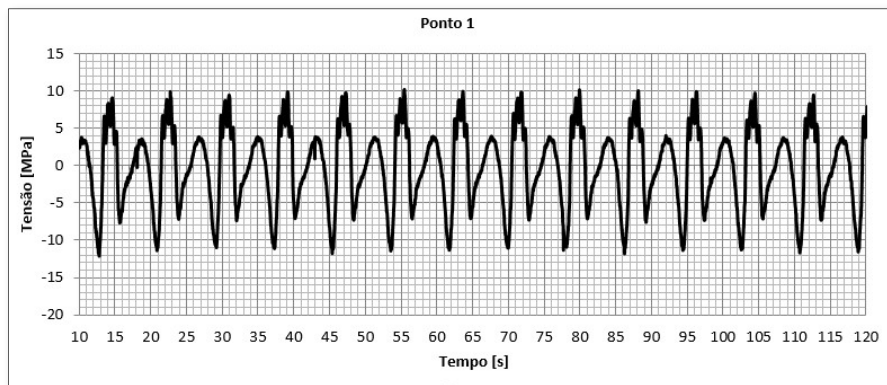


Figura 26 – Medições de tensão no ponto 1.

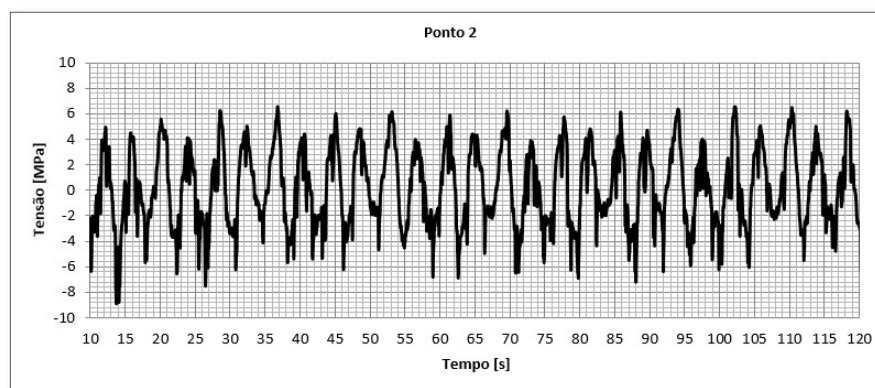


Figura 27 – Medições de tensão no ponto 2.

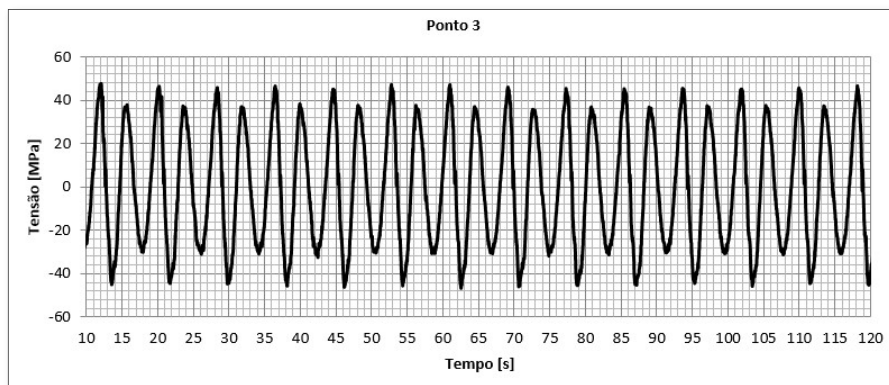


Figura 28 – Medições de tensão no ponto 3.

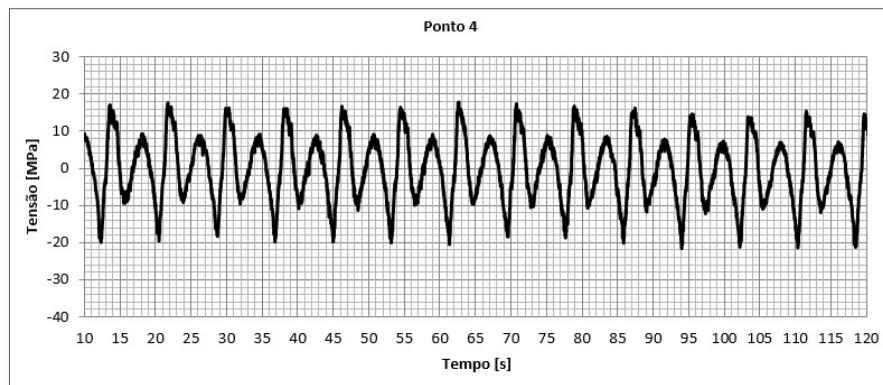


Figura 29 – Medições de tensão no ponto 4.

Foram identificados ciclos de funcionamento em que os valores encontrados podem ser confrontados com os valores das simulações feitas em computador (Figura 30), validando o estudo de integridade estrutural do tambor descascador, fazendo com que o sistema de aquisição de dados seja um importante aliado nos estudos e validações de simulação de integridade de ativos. Melhorias posteriormente serão feitas para o sistema, podendo abrir possibilidades como monitoramento em tempo real, ou até mesmo a criação de um gêmeo digital do equipamento, gerando um sistema de manutenção preditiva, em que os pontos de maior tensão mereçam uma maior atenção.

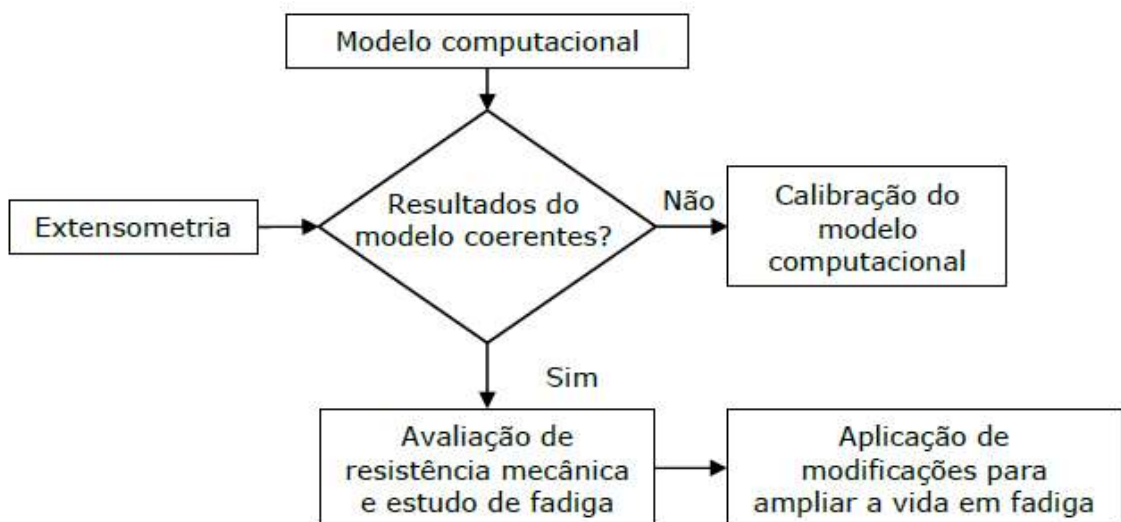


Figura 30 – Fluxograma do estudo numérico-experimental para determinação das cargas atuantes.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de extensometria aplicado a um tambor descascador de toras de madeira numa fábrica de celulose. Os resultados obtidos são muito importantes para a análise de impacto gerada durante o procedimento com a madeira, podendo sugerir intervenções e/ou manutenção no equipamento.

Os resultados coletados durante o experimento foram enviados para um estudo de integridade estrutural, em que os dados medidos serão confrontados com os dados simulados em software. A partir desses estudos, reforços mecânicos podem ser sugeridos na nova estrutura do tambor descascador de toras ou na construção de um outro tambor.

Os resultados foram conclusivos para identificação de picos de tensão nos pontos de medição selecionados, criando uma validação tanto para o modelo do simulado em computador quanto para o próprio sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho se mostrou um forte aliado ao princípio da indústria 4.0, podendo futuramente se conectar a um banco de dados para monitoramento em tempo real de equipamentos de campo, podendo criar um sistema de manutenção preditiva.

Como sugestões para futuros trabalho, tem-se a calibração com pontos de maior tensão e o desenvolvimento de um sistema com mais de um tipo de aquisição, para torná-la mais segura.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, GA de. Extensometria básica. **Ilha**, 2004.

AVIA SEMICONDUCTOR. **24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. Datasheet. 2016. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf. Acesso em: 5 maio 2019.

BALL, Stuart; **Embedded Microprocessor Systems: Real World Design**. 3. ed. EUA: MCPros, 2005.

CARDOSO, Ana Carolina Saraiva et al. Extensômetros elétricos de resistência: definições e aplicações na construção civil. **Brasil engenharia**, p. 80-83, 2017. Disponível em: www.brasilengenharia.com. Acesso em: 5 jun. 2019.

CHASE, Otavio; ALMEIDA, F. J. Sistemas embarcados. **Mídia Eletrônica. Página na internet:** < www.sbjovem.org/chase >, capturado em, v. 10, n. 11, p. 13, 2007.

Direct Industry. Extensômetro resistivo / Do Tipo Roseta / Para Análise De Limitações. In: Direct Industry. **Extensômetro resistivo / Do Tipo Roseta / Para Análise De Limitações**. 2019. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/hbm-test-and-measurement/product-6017-1264933.html>. Acesso em: 19 mar. 2019.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32**. 2018. Datasheet. Disponível em: <https://www.espressif.com/>. Acesso em: 4 maio 2019.

GUADAGNINI, Paulo Henrique; ROCHA, FS da; BARLETTE, V. E. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, p. 753-762, 2011.

KFWB. **Waterproof Strain Gages (KFWB)**. Datasheet. 2018.

KOLBAN, Neil. **Kolban's Book on ESP32**. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **O que é aquisição de dados?**. 2019. Disponível em: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>. Acesso em: 19 mar. 2019.

OMEGA (BRASIL). **Introdução a sensores de deformação**. 2019. Disponível em: <http://br.omega.com/prodinfo/sensores-de-deformacao.html>. Acesso em: 19 mar. 2019.

PAULINO, H. L. Aplicação de Strain Gages Rosetas na Análise Experimental de Tensões we Células de Carga e Transdutores de Pressão e Torque. **Material de Curso ministrado pós Strain Gage Assessoria em Extensometria Ltda**, 2011. SILVA, Andre Luis et al. A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 41, 2019.

DE ANÁLISE, Grupo; MECÂNICO, Projeto. Apostila de Extensometria. **Florianópolis-Santa Catarina-Brasil**, 2004.

WEBER, Albano Luiz. Metrologia e Instrumentação-Extensometria. 2008.

MINELA, Sthefani Neves et al. Extensometria: estudo e aplicação. 2017.

DOEBELIN, E. O. Measurement Systems Application and Design. New York: McCraw-Hill, 1995.