



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA



CAROLINA MARSIGLIA ALVES DE CAMPOS

**ESTUDO DE DEFORMAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE LDR EM
SIMULAÇÃO PARA EQUIVALÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE
EXTENSÔMETROS**

MONOGRAFIA

LIMEIRA

2020

CAROLINA MARSIGLIA ALVES DE CAMPOS

**ESTUDO DE DEFORMAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE LDR EM
SIMULAÇÃO PARA EQUIVALÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE
EXTENSÔMETROS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao curso de Engenharia de Telecomunicações, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira.

Orientadora: Profa. Dra. Talía Simões dos Santos Ximenes
Co-Orientadora: Profa. Dra. Laura Maria Canno Ferreira Fais

LIMEIRA

2020

RESUMO

Este trabalho contempla um estudo acerca da detecção de deformações em tubulações. Estudando o princípio de funcionamento do sensor extensômetro, e utilizando para fins de simulação, o sensor LDR, por apresentar certo nível de comparação em relação ao princípio de funcionamento do extensômetro. Atualmente, o extensômetro é um dos sensores de melhor precisão com a finalidade de capturar possíveis variações de tensões. O extensômetro faz a tradução da variação de tensão captada através de variações na resistência. Processo análogo ao sensor LDR, utilizado na simulação, que tem sua variação de resistência pautada na variação da luminosidade. A grande diferença entre os dois sensores está na questão da amplificação, enquanto as variações no extensômetros são quase impercíveis, fazendo com que a fase de amplificação seja necessária, as variações no sensor LDR não necessitam da fase da amplificação. Para os extensômetros, a utilização de componentes, como, pontes de *Wheatstone* e um amplificador, é necessária para melhor precisão na hora das medições pode ser garantida. As simulações desse projeto foram realizadas através do software *Tinkercad*, conectando um sensor LDR, que veio a substituir o extensômetro, pela falta do mesmo no software de simulação. Outros componentes eletroeletrônicos foram utilizados para auxiliar a análise, como potenciômetros, resistores, multímetros, um LCD e por fim, o circuito foi conectado a um Arduino Uno, para que a leitura dos resultados pudesse ser feita.

ABSTRACT

This work contemplates a study about the detection of deformations in pipes. Studying the principle of operation of the strain gauge sensor, and using it for simulation purposes, the LDR sensor, for presenting a certain level of comparison in relation to the principle of operation of the strain gauge. Currently, the strain gauge is one of the best precision sensors in order to capture possible variations in voltages. The strain gauge translates the voltage variation captured through changes in resistance. This process presents a similar level of comparison to the LDR sensor, used in the simulation, which has its resistance variation based on the variation of luminosity. The most important difference between the two sensors is in the amplification issue, while the variations in the extensometers are almost imperceptible, making the amplification phase necessary, the variations in the LDR sensor do not require the amplification phase. For strain gauges, the use of components, such as Wheatstone bridges and an amplifier, is necessary for better accuracy when making measurements. The simulations for this project were performed using the Tinkercad software, connecting an LDR sensor, which came to replace the extensometer, due to the lack of it in the simulation software. Other electronics components were used to assist the analysis, such as potentiometers, resistors, multimeters, an LCD and finally, the circuit was connected to an Arduino Uno, so that the results could be read.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO GERAL	8
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4. MATERIAIS.....	18
4.1 Arduino Uno R3	18
4.2 LDR.....	20
4.3 LCD.....	21
4.4 Potenciômetro.....	22
4.5 Amplificador Operacional 741	23
5. METODOLOGIA.....	25
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
7. CONCLUSÃO	33
7.1 Trabalhos Futuros.....	33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, com o intenso processo de urbanização e crescimento populacional, nos deparamos com a necessidade de desenvolvimento de infraestrutura urbana cada vez mais rápido, bem como a melhoria da infraestrutura já existente. A obtenção de recursos essenciais, como água, por exemplo, ficou cada vez mais difícil de ser feita pelas famílias, devido aos centros urbanos cada vez maiores e distantes de fontes de água potável. Nesse contexto, surge uma demanda de melhoria dos sistemas de abastecimento, especialmente a rede de distribuição, no intuito de reduzir perdas, evitando assim, um grande número de conexões, vazamentos e reparos [1].

As aplicações dos sistemas de tubulações são variadas: transporte de água, petróleo, gás, dentre outros, sendo assim indispensável para as cidades e tornando importante o seu constante aperfeiçoamento. Para que as várias aplicações fossem contempladas, são necessários estudos para avaliar qual o melhor material, em função da sua utilização, extensão, diâmetro e posicionamento [1].

Além custo-benefício do material, é importante o entendimento da reação dos materiais a diferentes estímulos ou forças. Quando há alterações físicas como reação a essas forças, ocorre o processo de deformação, definida como a relação entre a variação de comprimento do material e o seu comprimento original, ou seja, antes da deformação. É importante prever possíveis deformações em tubulações, pois, podem ocorrer problemas no escoamento, acúmulo de tensões em regiões críticas e defeitos nos produtos [2].

Para este trabalho, serão consideradas tubulações de materiais homogêneos e uniformes, com propriedades constantes em todas as direções de sollicitação, sem variação de volume durante o processo e que não tenham poros ou vazios que comprometam sua integridade.

Existem diversos métodos para medida de deformações, dentre eles o modelo de *Coulomb* ou *Amontons* e o fator de atrito constante. É importante observar os critérios de escoamento para que o estado limite de tensão que definirá o escoamento seja observado, afim de se prever quando ocorrerá deformação [2].

Com os avanços tecnológicos, a identificação e utilização de sensores para medir a deformação com maior precisão, a fim de evitar potenciais acidentes, torna-se cada vez mais comum. Alguns sensores já estão sendo estudados e utilizados para este tipo de aplicação, como sensores de pressão, nível e fluxo.

Com o intuito de auxiliar na gestão dos sistemas de distribuição, a deformação em tubulações vem sendo cada vez mais estudada, devido à necessidade de encontrar uma solução de baixo custo e que possa ser aplicada em toda a rede de distribuição, dada a falta de uniformidade de materiais e diâmetros das tubulações.

2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar circuitos equivalentes para a realização da mensuração de eventuais deformações através do princípio de variação da resistência do sensor LDR. Com o intuito de posteriormente, estendê-lo para equivalência de funcionamento de extensômetros.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o princípio de funcionamento e aplicação de extensômetros;
- Estudar o princípio de funcionamento do LDR e suas semelhanças com o extensômetro para fins de simulação;
- Possível identificação de variação de resistência que possa ser traduzida através do circuito proposto para a simulação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

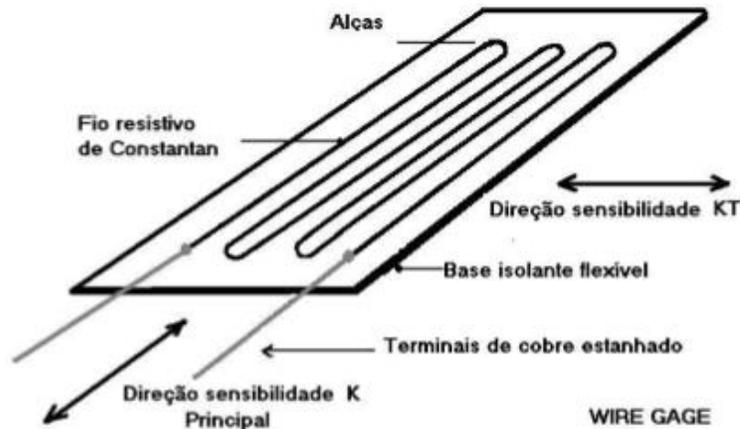
A mensuração da deformação é um fator imprescindível para diversas áreas, como saneamento e exploração de minérios, por exemplo, onde a precisão do nível de deformação é importante. Para realização da mensuração das deformações em tubulações, um dos sensores mais eficientes é o extensômetro, de acordo com [2], que já existe há mais de 80 anos e que se mostrou eficaz para a medição de variações mecânicas.

Estão sendo realizados diversos trabalhos nessa área, por exemplo, na Universidade Estadual de Campinas, foi realizada uma tese de doutorado a frente de Análise Reversa de um Modelo de Previsão de Manutenção em Redes de Abastecimento de Água, [2]. O trabalho teve como objetivo comparar resultados matemáticos com os resultados experimentais e o extensômetro foi utilizado para uma das análises em tubos de PVC, para medir deformações nos tubos axiais e circunferenciais de decorrências diversas, como: pressão hidrostática interna e outros carregamentos. Os resultados obtidos pelo trabalho realizado em 2011 foram compatíveis com o modelo matematicamente previsto, de acordo com as etapas da tubulação de PVC medida [2].

Além deste, na Universidade Federal de Santa Maria, foi realizado um estudo de técnicas de detecção de fugas de água em tubulações para o uso em internet das coisas, [Da Silva, 2018]. Estudo esse, que contempla, a vibração dos canos conforme o fluxo de água e potenciais deformações que poderiam ocorrer dadas às variações nesse fluxo. Testes foram realizados para encontrar o sensor de melhor precisão para o objetivo do trabalho. O extensômetro não foi utilizado neste trabalho, pois, ele é muito preciso ao detectar quaisquer vibrações, e como o objetivo do trabalho era a detecção de fugas de água, um sensor acelerômetro, que mede aceleração, é mais interessante para medição de fluxo de água de forma não invasiva [3].

Existem diversos tipos de extensômetros, que variam de acordo com a sua resistência elétrica à eventuais deformações, dentre eles: o piezoresistivo ou semi-condutor, o medidor de carbono resistivo, o de fios metálicos, o de película de poliéster (foil) e o mais utilizado, mostrado na Figura 1. Este consiste em uma grade muito fina de fios ou a película de poliéster ligada a um suporte, de forma que a resistência elétrica do suporte varie linearmente com a deformação. Assim, quando em uso, o suporte é conectado à superfície de contato do material, no caso, a tubulação, e quando uma força é aplicada, a deformação é encontrada através da mudança da resistência [4].

Figura 1 - Representação do extensômetro



Fonte: [4]

Porém, alguns fatores devem ser analisados para a escolha do extensômetro, dentre eles: a temperatura de operação, a magnitude, a dependência do tempo da deformação e a estabilidade do sistema em análise [4].

É importante examinar fontes de erro antes de analisar os dados. Deve-se conferir se o extensômetro está instalado de forma correta, checar sua resistência antes de aplicar qualquer tipo de força que cause deformação, além de considerar que interferências podem alterar a medição. Deve-se também observar as características do extensômetro para que se tenha uma precisão adequada nos resultados do experimento, tais quais:

- As dimensões do suporte, a depender de que tipo de extensômetro será usado;
- A resistência do extensômetro, medida entre duas fitas de metais ou áreas de contato entre a conexão da medição dos cabos. Geralmente, as resistências nominais variam de 120Ω a 700Ω ;
- O fator de sensibilidade, k , do extensômetro (adimensional) é proporcional à mudança da resistência e é determinado por lote de produção do extensômetro;
- A temperatura de referência é a indicada no *Datasheet* e, para que a interferência por variação de temperatura seja controlada, cada extensômetro é relacionado a um coeficiente térmico linear de expansão. Estes são, geralmente, combinados com as características térmicas do

alumínio e do ferro;

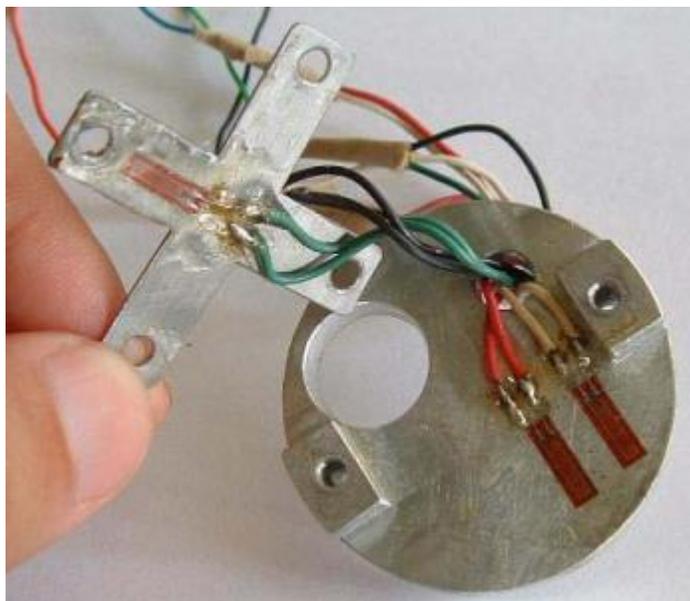
- O intervalo de temperaturas de funcionamento também deve ser observado, para que o resultado seja o mais preciso possível [4].

O extensômetro é extremamente sensível, por esse motivo, é utilizado com a conexão de um circuito de Ponte de *Wheatstone*. Para que a mudança na resistência causada pela deformação seja observada, existem dois métodos:

- uma interferência causará um rebalanceamento na ponte, causando uma mudança na resistência necessária, ou;
- será solicitada a instalação de um indicador, calibrado para micro deformações que responderá à saída de tensão da ponte. Para esse método, assume-se uma relação linear entre a tensão de saída e a deformação, uma ponte de *Wheatstone* inicialmente equilibrada e uma tensão de entrada conhecida.

A Figura 2 mostra a Ponte de *Wheatstone* com os extensômetros, na prática, sendo três extensômetros colados, com dois no suporte da célula de carga e um na célula de carga. O quarto extensômetro está colado na outra face da célula de carga, não sendo possível observá-lo nessa figura, mas conectado através dos fios pretos [5].

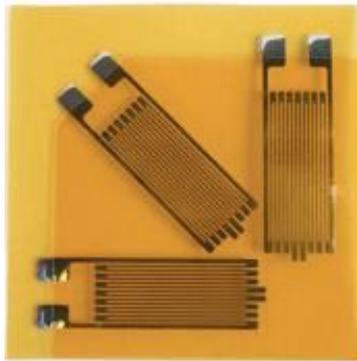
Figura 2 – Extensômetros conectados em forma de Ponte de *Wheatstone*



O extensômetro é formado por um ou mais fios muito finos, ou folhas metálicas que tem um padrão de grade como disposição, possibilitando uma área de contato maior com o objeto de estudo escolhido, essa grade, por sua vez, é colada a uma base, que, é colada no objeto de estudo [6].

Um dos formatos mais utilizados para a realização de simulações com o extensômetro consiste em três medidores de tensão uniaxial e é amplamente utilizado quando o estado de estresse do objeto precisa ser descoberto, o extensômetro do tipo roseta triaxial é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Extensômetro do tipo roseta triaxial



Fonte: [1]

No caso de extensômetros que sofrem variações com base na sua resistência elétrica, após sofrer algum tipo de pressão, que levará a uma deformação, suas grades aumentam de tamanho. Esse processo gera, por consequência, variação na sua resistência inicial. Dessa forma, a possível deformação sofrida pelo objeto possa ser transmitida ao sensor, tendo como resposta, uma variação linear elétrica. [6]

Uma das particularidades do extensômetro é uma alta sensibilidade a pressões, fornecida pela relação entre a variação da resistência e a deformação, demonstrada pela Equação 1:

$$K = \frac{\frac{\Delta R_S}{R_S}}{\epsilon} \quad (1)$$

Rearranjando os termos da Equação 1 para encontrar a deformação em função da variação da resistência do extensômetro, tem-se a Equação 2 [7]:

$$K\epsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (2)$$

sendo:

- K é o fator do extensômetro, adimensional;
- R_s é a resistência nominal do extensômetro, dada em Ω (ohms)
- ΔR_s é a variação da resistência nominal;
- ϵ é a deformação à qual o sensor foi submetido, em metros.

Uma vez descrito o sensor utilizado para que a mensuração da deformação seja realizada, é necessário fazer uma análise das tubulações ao qual, o mesmo, será aplicado.

Tubulações como a que pode ser observada na Figura 4, comumente seguem o princípio da Lei de *Hooke* para deformações. Ao analisar a forma como a deformação é descrita, é mais comum pensar em tubulações com seções transversais perfeitamente circulares. Tubulações perfeitamente circulares possuem seu comportamento descrito pela Lei de *Hooke*. Lei essa que estabelece que, ao termos um objeto deformado por alguma força externa, uma força elástica restauradora passará a ser exercida na mesma direção, porém, com sentido oposto (regime elástico). Porém, essa força elástica é variável e depende da deformação sofrida pelo objeto [6].

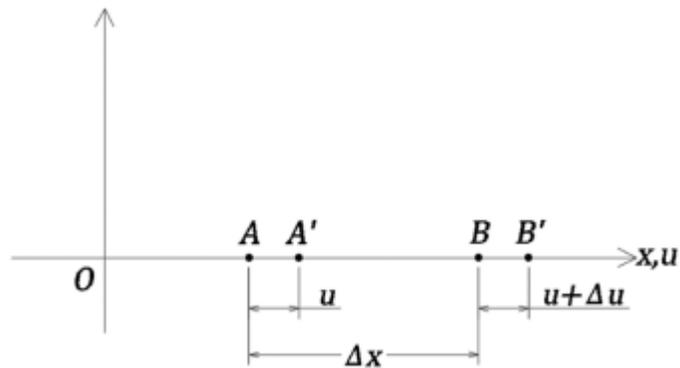
Figura 4 – Sistema de tubulações



Fonte: [5]

No entanto, para que o processo de deformação seja definido, faz-se necessário demonstrar de forma matemática. A deformação foi definida por [Mascia, 2017], levando em consideração que as deformações variam de ponto a ponto num elemento estrutural infinitesimal. Por definição matemática, considera-se um elemento infinitesimal AB, mostrado na Figura 5. [6]

Figura 5 – Deslocamento e deformação



Fonte: [6]

Os pontos A e B deslocam-se, de forma a tomar a posição dos pontos A' e B'. Durante o processo de deformação, A é deslocado u , enquanto B é deslocado $u + \Delta u$, logo, a deformação linear é dada pela Equação 3:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(u+\Delta u)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (3)$$

Para o cálculo da deformação que ocorre em cilindros, [Groehs, 2002], estendeu o cálculo de deformações lineares, visto acima, de forma a tornar a avaliação de forma tridimensional, possibilitando a análise de duas situações feitas por Groehs em 2002 e Lamé em 1852, para cilindros de paredes finas e cilindros de paredes espessas. Dessa forma, uma maior precisão na hora de realizar os cálculos para diferentes tubulações fora desenvolvida.

Para que os cálculos de tensões que causarão a deformação sejam realizados, foi imposto que os materiais obedeceriam a Lei de *Hooke*, de forma a serem isotrópicos, ou seja, possuírem o mesmo comportamento elástico em qualquer direção [6].

1. Para $OD/h < 10$, onde, OD é o diâmetro externo [mm], h, sua espessura [mm], o

cilindro é dito de parede espessa. As tensões nas direções r e θ , em função das pressões internas (P_i) e pressões externas (P_e), raio interno (R_i) e raio externo (R_e), e do raio, r , do cilindro em questão. Na direção x , estão presentes, além das constantes mencionadas as constantes de isotropia E e ν . Portanto, as deformações, estão descritas através das Equações 4, 5 e 6, respectivamente [7]:

$$\sigma_r = \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} - \frac{(P_e - P_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \frac{(P_e - P_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (5)$$

$$\sigma_x = 2\nu \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + E \varepsilon_x \quad (6)$$

A expressão final para o cálculo das deformações em um cilindro de parede espessa é dada pela Equação 7:

$$U = \frac{1}{E(R_e^2 - R_i^2)} \left[(1 - \nu)(P_e R_e^2 - P_i R_i^2)r + (1 + \nu)(P_e - P_i)R_e^2 R_i^2 \frac{1}{r} \right] - \nu \frac{\sigma_x}{E} r \quad (7)$$

2. Para $OD/h > 10$, onde OD é o diâmetro externo [m] e h , sua espessura [m] o cilindro é considerado de parede fina, a equação de Barlow descreve o comportamento de suas tensões. A equação de Barlow utiliza como principal pilar, o equilíbrio de forças em uma só direção (Groehs, 2002) e é definida de forma que a Raio externo (R_e) [mm], as Pressões internas (P_i) [N/mm^2], e externas (P_e) [N/mm^2], as tensões de deformação são representadas pelas Equações 8, 9 e 10 [7]:

$$\sigma_1 = R_e \frac{P_e - P_i}{2t} \quad (8)$$

$$\sigma_2 = R_e \frac{P_e - P_i}{4t} \quad (9)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (10)$$

Porém, devido às suas características construtivas, geralmente há imperfeições no tubo. Assim, as seções circulares podem ser consideradas como elipses, tornando então, sua resistência à deformação menor do que a definida pela Lei de *Hooke* [7].

A observação da ovalização de seções transversais de um tubo, descrita por Abassian em 1995, utilizou o modelo de quatro rótulas, para avaliar a resistência ao colapso de tubos com seções

transversais elípticas. O modelo utiliza como base a superposição das soluções elásticas e plásticas para que o comportamento da deformação seja traçado. Através da Equação 11, é possível que a solução elástica seja descrita através da pressão crítica de deformação (P_e) [N/mm^2], amplitude da ovalização inicial (μ_o) [mm], e amplitude da ovalização à uma certa deformação aplicada (μ) [mm] [7].

$$P_{eo} = P_e \left(1 - \frac{\mu_o}{\mu}\right) \quad (11)$$

P_e pode ser descrita através de E , módulo de elasticidade ou Young [N/mm^2], ν , coeficiente de Poisson [adimensional], t , espessura da parede de um espécime cilíndrico [mm] e d_t , o diâmetro médio de um espécime cilíndrico [mm]; e Equação 11:

$$P_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{d_t}\right)^3 \quad (12)$$

No entanto, em 1998, Abassian aperfeiçoou seu modelo, descrevendo a curva de rigidez do tubo, onde P_y é a pressão no escoamento em consequência à compressão circunferencial [N/mm^2] e h , altura do cilindro [mm], através das Equações 13 e 14 [8]:

$$P_{pc} = P_y (-b + \sqrt{1 + b^2}) \quad (13)$$

$$b = 2 \frac{u}{h} \left(1 - \frac{u}{d_t}\right) \quad (14)$$

Por fim, ao analisar uma tubulação perfeitamente circular, a deformação para a qual se iniciaria o colapso do tudo é dada pela Equação 15. Em função de h , espessura do cilindro [mm], d_t , o diâmetro médio de um espécime cilíndrico [mm] e σ_y , tensão de escoamento [N/mm^2] [8]:

$$P_y = 2 \frac{\sigma_y h}{d_t} \quad (15)$$

Para que as equações demonstradas, de 4 a 15, sejam aplicadas em tubulações, é necessário,

analisar e realizar o cálculo dessas expressões anteriores de acordo com a tubulação a qual o circuito será anexado. Uma vez que, as expressões descritas anteriormente têm como finalidade, o auxílio do cálculo para determinar eventuais deformações. A análise deve ser feita previamente ao estágio de testes, para que as tensões máximas permitidas pelo material do qual a tubulação é constituída sejam determinadas e, deformações e em níveis mais extremos, o colapso da tubulação possa ser detectado e evitado.

4. MATERIAIS

Para a realização deste trabalho, foram necessárias alterações com relação à parte teórica, já que no software de simulação onde o circuito foi desenvolvido, o extensômetro não estava disponível. Então, para que fosse possível a realização do trabalho, foi utilizado um sensor que tivesse certo nível de comparação com o extensômetro para que a substituição fosse feita.

Conforme descrito anteriormente, o princípio de funcionamento do parte da variação da resistência pela variação de eventuais pressões exercidas sobre o objeto ao qual ele está acoplado. Ao procurar um sensor compatível para realizar a substituição, o sensor LDR foi escolhido por apresentar um princípio de funcionamento análogo ao extensômetro, tendo sua resistência variando através da variação da intensidade da luminosidade.

Os componentes utilizados na simulação foram: potenciômetros, para que as resistências da ponte de *Wheatstone* pudessem ser mais sensíveis à variações; o fotoresistor citado anteriormente; um resistor; um amplificador operacional 741 e o Arduino UNO R3. Os componentes e seus respectivos valores de resistência, quando aplicados, são:

- Arduino Uno R3
- Fotorresistor
- LCD 16x2
- Potenciômetro – 10k Ω
- Potenciômetro - 47k Ω
- Resistor – 1 k Ω
- Multímetros
- Amplificador operacional 741
- Software de simulação Tinkercad

4.1 Arduino Uno R3

Este sensor, criado em 2005 por um grupo de pesquisadores, é utilizado para auxiliar no

tratamento de dados e respostas elétricas vindas do extensômetro. É formado por uma placa composta por um microcontrolador *Atmel*, circuitos de entrada/saída e que pode ser conectada à um computador e programada de forma a poder ser usado de forma independente, ou seja, podendo ser utilizado para controlar objetos como: luzes, robôs, temperatura do ar condicionado, entre outros [11].

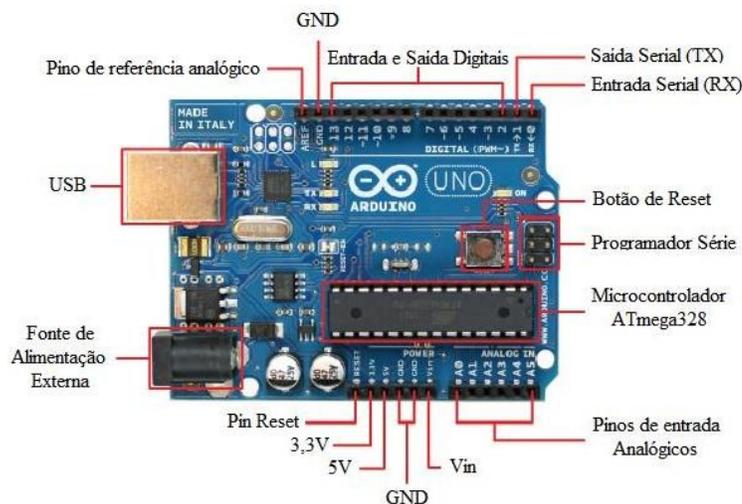
O Arduino consiste em uma placa microcontroladora de prototipagem eletrônica com suporte de entrada e saída embutido, permitindo a conexão de dispositivos externos. É projetado com um microcontrolador *Atmel AVR* e sua linguagem de programação é essencialmente C/C++ [11].

O Arduino UNO é uma placa pequena sendo seu tamanho 6,86cm x 5,34cm, e pesa apenas 25g. É baseada no microcontrolador ATmega328:

- Possui 6 entradas analógicas (A0-A5)
- Possui 6 saídas usadas como PWM (3,5,6,9,10 e 11)
- Possui também 14 pinos digitais de entrada e saída (0- 13).
- Apresenta conexões de alimentação elétrica de 3,3V, 5V, GND e 9V.

Ele apresenta compatibilidade com sensores e placas externas, conhecidas como shield, e é representado de acordo com a Figura 6 [11].

Figura 6 – Arduino UNO e sua pinagem



Fonte [11]

O Arduino serve esse propósito, pois consegue ser uma ferramenta de alta resolução para converter sinais analógicos, especialmente os que provém de uma Ponte de *Wheatstone*, pois, é um sistema de amplitude baixa.

4.2 LDR

O LDR é um dispositivo semicondutor de dois terminais, com resistência variando de forma linear conforme a intensidade da luz que incide sobre o mesmo, não possui polaridade. O seu funcionamento pode ser relacionado, em certo nível, ao efeito fotovoltaico – que ocorre quando fótons incidem sobre a superfície do componente, o que faz com que os elétrons presentes no material semicondutor sejam liberados, aumentando sua condutividade e diminuindo sua resistência. [12]

A representação do LDR é feita através da Figura 7.

Figura 7 - LDR



Fonte: [12]

A principal característica do LDR é ser um componente eletrônico cuja resistência elétrica diminui na presença de incidência de energia luminosa, ativando-o ou desativando-o de acordo com a luminosidade incidida à ele.

O LDR foi utilizado no projeto por possuir as mesmas características que o extensômetro, variando a resistência conforme a leitura de luminosidade enquanto o extensômetro varia a resistência conforme a leitura de deformação. Ambos são sensores analógicos de 10 bits e por isso a substituição do extensômetro pelo LDR para fins de simulação, podese realizada.

4.3 LCD

Quando foram criados, os LCDs não eram luminosos, deixavam ou obstruíam a passagem de luz, deixando apenas sombras. O mostrador é formado de duas placas acrílicas transparentes, contendo cristal líquido entre as mesmas, conforme tensão aplicada no LCD, o cristal líquido altera seu comportamento cristalino.

Esse display LCD tem 16 colunas e 2 linhas, com luz de fundo azul e letras na cor branca.

Para conexão, são 16 pinos, dos quais usamos 12 para uma conexão básica, já incluindo as conexões de alimentação (pinos 1 e 2), luz de fundo (pinos 15 e 16) e contraste (pino 3) [27]. A Figura 8 mostra o LCD utilizado no trabalho.

Figura 8 – LCD 16x2



Fonte: [28]

A pinagem do LCD 16x2 é feita de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Pinagem do LCD

(continua)

Pinos LCD	Função	Ligação
1	Vss	GND
2	Vdd	Vcc 5V
3	V0	Pino central potenciômetro
4	RS	Pino 12 Arduino
5	RW	GND

Tabela 1 – Pinagem do LCD

(conclusão)

6	E	Pino 11 Arduino
7	D0	Não conectado
8	D1	Não conectado
9	D2	Não conectado
10	D3	Não conectado
11	D4	Pino 5 Arduino
12	D5	Pino 4 Arduino
13	D6	Pino 3 Arduino
14	D7	Pino 2 Arduino
15	A	Vcc 5V
16	K	GND

Fonte: [18]

O LCD foi utilizado para possibilitar a apresentação da leitura do nível de luminosidade lido pelo sensor LDR.

4.4 Potenciômetro

O potenciômetro é um componente eletrônico que tem por função, criar uma limitação para o fluxo de corrente elétrica que passa por ele, com essa limitação podendo ser ajustada manualmente: aumentada ou diminuída. Um potenciômetro, geralmente, apresenta três terminais e um eixo giratório para ajuste da sua resistência, como pode ser observado na Figura 9 [19].

Figura 9 - Potenciômetro



Fonte: [19]

Os potenciômetros e os resistores, são muito similares em termos de funcionalidade e finalidade, no caso, essa limitação do fluxo de corrente elétrica em um circuito, a diferença é que o potenciômetro pode ter sua resistência variada enquanto o resistor comum não possui um valor de resistência fixo [19].

Os potenciômetros foram utilizados no lugar dos resistores para que algo mais suscetível a variação, ou seja, mais ativo, pudesse ser simulado, uma vez que não foi possível realizar a simulação nas tubulações.

4.5 Amplificador Operacional 741

É um amplificador operacional que contém apenas uma saída e duas entradas, uma sendo a entrada não inversora, pode ser utilizado como amplificador inversor, não inversor, entre outros. Seu funcionamento consiste em uma tensão aplicada na entrada não inversora que é, por sua vez, subtraída da tensão aplicada na entrada inversora e a diferença entre as tensões é amplificada na ordem de cem mil vezes. Entre as vantagens do uso do amplificador 741, estão a amplificação do

sinal de entrada na saída consumindo pouco da corrente de entrada, por conta da sua impedância de entrada muito alta e impedância de saída baixa. O amplificador operacional 741 pode ser observado na Figura 10 [20].

Figura 10 – Amplificador Operacional 741



Fonte: [21]

O amplificador operacional 741, tem como principal função no circuito, realizar a amplificação do sinal do sensor.

5. METODOLOGIA

Para que o circuito pudesse ser construído de forma análoga ao circuito que seria colocado na tubulação para a medição de deformação da mesma, foi utilizado o software de simulação *Tinkercad*.

Três, dos quatro potenciômetros utilizados, foram dispostos como parte do circuito de Ponte de *Wheatstone*, com o intuito de amplificar as variações de resistência, muito pequenas, sofridas pelo LDR.

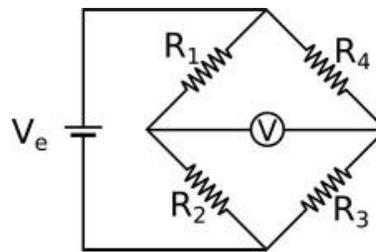
Ao serem utilizados sensores resistivos, que transmitem pequenas variações de resistência, é muito comum, a utilização de circuitos para que o projetista tenha auxílio para realizar as medições de variações nas resistências [22].

No caso extensômetro, a variação na resistência devido a pressões exercidas sobre o objeto são mínimas. Portanto, é muito comum o uso de circuitos auxiliares, como pontes de *Wheatstone*.

Os circuitos de Ponte de *Wheatstone* consistem em um esquema de montagem de resistores elétricos que permitem a medição de uma resistência elétrica até então desconhecida, com uma precisão razoável. Geralmente, esses circuitos são formados por quatro resistores e um galvanômetro ou voltímetro, dois desses resistores são conhecidos ou determinados previamente à montagem da mesma, um dos resistores possui sua resistência variável (no caso, o extensômetro), e o último resistor, geralmente possui resistência desconhecida [22].

Na Figura 11, é possível ver um circuito geral de Ponte de *Wheatstone*, onde V_e é a fonte, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são resistores e V é um voltímetro.

Figura 11 – Circuito genérico da Ponte de *Wheatstone*



Fonte: [1]

É necessário aplicar a Primeira Lei de *Kirchhoff*, conhecida como Lei dos nós. Os nós, são pontos onde três ou mais condutores são interligados, de forma que seriam o ponto onde a corrente iria se separar no circuito em questão. De acordo com a lei, a soma de todas as correntes que chegam a um nó do circuito, deve ser igual à soma de todas as correntes que saem desse mesmo nó, gerando, por consequência a conservação da carga elétrica, o que faz com que algébricamente a soma das cargas existentes em um sistema fechado permanecerá constante [23].

Nesse caso, a tensão de saída do nó é dada em função dos Resistores 1, 2,3 e 4 e em função da tensão de entrada V_e , de acordo com a Equação 16:

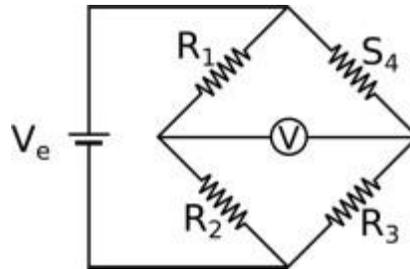
$$V = \left(\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_2}{R_1+R_2} \right) V_e \quad (16)$$

O princípio de operação do circuito de Ponte de *Wheatstone* é regido pelo equilíbrio de tensões entre dois nós do circuito. Para alcançar o equilíbrio de tensões, a tensão mostrada pelo voltímetro V tem que ser igual a zero, logo, a condição imposta anteriormente deve ser seguida de forma que os resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 satisfaçam a Equação 17 [23]:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (17)$$

Para que deformação ou variação de luminosidade captada pelo extensômetro ou pelo LDR seja lida, é necessária a utilização de um extensômetro ou um LDR ativo, ou seja, é necessário que uma troca seja realizada, entre um dos resistores ativos, pelo extensômetro ou LDR, no caso do circuito da Figura 12, o resistor R_4 será substituído pelo sensor LDR S_4 , como visto na Figura 12. Dessa forma, resistores, R_1 , R_2 e R_3 tornam-se resistores passivos, com resistências fixas [23].

Figura 12: Circuito genérico da Ponte de *Wheatstone* com R_4 substituído por S_4



Fonte: [1]

No entanto, para que a saída continue sendo zero, o resistor R_1 deve ter a mesma resistência que o sensor LDR e os resistores R_2 e R_3 devem ser iguais [23].

Considerando todos os resistores com resistências R e o sensor LDR, S_4 , com resistência $R \mp \Delta R$, onde $+R$ corresponde a relaxação e $-R$ corresponde a compressão, e V_e é a tensão de entrada do circuito, dessa forma, na Equação 18:

$$V = \left(\frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) V_e \quad (18)$$

Manipulando a Equação 18, em função de variáveis já vistas anteriormente na Equação 16, teremos a Equação 19:

$$V = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + \frac{\Delta R}{R}} V_e \quad (19)$$

Inicialmente, o projeto deveria ter três resistores na Ponte de *Wheatstone*, ao invés de três potenciômetros, porém, conforme o projeto foi sendo desenvolvido, foi notada certa necessidade da inclusão de elementos que permitissem maior variação, de forma que até a mínima variação de iluminação fosse captada pelo LDR (utilizado no lugar do extensômetro) e tratada de forma mais precisa pela ponte de *Wheatstone*.

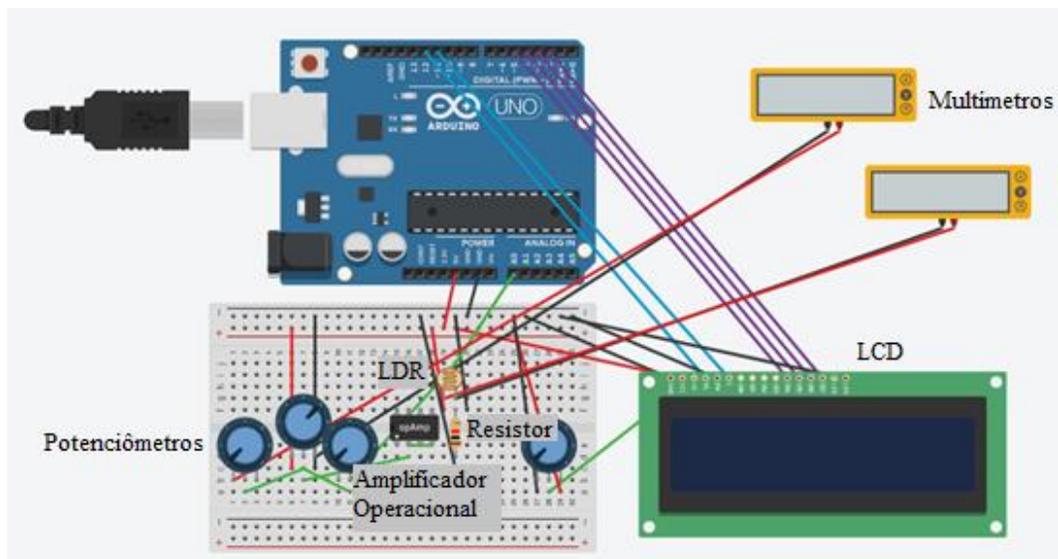
Logo, para a construção do projeto, foram utilizados quatro potenciômetros, três de resistência de $47k\Omega$ para formar a ponte de *Wheatstone*, em conjunto com o LDR, de forma a como

dito anteriormente, a ponte se tornar mais sensível à variações. E o quarto potenciômetro, com resistência de $10k\Omega$, que tem como principal função, controlar o nível de luminosidade do LCD para melhor visualização.

Um fotorresistor, para mostrar como a intensidade da luz alteraria o resultado final e um amplificador operacional, com a intenção de que o sinal de saída da Ponte de *Wheatstone* fosse amplificado de forma a ser melhor percebido.

A Figura 13 mostra o circuito completo para a simulação no *Tinkercad*.

Figura 13 – Circuito de simulação final



Fonte: Autor

Dada configuração da Ponte de *Wheatstone*, o potenciômetro do meio da ponte, está conectado ao sensor LDR, um sensor analógico de 10 bits que faz a leitura de luminosidade de 0 a 1023, que foi programado de forma a ter 100 amostras de variação de luminosidade, o potenciômetro possibilita o controle manual da luminosidade do circuito, então, mexendo nele, é perceptível as condições que tornam a luminosidade menos ou mais intensa.

Um amplificador operacional foi inserido com o objetivo de amplificar a saída da ponte de *Wheatstone*, para que as variações de tensão fossem percebidas de maneira mais intrínseca, dado que se o extensômetro tivesse sido implementado, o mesmo sofreria variações mínimas de resistência e a ponte, por sua vez, traduz essas variações de forma mais precisa, porém, ainda assim, pequena.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dois multímetros foram acoplados para que, as variações fossem medidas no sensor LDR e na saída do amplificador operacional, permitindo assim, que o circuito fosse monitorado nos pontos de que apresentam variações de tensões à serem captadas, e que fosse avaliado a necessidade da utilização do amplificador operacional aplicado ao sinal de saída da ponte de *Wheatstone* ou não.

Além da esquemática dos blocos, alguns dispositivos, como o LCD e o LDR necessitaram de programação, mostrada a seguir, para que a leitura dos dados fosse realizada de forma satisfatória:

```
#include <LiquidCrystal.h> //Inclui a biblioteca do LCD

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //Configura os pinos do Arduino para se
comunicar com o LCD

float luminosidade; //Variável para armazenar o valor da luminosidade
int x; //Variável para se guardar os valores das amostras da luminosidade
int ldr = A0; // Configura a entrada do LDR no pino A0 do Arduino

void setup()
{

  lcd.begin(16, 2); //Inicia o LCD com dimensões 16x2(Colunas x Linhas)
}

void loop()
{
  x = 0; //Zera a variável x

  //Pega 100 amostras
  for(int i=0; i < 100 ; i++)
  {
    luminosidade = analogRead(ldr); //Armazena o valor lido pelo LDR
```

```

    luminosidade = ((luminosidade / 1024) * 100); //Transforma o valor lido em
porcentagem
    x = x + luminosidade; //Armazena na variável x
}

x = x/100;

lcd.setCursor(1,0); //Posiciona o cursor na primeira coluna(0) e na segunda linha(1)
do LCD
lcd.print("Lumino: "); //Imprime no LCD "Lumino.: "
lcd.print(x); //Imprime o valor da luminosidade
lcd.print("%"); //Imprime "%", indicando que a luminosidade está em porcentagem

}

```

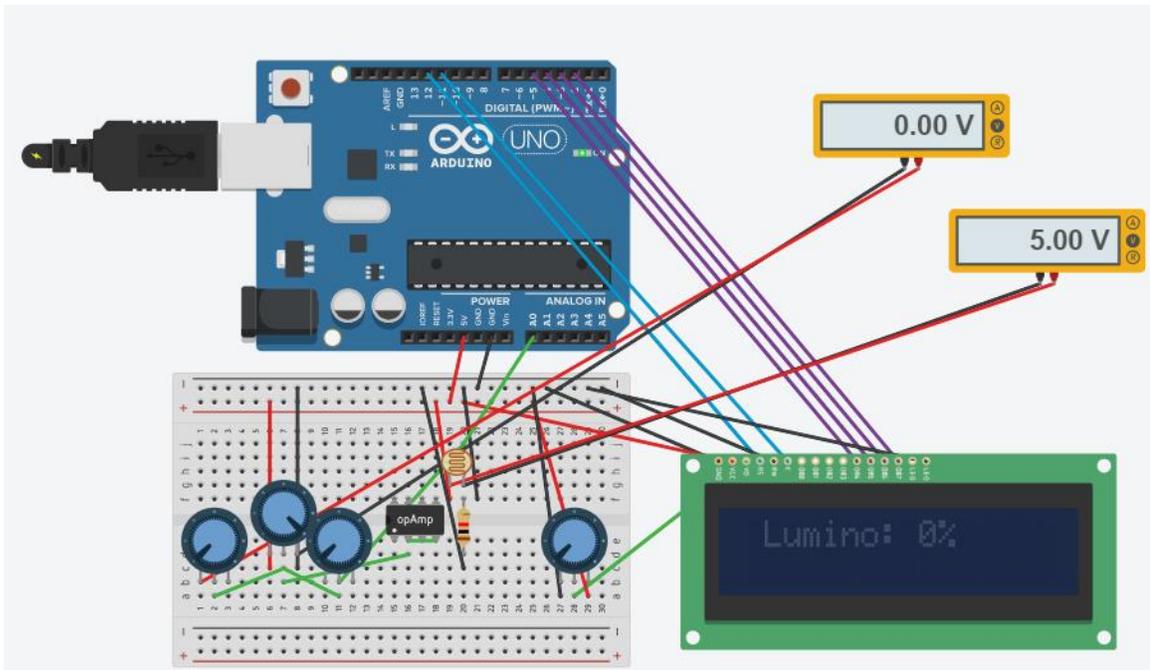
Quadro 1: Programação do LDR

Após a finalização da programação do LCD e LDR, o circuito foi montado e preparado para a realização da simulação.

Para fins de simulação, foram consideradas duas situações:

Na primeira situação, temos uma luminosidade baixíssima, mostrada através do LCD na Figura 14.

Figura 14 – Esquemático do projeto com luminosidade baixa



Fonte: Autor

Os resultados da simulação, mostraram, através da programação realizada no sensor LDR, com mais de 100 amostras, como visto através do código descrito acima, o circuito sendo sensível até mesmo às menores variações de luminosidade, ou seja, da forma em que o sensor fora programado, o mesmo, consegue captar, até mesmo as mínimas variações de luminosidade e o circuito consegue realizar essa tradução através do LCD.

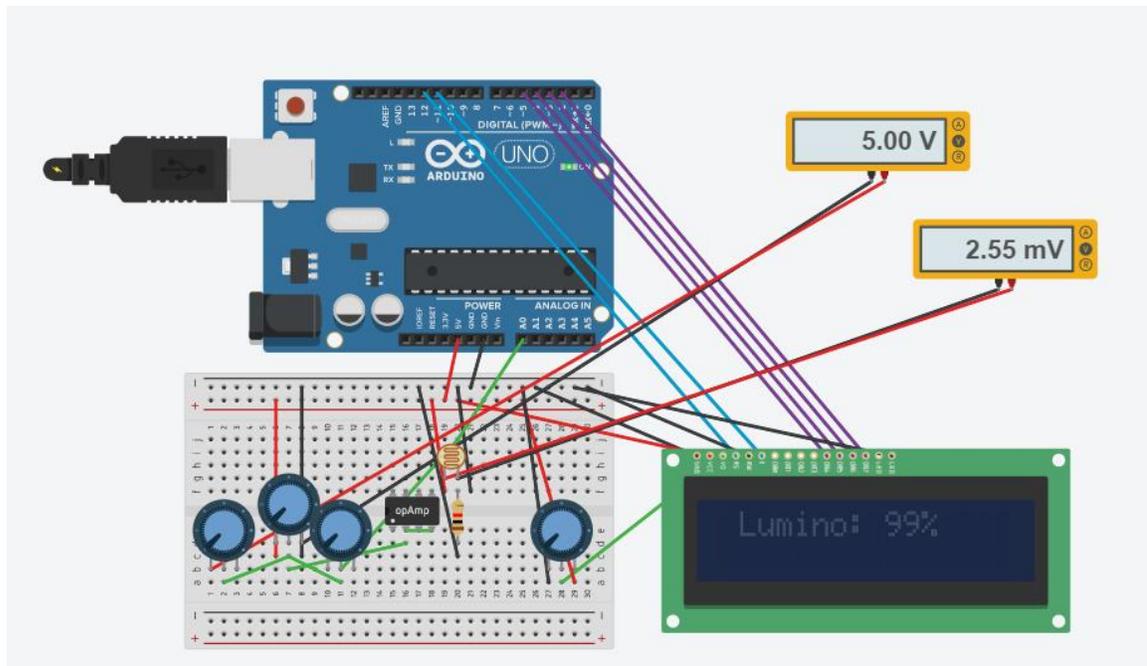
A fase de amplificação seria necessária se o extensômetro tivesse sido utilizado, de forma a variações mínimas de resistência pudessem ser captadas e traduzidas em variações maiores, com o objetivo de resultados serem obtidos para variações em função de pressões aplicadas, as quais, não seriam captadas sem a etapa de amplificação.

A precisão de resultados do circuito é um fator determinante para o sucesso do projeto, e pela primeira situação, é perceptível, que o circuito é capaz de captar variações mínimas de luminosidade.

Para a segunda simulação, foi utilizado o nível mais alto de luminosidade que o circuito consegue atingir, mostrando assim, que de acordo com o ajuste do potenciômetro, é possível observar diferentes níveis de iluminação. Analogamente, se o extensômetro fosse utilizado, seria possível observar até qual nível de deformação o objeto em estudo não sofreria deformação e a partir de que nível a deformação poderia comprometer o objeto, no caso, a tubulação.

A seguir, é apresentada a Figura 15 para a qual temos o nível de luminosidade mais alto.

Figura 15 – Esquemático do projeto com luminosidade máxima



Fonte: Autor

7. CONCLUSÃO

O trabalho proposto foi o de estudar circuitos equivalentes para a realização da mensuração de eventuais deformações através do princípio de variação da resistência do sensor LDR, para, futuramente, estendê-lo para a aplicação, em uma tubulação real, acoplando um extensômetro.

O circuito apresentado seria idealmente contruído com o extensômetro e conectado a uma tubulação, para que pressões e deformações pudessem ser medidas de forma eficaz e ocasionais rompimentos e vazamentos pudessem ser evitados.

Como não foi possível a utilização do extensômetro, o sensor LDR foi colocado em seu lugar por apresentar características semelhantes e o seu resultado dentro do circuito fora muito satisfatório. É importante ressaltar, que para o sensor LDR, a etapa de amplificação no circuito, realizada pela Ponte de *Wheatstone* e pelo amplificador operacional, não seria necessária. A etapa de amplificação fora incluída para que, futuramente, o circuito seja utilizado em uma tubulação de forma em que a única alteração necessária seja o posicionamento do extensômetro no lugar do LDR.

Os cálculos teóricos englobam desde tubulações perfeitamente circulares, até tubulações que possuem seções transversais ovalizadas, permitindo que o circuito pudesse ser acoplado sem grandes dificuldades e traduzindo a pressão e a deformação para uma variação na resistência, e por fim, na tensão.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, seria ideal implementar o circuito em uma tubulação, utilizando o extensômetro.

Infelizmente, a realidade na qual nos encontramos não nos permitiu ir além das simulações e de fato realizar a implementação do circuito em uma tubulação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anderson Langone Silva, Marcus Varanis, Arthur Guilherme Mereles, Clivaldo Oliveira, José Manoel Balthazar, A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices (2019).
- [2] André Luís Sotero Salustiano Martim, ANÁLISE REVERSA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE MANUTENÇÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. (2011)
- [3] Michele Rodrigues da Silva, TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FUGAS DE ÁGUA EM TUBULAÇÕES PARA O USO EM INTERNET DAS COISAS (IoT) (2018)
- [4] Extensômetria, Ensus, 2016 <<https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>>
- [5] The Strain Gauge. <http://web.deu.edu.tr/mechatronics/old/TUR/strain_gauge.htm>
- [6] Strain Gage Technical Data.
https://www.omega.co.uk/techref/pdf/STRAIN_GAGE_TECHNICAL_DATA.pdf
- [7] Modelos para Análise do Colapso de Tubos Utilizados na Completação. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11036/11036_5.PDF>
- [8] FEODOSIEV, V.I. Resistencia de Materiales. Moscou: Editora Mir, 1980, 583p. POPOV, E.G.
- [9] Introdução à Mecânica dos Sólidos. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1978. 534p. SCHIEL.
- [10] Newton C. Braga, Microcontroladores.
 <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/13263-o-basico-sobre-os-microcontroladoresparte-1-mic139>>
- [11] LDR Funcionamento <<https://athoselectronics.com/ldr-o-que-e-como-funciona/>>
- [12] Talía Simões Dos Santos, Desenvolvimento de uma Estratégia de Controle para o Movimento Translacional de uma Serra Mecatrônica Ortopédica. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2005).
- [13] Especificação do Arduino. Disponível em:
 <<https://www.arduino.cc/en/Hacking/BuildProcess>>. Acesso em: 26/12/2020.
- [14] Arduino UNO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 20/12/2020.

- [15] LDR. Disponível em:
 <https://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/contador555/ldr.htm#:~:text=O%20LDR%20possui%20a%20interessante,sobre%20ele%20incidir%20energia%20luminosa.> Acesso em:
 22/12/2020.
- [16] LDR – O que é e como funciona. Disponível em: <<http://mundoprojetado.com.br/ldr-o-que-e-e-como-funciona/>> Acesso em: 21/12/2020.
- [17] Como Funciona o Display LCD. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/guia-completo-do-display-lcd-arduino/>> Acesso em: 21/11/2020.
- [18] LCD Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/controlando-um-lcd-16x2-com-arduino/>> Acesso em: 24/10/2020.
- [19] Potenciômetro <<http://www.comofazeracoisas.com.br/potenciometro-o-que-e-para-que-serve-e-como-funciona.html>>
- [20] Amplificador Operacional <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/15404-conheca-o-amplificador-operacional-741-parte-1-art1725.html>>
- [21] Amplificador Operacional 741 < <https://www.autocorerobotica.com.br/741-ci-amplificador-operacional>>
- [22] M. Varanis, A.L. Silva and A.G. Mereles, Revista Brasileira de Ensino de Física 40, e1304 (2017).
- [23] S. Wen and D.D.L. Chung, Cement and Concrete Research 31, 665 (2001). [13] J. Wissman, A. Perez-Rosado, A. Edgerton, B.M. Levi, Z. Karakas, M. Kujawski, A. Philipps, N. Papavizas, D. Fallon, H. Bruck and E. Smela, Smart Materials and Structures, 22, 085031 (2013).
- [24] R.S. Figliola and D. Beasley, Theory and design for mechanical measurements (John Wiley & Sons, New Jersey, 2015).
- [25] J.P. Holman and W.J. Gadjia, Experimental methods for engineers (McGraw-Hill, New York, 2001).
- [26] J.M. Gere and B.J. Goodno, Mechanics of Materials 5th (Brooks Cole, Boston, 2001).
- [27] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, The finite element method for solid and structural mechanics (Elsevier, Amsterdã, 2005).
- [28] K.J. Bathe, Finite element method (John Wiley & Sons, New Jersey, 2008).
- [29] T.J.R. Hughes, The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis (Courier Corporation, Chelmsford, 2012).