

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

WESLEY BESERRA SILVA

**ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA O SENSOR  
A201-100 DA TEKSCAN**

São Luís

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

WESLEY BESERRA SILVA

**ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA O SENSOR  
A201-100 DA TEKSCAN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual do Maranhão, como req-  
uisito necessário para a obtenção do Grau de  
Bacharel em Engenharia da Computação com  
ênfase em Automação e Controle.

São Luís

2017

Silva, Wesley Beserra.

Especificações de projeto para o sensor A201-100 da Tekscan / Wesley Beserra Silva. – São Luís, 2017.

57 folhas.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Denner Robert Rodrigues Guilhon.

1. Força. 2. Equivalência. 3. Medição Piezoresistivo. 4. Aquisição.  
I. Título.

CDU 004:621.38

**WESLEY BESERRA SILVA**

**ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA O SENSOR  
A201-100 DA TEKSCAN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual do Maranhão, como requisito necessário para a obtenção do Grau de Bacharelado em Engenharia da Computação com ênfase em Automação e Controle.

Trabalho aprovado. São Luís, 26 de junho de 2017:

---

**Msc. Denner Robert Rodrigues  
Guilhon**  
Orientador

---

**PhD. Mauro Sergio Silva Pinto**  
Primeiro Membro da Banca

---

**PhD. Lúcio Flávio de Albuquerque  
Campos**  
Segundo Membro da Banca

*Dedico ao Deus desconhecido. Atos 17*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a quem me deu esta oportunidade, pois sem Ele nada do que é, seria.

Agradeço em seguida a minha família, base de toda a minha vida terrena, que me apoia e me sustenta de tantas formas que nem mesmo eu as vezes percebo. A saber, são esses: dona Eva, minha mãe; seu Eli, meu pai; Wendelly e Wallacy, meus irmãos mais novos. Estes são meu lar, para onde posso voltar quando precisar.

Ademais, agradeço a todos os meus amigos e colegas que, direta ou indiretamente, me ajudaram nessa caminhada, seja com alguma palavra de reconforto, alguma dica técnica ou por orações, que apesar de simples, são eficazes. Agradeço a todos, muito obrigado.

*"Não importa o que a vida fez com a gente. Importa o que fazemos daquilo que a vida fez  
com a gente"*  
*(Jean Paul Sartre)*

## RESUMO

Com o avanço tecnológico, uma das coisas que se tornaram fundamentais para a continuidade desse avanço, foi a especialização dos elementos que capturam informações do meio físico e as convertem em dados que podem ser tratados no meio digital. Conhecidos como sensores, estes elementos exercem funções auxiliares em sistemas de várias áreas, como a industrial, científica, médica, militar e muitas outras. Dentre estes sensores, o que será tratado aqui, tem como função medir as forças que serão aplicadas sobre sua área para fornecer tais informações ao sistema que ele auxilia. Entretanto, para que haja leitura próxima ao valor real aplicado, são necessárias técnicas que possam garantir essa equivalência. Caso contrário, o resultado será diferente do esperado e isto poderá causar danos, que podem ser irreparáveis e/ou custosos. Tendo por base este cenário, o presente trabalho aborda uma configuração para sistemas de medição que utilizam sensor piezoresistivo A201 da Tekscan<sup>®</sup> a fim de demonstrar resultados satisfatórios e seguros para a aquisição de valores de força aplicada

**Palavras-chave:** Força. Equivalência. Medição. Piezoresistivo. Aquisição.

## **ABSTRACT**

*With the technological advance, one of the things that became fundamental for the continuity of this advance, was the specialization of the elements that capture information of the physical medium and turn them into data that can be treated in the digital medium. Known as sensors, these elements exert auxiliary functions in systems of various areas, such as industrial, scientific, medical, military and many others. Among these sensors, what will be treated here, is to measure the forces that will be applied to your area to provide such information to the system it supports. However, in order to have a reading close to the actual value applied, techniques are necessary to guarantee this equivalence. Otherwise, the result will be different than expected and this may cause damage, which may be irreparable and / or costly. Based on this scenario, the present work addresses a configuration for measurement systems using Tekscan<sup>®</sup>'s A201 piezoresistive sensor in order to demonstrate satisfactory and safe results for the acquisition of values of applied force.*

**Keywords:** Strength. Equivalence. Measurement. Piezoresistive. Acquisition.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – a) saída de um sensor digital. b) saída de um sensor analógico . . . . .	18
Figura 2 – Sistema que representa um sensor. . . . .	19
Figura 3 – a) sinal linear. b) sinal não linear. . . . .	22
Figura 4 – Gráfico que plota a saída de um sensor piezoresistivo de silício tipo N. . .	25
Figura 5 – Diferenças entre tensão, compressão e cisalhamento. . . . .	27
Figura 6 – Resposta de um sensor piezoresistivo com a variação do seu coeficiente de elasticidade. . . . .	28
Figura 7 – Estrutura ilustrativa de um strain gauge do tipo folha metálica. . . . .	28
Figura 8 – Gráfico de resistência e força. . . . .	29
Figura 9 – Sensor FlexiForce A201-100. . . . .	29
Figura 10 – Exemplo de circuito que auxilia o sensor A201-100. . . . .	30
Figura 11 – Esquema de sistema com multiplexador. . . . .	33
Figura 12 – Esquema de filtro antialiasing. . . . .	34
Figura 13 – Exemplo de linearização de sinal não linear. . . . .	35
Figura 14 – Exemplo de amostragem e quantização aliada a codificação. . . . .	36
Figura 15 – Tabela de cores para resistores. . . . .	38
Figura 16 – Esquema de um resistor e sua ilustração . . . . .	39
Figura 17 – Gráfico de carga e descarga de um capacitor. . . . .	41
Figura 18 – Exemplo de regulador de tensão de 8V. . . . .	41
Figura 19 – Amplificador operacional inversor integrador. . . . .	42
Figura 20 – Arduino Mega 2560. . . . .	45
Figura 21 – IDE do arduino. . . . .	46
Figura 22 – Sistema de aquisição. . . . .	47
Figura 23 – Alguns componentes do sistema de aquisição. . . . .	48
Figura 24 – Circuito de amplificação com fonte dupla. . . . .	48
Figura 25 – Circuito montado de duas fontes. . . . .	49
Figura 26 – Gráfico de calibragem. . . . .	51
Figura 27 – Saídas do sensor dadas pela variação da tensão de entrada. . . . .	52
Figura 28 – Saídas do sensor dadas pela variação do resistor de feedback. . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do arduino . . . . .	45
Tabela 2 – Lista de componentes para o sistema de aquisição. . . . .	49
Tabela 3 – Lista de componentes para o sistema de aquisição. . . . .	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analogic to Digital Conversor</i> (Conversor Analógico-Digital)
CI	<i>Circuit Integrated</i> (Circuito Integrado)
DAC	<i>Digital to Analogic Conversor</i> (Conversor Digital-Analógico)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória Eletricamente Apagável e Programável para somente Leitura)
IDE	<i>Integrated Development Enviroment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
LED	<i>Light Emissor Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> (Sistemas Microeletromecânicos)
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória Estática de Acesso Randômico)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	15
2	OBJETIVOS . . . . .	16
2.1	Objetivo Geral . . . . .	16
2.2	Objetivos Específicos . . . . .	16
3	JUSTIFICATIVA . . . . .	17
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	18
4.1	Sensores . . . . .	18
4.1.1	Morfologia do sensor . . . . .	18
4.1.2	Características importantes de um sensor . . . . .	20
4.1.2.1	Sensibilidade . . . . .	20
4.1.2.2	Exatidão . . . . .	20
4.1.2.3	Precisão . . . . .	21
4.1.2.4	Linearidade . . . . .	21
4.1.2.5	Alcance . . . . .	22
4.1.2.6	Velocidade de Resposta . . . . .	23
4.1.2.7	Ganho e Resolução . . . . .	23
4.1.2.8	Histerese . . . . .	23
4.1.3	Sensor Piezoresistivo . . . . .	24
4.1.3.1	Piezoresistividade . . . . .	24
4.1.3.2	O sensor . . . . .	24
4.1.4	Sensor Flexiforce A201-100 . . . . .	29
4.1.4.1	Considerações sobre o Sensor Piezoresistivo . . . . .	31
4.1.4.1.1	Carga do Sensor . . . . .	31
4.1.4.1.2	Saturação . . . . .	31
4.1.4.2	Condicionamento e Calibragem . . . . .	32
4.1.4.2.1	Amplificação . . . . .	32
4.1.4.2.2	Rigidez Dielétrica . . . . .	33
4.1.4.2.3	Multiplexagem . . . . .	33
4.1.4.2.4	Filtragem . . . . .	33
4.1.4.2.5	Linearização . . . . .	34
4.1.4.2.6	Conversão entre Analógico e Digital . . . . .	34
4.1.4.2.7	Calibragem . . . . .	36
4.2	Circuitos . . . . .	37

4.2.1	Resistores . . . . .	37
4.2.1.1	Resistor Fixo . . . . .	38
4.2.1.2	Resistor Variável . . . . .	39
4.2.2	Capacitor . . . . .	39
4.2.3	Regulador de Tensão . . . . .	40
4.2.4	Amplificadores Operacionais . . . . .	42
4.2.4.1	Amplificador Operacional Inversor Integral . . . . .	42
4.2.5	Arduino . . . . .	43
4.2.5.1	Arduino Mega 2560 . . . . .	44
5	METODOLOGIA . . . . .	47
5.1	Sistema de Aquisição de Dados . . . . .	47
5.2	Condicionamento e Calibração . . . . .	48
6	RESULTADOS OBTIDOS . . . . .	52
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	54
	REFERÊNCIAS . . . . .	55
	ANEXO A – DATASHEET DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL . . . . .	57

## 1 INTRODUÇÃO

Como quase tudo na tecnologia, sensores também se baseiam no que já existe na natureza. Nós, seres humanos, temos diversos tipos sensores biológicos para temperatura, força, pressão, sensor sônico, entre outros. Tais mecanismos foram desenvolvidos para reagir e interagir com o meio que nos cerca. Mas, como o corpo humano não pode avaliar com precisão o valor de uma grandeza, como a eletromagnética, sentiu-se a necessidade de desenvolver ferramentas que fossem capazes, pois a evolução tecnológica em todas as áreas do desenvolvimento humano necessitava disso. Desde as primeiras balanças, que faziam comparações de pesos fixos com pesos que deveriam ser medidos, até sistemas que podem dizer quantos planetas e seus respectivos tamanhos existem a anos-luz de distância, todas estas ferramentas entraram na área de estudo que se designa de metrologia, o estudo das medidas (SENAI, 2000).

O sensor abordado neste trabalho tem por característica ser sensível à aplicação de força e, por conta disso, ele tem diversas utilidades, como: medir pressão, estresse em materiais, elasticidade, deformação, vibrações e força-peso. Mas, como qualquer outro dispositivo eletrônico, é necessário que conheçamos suas características de operação, seus limites, o ambiente em que pode ser usado e suas restrições, para que assim seja possível sua utilização de forma correta. A Tekscan<sup>®</sup>, empresa responsável pela fabricação e venda dos sensores, concede ao usuário de seus produtos, materiais de apoio para que o mesmo possa operar de forma que utilize a totalidade dos benefícios que os produtos dispõem. Apesar de serem caros, a nível de exportação, pois não possuem representantes, atualmente, no Brasil, mas oferecem ótimas soluções para as mais diversas aplicações requisitadas para este tipo de sensor, tornando-o atrativo aos usuários que tem como adquirir tais ferramentas.

O presente documento se atentará às questões que delineiam a aquisição de sinais através do sensor Flexiforce A201-100 e fará isto através da descrição dos procedimentos necessários para seu uso, como a abordagem dos elementos que compõem o sistema de aquisição, as tarefas de condicionamento e de calibração do sensor, e a exposição dos resultados para que se faça a comparação com os resultados desejados que são fornecidos em manuais através dos websites da Tekscan como já fora supracitado.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver um estudo sobre o sensor piezoresistivo A201-100, suas características e um teste operacional de aquisição de dados após o correto tratamento do sinal adquirido, criando assim um material que sirva de referência para projetos futuros que utilizem o sensor A201-100 como ferramenta de pesquisa.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Levantar o estado da arte de sistemas de aquisição de sinais, desde os elementos que o compõe até o seu funcionamento;
2. Relacionar o estado da arte ao ensaio de aquisição de dados do sensor A201-100;
3. Aplicar a bibliografia estudada ao ensaio;
4. Demonstrar resultados.

### 3 JUSTIFICATIVA

A tendência da tecnologia é aproximar-se do ser humano e para isto se vale de várias técnicas. O sensor da Tekscan<sup>(*circledR*)</sup>, que será abordado neste documento, atualmente tem sido utilizado em vários tipos de aplicações, suas utilidades são infinitas. Dentre as aplicações, uma que tem crescido e ajudado diversas pessoas são os sensores que auxiliam diagnósticos médicos. Como o sensor Flexiforce A201-100 tem muita sensibilidade para pequenas variações de força/pressão e é capaz de medir grandezas dinâmicas e estáticas, ele se torna uma ferramenta eficiente para auxiliar os médicos em diversos problemas, como problemas de postura, de má formação congênita, ou seja, partes do corpo humano mal formadas desde o nascimento. entre outros. Por conta disso, descrever o sensor e seu bom uso ajuda a começar de forma mais segura futuros projetos diversos, inclusive aqueles que auxiliam diagnósticos médicos, que precisam de uma grande precisão para não prejudicar a vida do paciente pelas informações erradas do sensor.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo irá tratar da base teórica que ajudou a desenvolver este documento. Temas como sensores, sistemas de aquisição, condicionamento de sinais, teoria de circuitos e descrição do modulo de processamento de sinais serão abordados aqui.

### 4.1 SENSORES

#### 4.1.1 MORFOLOGIA DO SENSOR

Termo empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, corrente, aceleração, posição, etc (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Como dito acima, sensor é um dispositivo que sente uma grandeza especifica e cada um o faz de uma forma diferente, alguns sentem através da diferença de temperatura, outros pela diferença de tensão criada por algum fator externo, tais como força, mudança na configuração do material ou outro tipo qualquer de configuração.

Sensores são, em sua maioria, elementos analógicos, ou seja, fazem uma medição contínua e variante de tempo, mas também existem os sensores digitais que se diferenciam dos analógicos por apresentarem leituras pontuais, ou discretas, e invariantes no tempo. A Figura 1 representa a diferença entre a saída de um sensor analógico e um sensor digital.

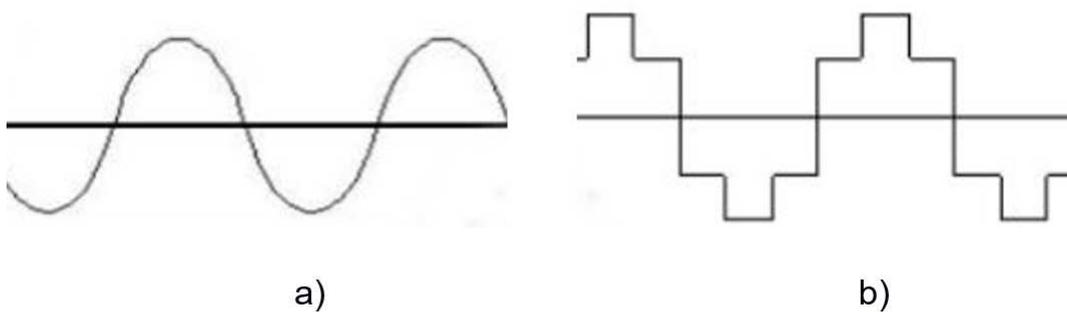


Figura 1 – a) saída de um sensor digital. b) saída de um sensor analógico

Fonte: Braga e Braga (2011)

Assim como todo sistema, forma pela qual os sensores podem ser tratados também, estes possuem um bloco de entrada, um de processamento e outro de saída, cada um destes possuindo características diversas. A figura 2 ilustra o que foi dito:



Figura 2 – Sistema que representa um sensor.

Fonte: Autor

A entrada de um sensor são as ações externas que imprimem alguma grandeza sobre a região de contato do sensor. É importante ressaltar que existem especificações que tem que ser obedecidas para que a entrada do sensor opere da maneira desejada, pois cada sensor é projetado para um conjunto de pré-requisitos bem determinados. Entre as principais especificações de entradas de um sensor, pode-se ressaltar:

- *Tipo de grandeza que pode ser lida:* cada sensor pode sentir, no máximo, um tipo de grandeza, então é importante que o sistema seja modelado para utilizar o sensor da maneira correta, ou seja, com o tipo de grandeza que ele consegue ler;
- *Intervalo de leitura:* sensores operam em intervalos de máxima e mínima leitura bem definidos, portanto verificar se o sensor consegue ler o valor desejado, é vital para o projeto;
- *Intervalo de alimentação:* sensores, em alguns casos, têm que ser alimentados por uma fonte externa e seu funcionamento correto depende também desse fator.

A planta do sensor é, literalmente, seu corpo, então esta parte é a responsável por sentir, de fato, a grandeza aplicada. Quase todos os sensores nessa etapa também convertem a grandeza sentida em outro tipo de grandeza, a fim de que a visualização seja facilitada ao usuário do sensor. Nestes casos, os sensores são chamados de transdutores, ou seja, elementos que traduzem uma grandeza em outra.

Finalmente, a saída do sensor é a informação que ele gera da grandeza captada. Assim como na entrada, a saída também possui requisitos semelhantes, tais como o tipo de grandeza gerada, o intervalo de valores de saída e se é uma saída digital ou analógica. É necessário frisar que sensores raramente trabalham sozinhos, eles geralmente são tratados como acessórios ou interfaces de entrada e auxiliam um dispositivo maior e bem mais complexo, principalmente alimentando-o ou ativando condições que chaveiam um processo qualquer.

### 4.1.2 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UM SENSOR

Quando se projeta um sistema, o sensor a ser escolhido é um ponto crucial a ser definido, pois este levará ao sucesso ou erro de um projeto. É necessário que o sensor seja muito bem avaliado segundo aquilo que se propõe a fazer. A seguir, estão listadas algumas características importantes ao se escolher um sensor.

#### 4.1.2.1 SENSIBILIDADE

Sensibilidade é a razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado sensor ou transdutor (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Esta razão indica a relação entre a entrada e saída. Se a saída de um sensor é muito maior do que sua entrada, isso quer dizer que o sensor é/está muito sensível, caso contrário, o sensor terá pouca sensibilidade. Ela é dada pela seguinte fórmula:

$$\text{sensibilidade} = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}}, \quad \text{para sinais analógicos} \quad (4.1)$$

$$\text{sensibilidade} = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}}, \quad \text{para sinais digitais} \quad (4.2)$$

A sensibilidade é um fator importante no projeto, pois uma saída que difere muito da entrada nos informa que o sensor pode estar captando mais coisas do que o desejado e isso gerará um erro na saída do sinal, fazendo com que esta saída tenha a necessidade de ser corrigida de alguma forma. Na maioria dos casos, a sensibilidade é corrigida de forma externa ao sensor, através de circuitos condicionadores (que pode ser visto na figura 10), pois a sensibilidade, nestes casos, é uma característica de fábrica, ou seja, é uma característica que foi implementada na sua produção, a um nível em que o ajuste interno se torna inviável ou impossível.

#### 4.1.2.2 EXATIDÃO

Consiste no erro da medida realizada por um transdutor em relação a um medidor padrão. Segundo o vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, exatidão é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Esta característica também é algo nato do sensor, alguns são mais exatos e outros menos e isso influencia diretamente no preço de aquisição do mesmo. Contudo a exatidão, assim como a sensibilidade, pode ser ajustada externamente através de técnicas de condicionamento do sinal.

A exatidão é mais uma das características importantes em um projeto, pois, sem ela, não há confiabilidade nos resultados daquele sistema, e, sem confiabilidade, um projeto não

pode ser acreditado e por isso é facilmente descartado. Portanto, é de suma importância que haja a garantia de que a exatidão do sistema seja a maior possível.

### 4.1.2.3 PRECISÃO

É a característica relativa ao grau de repetibilidade do valor medido por um transdutor. Existem autores e fabricantes que se referem a essa característica como sendo o erro relativo máximo que o dispositivo pode apresentar (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Repetibilidade é a medida da capacidade de um instrumento repetir a mesma saída (medida) para um dado valor, quando a mesma entrada é aplicada várias vezes (BRAGA; BRAGA, 2011). Ela é dada por:

$$\text{repetibilidade} = \frac{(\text{max} - \text{min}) \times 100}{\text{fundo da escala}} \quad (4.3)$$

Onde o termo “max” se refere ao valor máximo medido durante a etapa de teste ou calibração, o termo “min” é o valor mínimo medido durante a mesma etapa e, por fim, o termo “fundo da escala” é o máximo valor que o instrumento, no caso, o sensor, pode medir sem cortar o sinal.

É deveras importante que um sensor tenha a garantia de repetir os mesmos resultados para as mesmas entradas, pois isso também gera confiabilidade no projeto. Apesar disso, a maioria dos sensores comerciais vem com uma taxa de erro que pode variar de acordo com o tipo de grandeza medida. Isso quer dizer que o sensor garante repetir os resultados dentro de um intervalo de erro informado. Por exemplo, um sensor x que possui um fundo de escala de 100 unidades, um erro de repetibilidade de 2% e um valor de saída de 56 unidades irá variar entre 54 a 58 unidades na sua saída. Esse erro de repetibilidade deve ser levado em consideração de acordo com as proporções do projeto. Por exemplo, caso os valores de saída do projeto sejam muito próximos e tenham que ser rígidos, o ideal será adquirir um sensor com grande exatidão, caso contrário, um de menor exatidão já será suficiente para suprir as necessidades de um projeto sem gerar grandes percas de informação ou informações errôneas.

### 4.1.2.4 LINEARIDADE

Esse conceito se aplica a sensores analógicos. É a curva obtida plotando os valores medidos por um transdutor sob teste contra os valores de um padrão. Se o comportamento do transdutor ou sensor for ideal, o gráfico obtido é representado por uma reta e do contrário não será representado por uma reta (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). A figura 3 representa isso.

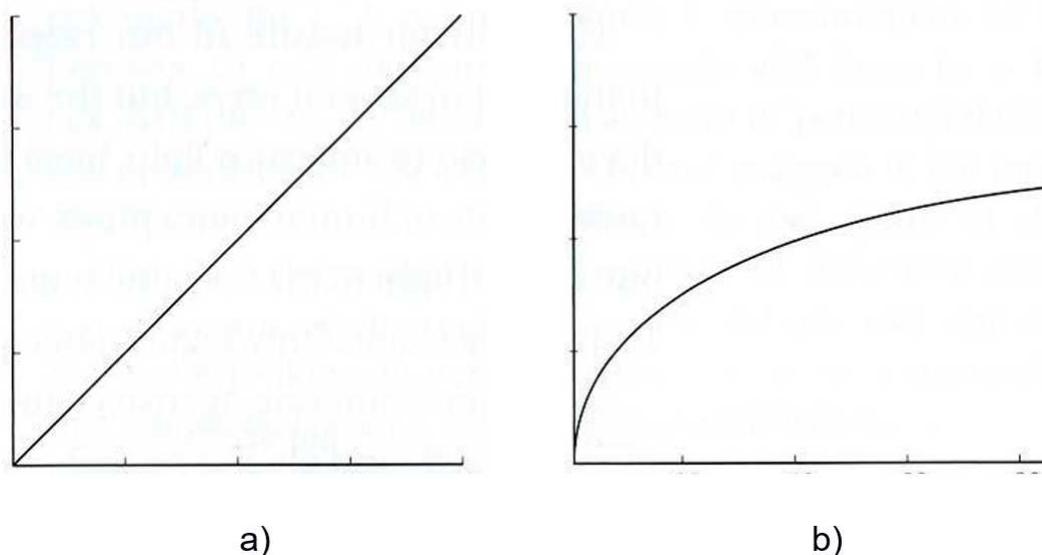


Figura 3 – a) sinal linear. b) sinal não linear.

Fonte: Braga e Braga (2011)

Onde o eixo da vertical (também chamado de eixo das ordenadas) representa os valores de saída do sensor e o eixo da horizontal (também conhecido como eixo das abcissas) indica os valores de grandeza a serem medidos.

Quando se fabrica um sensor, é documentado todas as suas respostas sob diversos tipos de condições. O ideal é que, sob as condições adequadas, condições estas que são informadas nos manuais disponíveis, o sensor tenha as mesmas respostas que foram documentadas pelo fabricante. Por isso, quanto mais linear a resposta do sensor, mais ela se aproxima dos valores documentados, quanto menos linear, mais distante das respostas documentadas. Para um bom projeto, o sensor deve ser o mais linear possível, a fim de que o mesmo também seja confiável.

#### 4.1.2.5 ALCANCE

Representa toda a faixa de valores de entrada de um transdutor (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). Portanto, representa o intervalo de valores possíveis para a leitura do sensor. Como já dito antes, esse parâmetro é primordial, pois caso o *range* real esteja fora do alcance de leitura do sensor, a faixa extra de *range* será cortada tanto para baixo quanto para cima, não aproveitando as características do sensor em seu máximo alcance. No caso contrário, quando o alcance do sensor é muito maior que o *range* real, é possível que o sensor não leia detalhes da entrada e assim o sensor seja subutilizado.

#### 4.1.2.6 VELOCIDADE DE RESPOSTA

Trata-se da velocidade com que a medida fornecida pelo sensor alcança o valor real do processo (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). Ou seja, o tempo que o sensor leva para sair do seu estado de repouso para convergir para o valor real.

Isto é muito importante, principalmente em cenários de tempo real, pois a ação dos atuadores depende exclusivamente da resposta dada pelos sensores e, caso o cenário seja de alto risco, velocidades de resposta muito baixas trazem danos ao cenário real, o que não é o desejado pelo usuário. É muito comum existir uma confusão entre velocidade de resposta e histerese, mas logo a frente isso será tratado.

#### 4.1.2.7 GANHO E RESOLUÇÃO

O ganho é a relação entre a variação na saída e a variação unitária na entrada (BRAGA; BRAGA, 2011). Em outras palavras, ganho é a quantidade de valores de saída que equivale a uma unidade de valor de entrada. Por exemplo: para um transmissor eletrônico de temperatura com uma faixa de entrada de 100° a 200° C e uma saída de 4 a 20 mA, o ganho é:

$$ganho = \frac{20 - 4}{200 - 100} = 0.16mA/^{\circ}C \quad (4.4)$$

Ou seja, existe um ganho de 0.16 miliamperes para cada 1°C . Este conceito é muito semelhante com o de resolução, mas é valido frisar que são conceitos diferentes, pois o ganho define a quantidade unitária que será acumulada ao passo que a entrada aumenta enquanto a resolução indica o valor mínimo de entrada do sensor que irá resultar em uma mudança na saída do mesmo (BRAGA; BRAGA, 2011), ou seja, o valor mínimo para que o sensor seja excitado. Então enquanto o ganho incrementa o valor de saída do sensor, a resolução não incrementa, tendo isto como a diferença básica entre esses dois conceitos.

#### 4.1.2.8 HISTERESE

A histerese é a tendência de um sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, ou ainda, é a capacidade de preservar uma deformação efetuada por um estímulo (BRAGA; BRAGA, 2011).

Geralmente este termo é mais simplificado, ou usado, como atraso, pois ele significa, de forma simples, o atraso que o sensor tem para mudar de estado, seja de um estado de repouso para um de operação ou o contrário ou até mesmo de estado de operação para um outro estado de operação qualquer.

A histerese se difere da velocidade de resposta justamente por que a segunda se encontra geralmente no produto final do sistema, enquanto a histerese são respostas de es-

tados intermediários que devem ser medidos em forma de intervalos e estão constantemente presentes enquanto o sistema está em operação.

### 4.1.3 SENSOR PIEZORESISTIVO

#### 4.1.3.1 PIEZORESISTIVIDADE

A palavra piezo é de origem grega, e significa "espremer". Isso é bastante apropriado, porque um sensor piezoresistor produz uma tensão quando é "espremido" por uma força proporcional à força aplicada (BARLIAN et al., 2009).

A resistência elétrica ( $R$ ) de uma estrutura homogênea é uma função de suas dimensões e resistividade ( $\rho$ ), dado pela seguinte formula:

$$R = \frac{\rho \times l}{a} \quad (4.5)$$

onde  $l$  é o comprimento e  $a$  é a média da área transversal do objeto (BARLIAN et al., 2009). Dito isso, pode-se afirmar que todo material tem sua resistência elétrica em função de suas dimensões e o coeficiente de resistividade. Estes coeficientes de resistividade estão diretamente atrelados à geometria atômica com que os átomos de determinado material se ligam e à mudança da sua banda de condução, fazendo com que o material se torne mais ou menos resistente à eletricidade e, conseqüentemente, se tornando mais ou menos condutor. Lorde Kelvin, em 1954, percebeu que alguns materiais, principalmente semicondutores e metais, tinham uma maior facilidade em relação a outros de mudar sua resistência elétrica mediante a uma deformação mecânica aplicada. A este comportamento, deu-se o nome de efeito piezoresistivo, que, diferente do efeito piezoelétrico, muda a resistividade elétrica do material e não o potencial elétrico do mesmo (BARLIAN et al., 2009).

É importante ressaltar que a piezoresistividade é altamente dependente da temperatura, nível de dopagem e tipo de material em semicondutores, principalmente os de silício, como pode ser visto na Figura 4:

A Figura 4 ilustra a saída de um piezoresistor de silício de tipo N num gráfico de força versus coeficiente piezoresistivo (fator constante que relaciona níveis de portadores de carga, mobilidade e pureza do material), onde  $N$  é a concentração de dopantes e  $T$  é a temperatura numa faixa que varia de  $-75^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.1.3.2 O SENSOR

Os sensores piezoresistivos (também chamados de strain gauges, extensômetros ou sensores de deformação) estão entre os primeiros dispositivos de silício micromecanizados. A necessidade de sensores menores, menos dispendiosos e de alto desempenho ajudou a

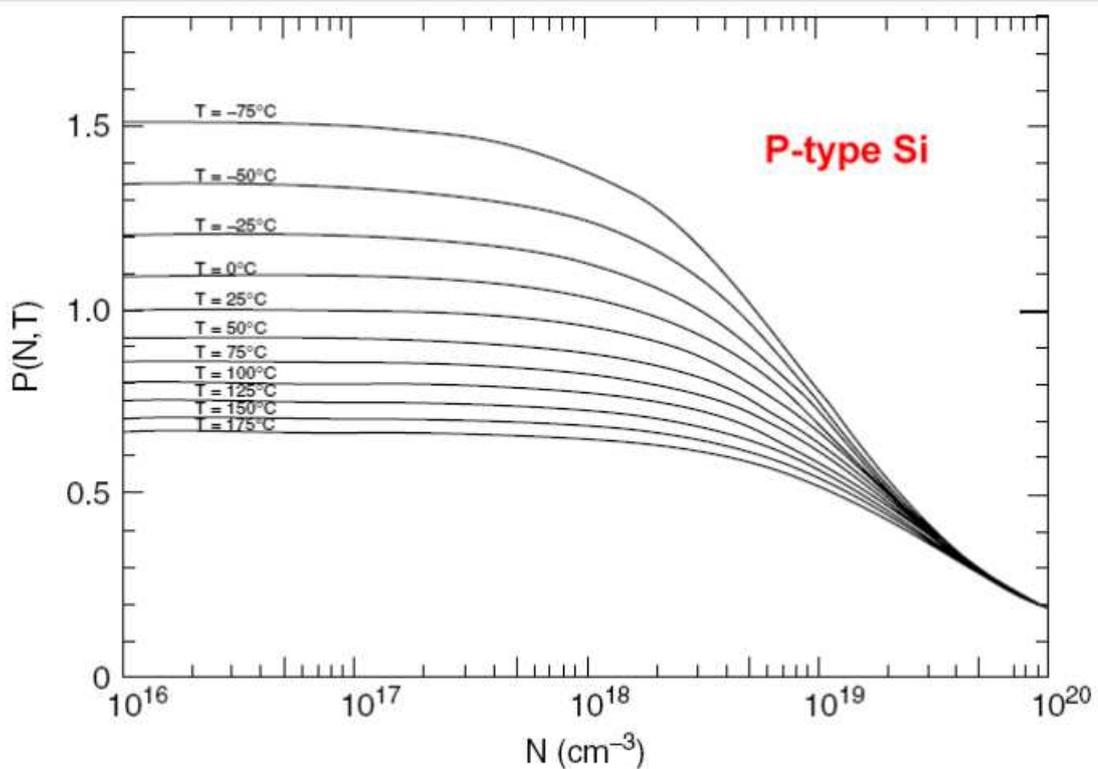


Figura 4 – Gráfico que plota a saída de um sensor piezoresistivo de silício tipo N.

Fonte: Barlian et al. (2009)

impulsionar a tecnologia de micromecanização precoce, um precursor de microssistemas ou sistemas microelectromecânicos (MEMS) (BARLIAN et al., 2009).

Sensores piezoresistivos tem uma vasta gama de aplicações, que vão desde a construção de microfones e detectores de aceleração, como é o caso dos airbag dos automóveis e dos sensores de fluxo em condutas de líquidos ou gases até sensores de pressão, estresse e deformação. É importante ressaltar a diferença entre esses tipos de grandezas e como elas atuam no nosso mundo, pois cada uma deve ser manipulada para a aplicação correta, trazendo, dessa forma, os resultados esperados (BARLIAN et al., 2009).

Uma das grandezas que consegue ser lida é a força, mas é importante frisar a diferença entre força, massa, peso e gravidade, pois são termos facilmente confundidos pelas pessoas e até mesmo por algumas literaturas. Em termos simples, força é uma ação que faz um corpo se deslocar; gravidade é a força exercida pelo centro de um corpo (por exemplo, o planeta terra) que atrai outros corpos para si; peso é a combinação da massa com a ação da gravidade, naquele instante, sobre si; e massa é uma quantidade de matéria medido por grama que não varia mediante a gravidade.

Outra grandeza é a aceleração. A aceleração pode ser medida pelo conjunto da

aplicação de uma força sobre uma massa, através da seguinte fórmula:

$$Força = \frac{massa}{aceleração} \quad (4.6)$$

$$Aceleração = \frac{força}{massa} \quad (4.7)$$

Então extensômetros são capazes de lidar com essas duas grandezas e informar a aceleração de um corpo. Daí, utiliza-se dessa característica para se fabricar acelerômetros, que são sensores que medem a aceleração. Atualmente, estes sensores são largamente usados em diversos eletrônicos, entre um dos mais usados, podemos citar os smartphones, robôs, automóveis, drones e diversos outros.

Pressão também pode ser medida por esses sensores, pois ela pode ser definida como uma função de força através da formula 4.7. Então quando se aplica uma força somente dentro da área sensível do strain gauge, este consegue medir a pressão a ele aplicado.

$$Pressão = \frac{força}{área} \quad (4.8)$$

Outros conceitos a serem diferenciados são os de estresse e deformação. Enquanto o estresse são os pares de forças que agem internamente em um corpo que está sofrendo aplicação de força, deformação é a mudança no comprimento de um corpo através da aplicação de uma força. O estresse e a deformação são causados por forças classificadas como: compressão, tensão e cisalhamento. A compressão encurta o comprimento de um corpo através da aplicação de forças em direção ao seu interior. A tensão é o aumento do comprimento do corpo através da aplicação de forças que são direcionadas para o exterior do corpo. Já no cisalhamento, o corpo é submetido a forças iguais, mas em sentidos opostos em sua superfície. Todas essas forças agem no corpo enquanto o limite elástico do material não é alcançado, caso contrário, o corpo pode sofrer danos irreversíveis por não conseguir mais voltar ao seu estado original (TEKSCAN, 2012). A figura 5 ilustra as diferenças entre tensão, compressão e cisalhamento.

A parte mais à esquerda da figura 5 representa a tensão, onde nota-se que o tamanho original aumentou, momentaneamente, durante a aplicação da força; a parte central da figura representa a compressão, nela, pode se ver que o corpo sofreu uma diminuição, momentânea, do seu comprimento mediante a força aplicada; e na parte mais à direita da figura vemos o cisalhamento que demonstra a mudança na forma do corpo através da aplicação da força em sentidos opostos nas superfícies opostas do material.

É importante destacar que não só o limite elástico do corpo deve ser observado como o do sensor também, pois, caso o mesmo esteja anexado ao corpo a ser medido e este,

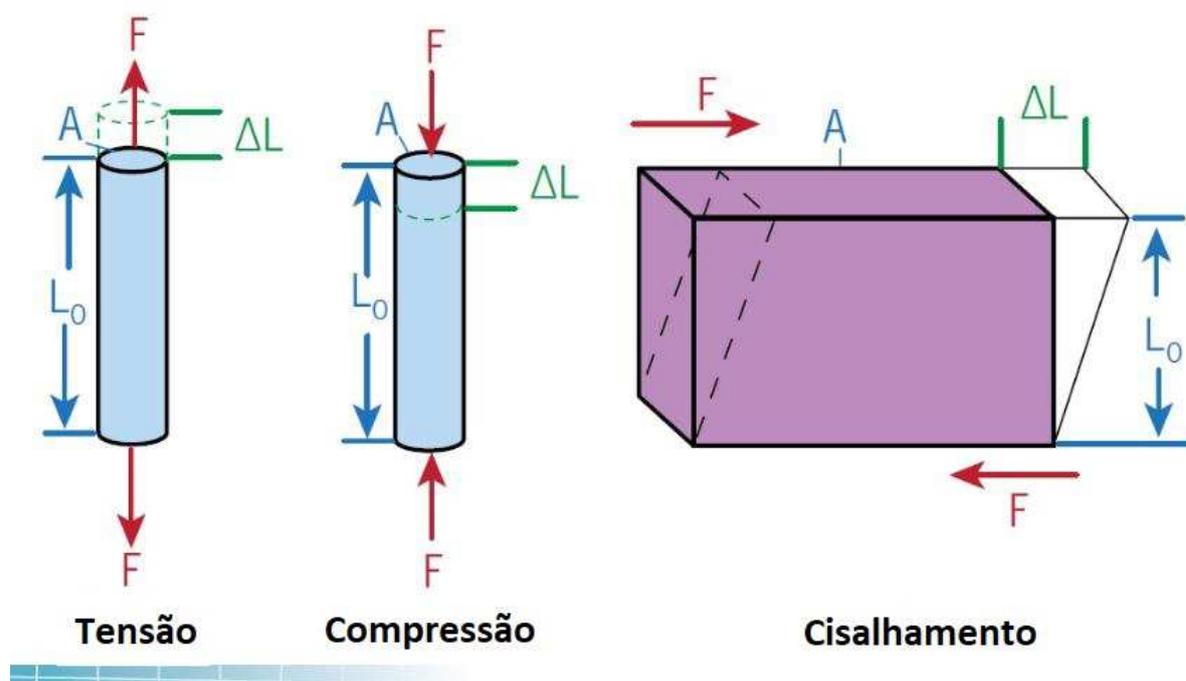


Figura 5 – Diferenças entre tensão, compressão e cisalhamento.

Fonte: Tekscan (2012)

por ventura, vier a ser muito deformado, chegando a atingir o limite elástico, tanto do próprio corpo como do sensor, a leitura do sensor ficará comprometida e talvez o mesmo se torne até inoperante para medições futuras. Ainda se deve grifar que a leitura errônea do sensor após ultrapassar seu limite elástico se deve ao fato de que sua resposta passa a ser não linear e isso causa a dificuldade na sua leitura, como mostra a figura 6.

Na Figura 6, um gráfico que relaciona a força com a variação do comprimento do sensor, a linha vermelha representa a região elástica, ou seja, a região onde o coeficiente de elasticidade do sensor pode variar sem causar danos irreversíveis ao material e erros na leitura; a parte da linha que tem cor azul representa a região plástica, região onde pode haver mudanças irreversíveis na forma do material, nesta região é importante observar que existe um ponto verde que representa o limite elástico, onde, a partir dele, as mudanças na forma do objeto são irreversíveis e antes dele ainda podem ser reversíveis; finalmente o gráfico termina no ponto de cor roxa que representa a condição para que haja a ruptura do material.

Alguns outros sensores são fabricados usando os elementos piezoresistivos anexados a um elemento elástico, como células de carga que utilizam o sensor em combinação com outros circuitos de controle como a ponte de Wheatstone. Existem muitas formas de se confeccionar um sensor de força que utilize a piezoresistividade, mas, em resumo, sensores que usam da piezoresistividade de um material o fazem ligando ele a um elemento condutor,



Figura 6 – Resposta de um sensor piezoresistivo com a variação do seu coeficiente de elasticidade.

Fonte: Tekscan (2012)

colocando-o sobre um substrato elástico e o cobrem com alguma fina camada isolante e protetora, deixando apenas terminais para o lado externo que possibilitaram captar a variação de resistência do material piezoresistivo. A figura 7 ilustra isso:

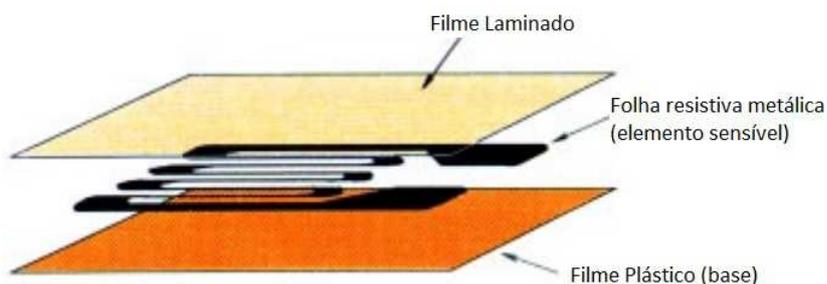


Figura 7 – Estrutura ilustrativa de um strain gauge do tipo folha metálica.

Fonte: CO. (2014)

Como a saída do extensômetro é a variação da resistência mediante à força aplicada, então a saída será composta por eixos de resistência e força representando a variação da resistência e também a condutância (que é o inverso da resistência). A figura 8 representa o que foi dito acima.

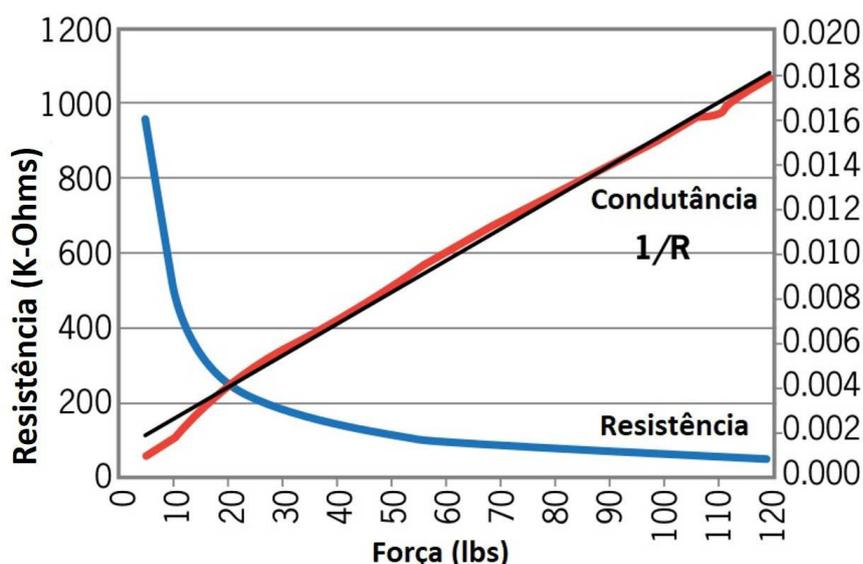


Figura 8 – Gráfico de resistência e força.

Fonte: Tekscan (2012)

Em que a linha azul representa a resistência, a vermelha a condutância e a preta representa a resposta linear do sensor para um sensor de 4448 Newtons.

#### 4.1.4 SENSOR FLEXIFORCE A201-100

Esta subseção terá por base o manual disponibilizado pela Tekscan<sup>®</sup> que trata de todas as informações fundamentais para que o usuário possa iniciar seu trabalho com o sensor produzido por esta empresa, a fim de garantir os melhores resultados (TEKSCAN, 2012).

O sensor A201-100 é um sensor piezoresistivo de circuito impresso ultrafino e flexível que pode ser facilmente integrado à maioria das aplicações. Por ser fino, flexível, resistente e ter a capacidade de medir forças, ele é ideal para locais pequenos que requerem medições não invasivas (TEKSCAN, 2010a). Abaixo, a figura 9 mostra esse sensor:

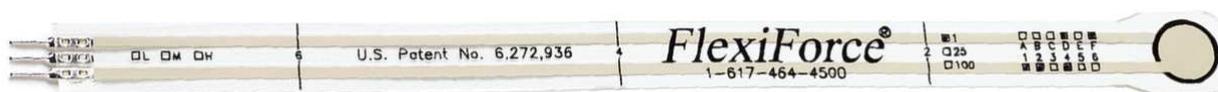


Figura 9 – Sensor FlexiForce A201-100.

Fonte: Tekscan (2010a)

A área sensível, região que realiza leitura, se localiza na ponta direita da figura. Este sensor é construído em um substrato de duas camadas. Esse substrato é composto de um filme de poliéster. Em cada camada, o material condutor (a prata) é aplicado, seguido

por uma camada de tinta sensível a pressão. Então um adesivo é usado para laminar as duas camadas ao substrato para formar o sensor. O círculo de prata em cima da tinta sensível a pressão indica a área ativa sensível que se estende até os conectores, no final do outro lado do sensor, formando uma espécie de cabo de condução isolado. No fim, o sensor termina com três pinos machos quadrados soldáveis para serem incorporados ao circuito (TEKSCAN, 2010a).

O comprimento do sensor é de 15 centímetros, mas este pode aumentado com extensões vendidas pela própria empresa que fabrica este sensor, a Tekscan®. Por ser um sensor piezoresistivo, ele atua com a variação da resistência em um circuito elétrico, quando o sensor está sem carga alguma, sua resistência é maior que 5 MΩ e diminui inversamente em relação à força aplicada. Ele deve operar numa ampla faixa de temperatura que varia entre -9°C a 74°C e numa faixa de força entre 0 e 445 N. Para forças entre 445 N e 4448 N é necessário que se aplique uma baixa voltagem e reduza a resistência do resistor de feedback para 1 KΩ, no mínimo, como pode ser visto na figura 10.

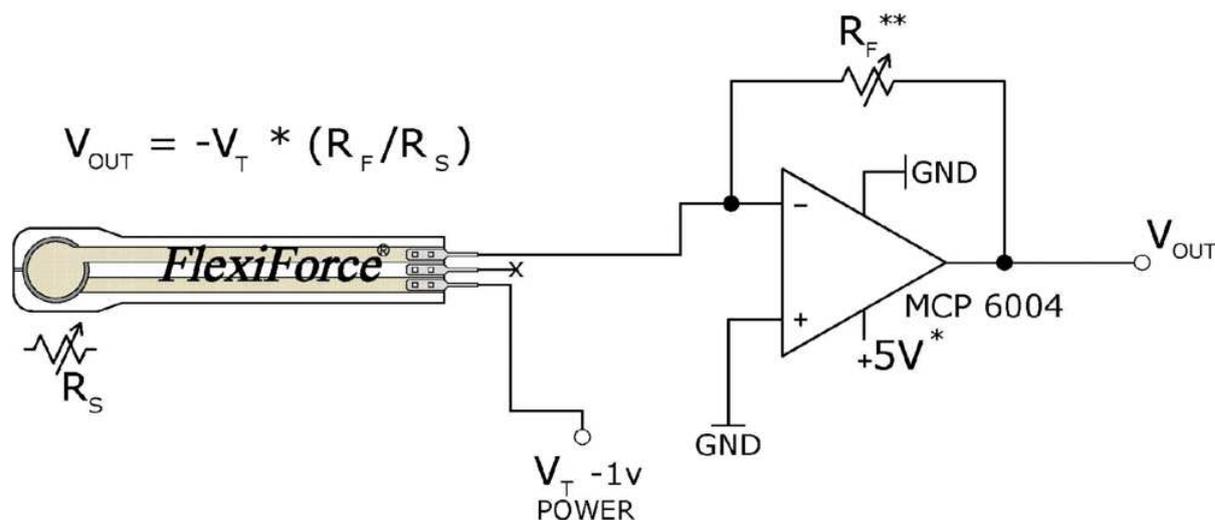


Figura 10 – Exemplo de circuito que auxilia o sensor A201-100.

Fonte: Tekscan (2010a)

No exemplo mostrado na figura 10, o circuito é alimentado por uma tensão de excitação de -5 V CC. Este circuito usa uma disposição de amplificador operacional inversor para produzir uma saída analógica com base na resistência do sensor e uma resistência de referência fixa (R<sub>F</sub>). Um conversor analógico-digital pode ser usado para mudar essa tensão para uma saída digital. Neste circuito, a sensibilidade do sensor pode ser ajustada alterando a resistência de referência (R<sub>F</sub>) e/ou a tensão de transmissão (V<sub>T</sub>); uma menor resistência de referência e/ou tensão de transmissão tornará o sensor menos sensível e aumentará seu *range* de força ativa. O *range* da força dinâmica do sensor pode ser ajustado alterando o resistor de referência (R<sub>F</sub>) ou alterando a Voltagem do inversor (V<sub>O</sub>).

#### 4.1.4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SENSOR PIEZORESISTIVO

##### 4.1.4.1.1 Carga do Sensor

A área sensível do sensor é toda tratada como se fosse um único ponto de contato. Por essa razão, a carga/força aplicada deve ser distribuída uniformemente através da área sensível para garantir a acurácia e repetibilidade das leituras de força. Caso não haja uniformidade, as leituras podem variar além do que é especificado pelo manual.

Caso a área da carga aplicada seja menor do que a área de detecção, a carga não deve ser colocada perto das bordas da área de detecção, para assegurar uma distribuição de carga uniforme. Também é importante frisar que a distribuição de carga não deve estar apoiada em outros pontos que estejam em níveis diferentes do sensor, pois isso tira a uniformidade da distribuição.

Já no caso contrário, ou seja, quando a carga é muito maior que a área sensível, pode se fazer necessário o uso de um disco com um tamanho aproximado ao da área sensível do sensor, mas, sem que as bordas do disco se apoiem nas bordas da área sensível do sensor.

O sensor FlexiForce lê forças que são perpendiculares ao plano do sensor. As aplicações que conferem forças de cisalhamento podem reduzir a vida útil do sensor. Se a aplicação colocar uma força de cisalhamento no sensor, ele deve ser protegido cobrindo-o com um material mais resiliente.

Se for necessário montar o sensor em uma superfície, é recomendável usar fita adesiva, quando possível. Os adesivos também podem ser usados, mas certifique-se de que o adesivo não degrade o material do substrato (poliéster) do sensor antes de usá-lo em uma aplicação. Os adesivos não devem ser aplicados na área de detecção; no entanto, se for necessário, assegure-se de que o adesivo seja espalhado uniformemente. Caso contrário, quaisquer pontos altos podem aparecer como carga no sensor.

##### 4.1.4.1.2 Saturação

A força de saturação é o ponto em que o dispositivo de saída não varia mais com a força aplicada (TEKSCAN, 2010a). Este parâmetro geralmente é dado na folha de especificações de cada dispositivo e deve ser seguido cuidadosamente para que evite leituras erradas ou até mesmo danos ou desgastes muito grandes. Essa saturação pode ser regulada usando um circuito condicionador, como o mostrado na figura 10, onde alterando a resistência de referência (RF) altera-se a sensibilidade do sensor, alterando assim, sua saturação também. O decremento na resistência de referencia faz o sistema menos sensível, aumentando o *range* de força ativa, ou seja, o limite do ponto de saturação. O contrário também é válido.

#### 4.1.4.2 CONDICIONAMENTO E CALIBRAGEM

Exercitar ou condicionar um sensor antes da calibração e teste é essencial para alcançar resultados acurados. Isso ajuda a diminuir os efeitos da histerese. O condicionamento é aconselhado para sensores que serão usados pela primeira vez e para sensores que não são usados há bastante tempo (TEKSCAN, 2010a).

Como dito anteriormente, os sinais do mundo real são do tipo analógico, mas as tecnologias que foram desenvolvidas nos últimos cem anos são, em sua maioria, digitais. Por isso, é necessário que haja sempre interfaces que convertam de forma segura as grandezas analógicas em digitais. Com base nisso, tem-se que condicionar um sinal é convertê-lo de forma adequada para interfaceá-la com outros elementos (CASSIOLATO, 2011). Entre os métodos principais de condicionamento de sinais, temos:

- Amplificação;
- Rigidez Dielétrica;
- Multiplexagem;
- Filtragem;
- Linearização.

##### 4.1.4.2.1 Amplificação

A maioria dos sensores disponíveis comercialmente trabalham com tensões de saída muito baixas e estas são muito difíceis de ler e diferenciá-las dos ruídos. Por conta disso, um dos passos comuns na aquisição de dados de um sensor é a amplificação do sinal de saída, de forma que o sinal de saída do sensor coincida ou se aproxime do sinal de entrada do dispositivo conversor afim de que o sinal seja melhor aproveitado por estar todo ou quase todo encaixado dentro do *range* de atuação do conversor A/D.

Mas é importante deixar claro que quando se amplifica um sinal, geralmente se amplifica também seu ruído em conjunto. Ruídos são as partes do sinal que não correspondem ao sinal de entrada, ou seja, todas as entradas extras de um sistema, como, por exemplo, vibrações num sistema que não está bem estabilizado ou interferências eletromagnéticas em um circuito eletrônico. Para evitar tais ruídos, existem diversas técnicas, desde o corte de determinada faixa de amplitude do sinal até os filtros que ignoram certas frequências. Geralmente estes filtros vem depois da amplificação, pois, como foi dito, retirar os ruídos de um sinal muito pequeno é bem difícil devido ao pequeno *range* que exige elementos mais sensíveis e por isso mais caros, em geral.

#### 4.1.4.2.2 Rigidez Dielétrica

Em todo circuito elétrico, duas das medidas que sempre devem ser observadas cuidadosamente são todas as tensões e correntes que chegam a todos os elementos que compõem o circuito, pois cada elemento trabalha com uma especificação e ultrapassar tais limites pode danificar os elementos, inclusive o sistema de condicionamento. Então é muito importante que o circuito seja corretamente modelado para todos os elementos que o compõem, isolando os elementos que precisam de proteção contra altas tensões ou correntes, sejam as diretas ou inversas.

#### 4.1.4.2.3 Multiplexagem

Sistemas de aquisição de sinais, por vezes, são bastante caros e, dependendo da aplicação, não se tem o número de canais de leitura necessário para o projeto. Por conta disso, uma técnica de condicionamento comum para estas ocasiões é a multiplexagem, pois um dispositivo que realize este tipo de condicionamento pode agrupar diversas entradas em um mesmo canal e troca o canal periodicamente. A figura 11 ilustra isso:

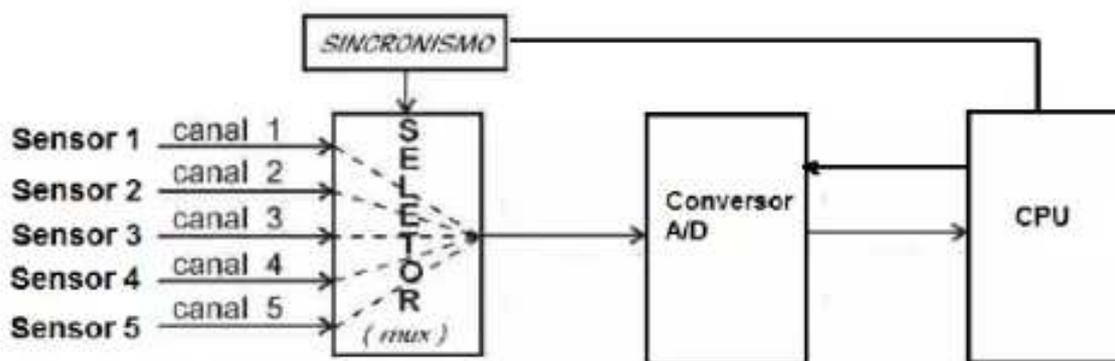


Figura 11 – Esquema de sistema com multiplexador.

Fonte: Cassiolato (2011)

Mas é importante frisar que, ao inserir um dispositivo multiplexador (ou até mesmo demultiplexador), é necessário ajustar o programa para diferenciar cada faixa de sinal, pois, caso se deixe sem uma configuração prévia, a unidade de processamento lerá todos os valores como se eles fossem uma única entrada e não várias, como é a proposta de um multiplexador.

#### 4.1.4.2.4 Filtragem

Como dito na subseção de amplificação, o propósito de um filtro é remover sinais indesejados do sinal que estamos medindo. Um filtro de ruídos é usado nos sinais AC,

como temperatura, para atenuar sinais de alta frequência que podem reduzir a precisão da medição. Existem vários filtros usados para manipular a frequência do sinal de entrada, tais como os filtros de passa baixa (cortam frequências abaixo de um limite determinado); os de passa alta (corta acima do limite); e os de passa banda (só deixa passar a frequência dentro de um intervalo determinado). Sinais analógicos, como os sinais de vibração, geralmente requerem um tipo diferente de filtro conhecido como filtro antialiasing. O filtro antialiasing é um filtro passa baixa que requer uma taxa de corte muito alta, e geralmente remove completamente todas as frequências do sinal que são maiores que a largura de banda de entrada do equipamento. Se esses sinais não forem removidos, eles irão aparecer erroneamente com os sinais da largura de banda de entrada do equipamento (CASSIOLATO, 2011), a figura 12 ilustra isso:

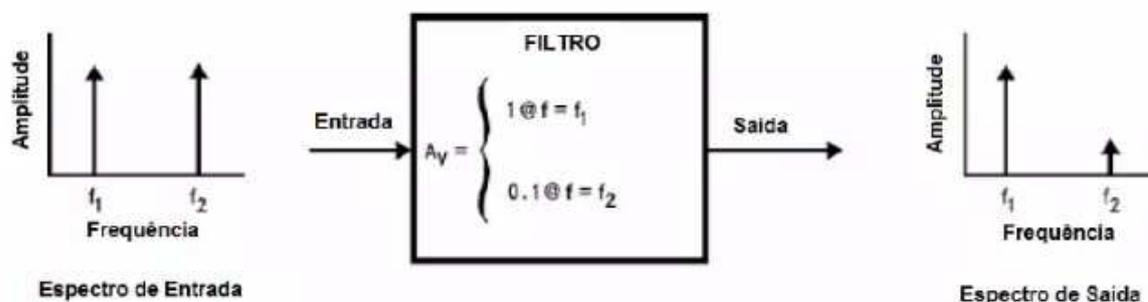


Figura 12 – Esquema de filtro antialiasing.

Fonte: Cassiolato (2011)

#### 4.1.4.2.5 Linearização

Como já fora dito, sinais não lineares são muito complexos para uma leitura no âmbito digital, por conta disso, circuitos podem dispor de elementos condicionadores que am este sinal, fazendo-o aproximar-se do original só que de forma linear, como no caso dos termopares, sensores de temperatura que naturalmente tem um sinal não linear. A figura 13 ilustra esse conceito:

#### 4.1.4.2.6 Conversão entre Analógico e Digital

Logo após o processo de condicionamento do sinal, este será convertido. Os dispositivos que fazem a transição entre o meio analógico e o digital, são conhecidos como conversores ADC (Analogic to Digital Conversor), enquanto os que fazem o processo contrário são chamados de DAC (Digital to Analogic Conversor) e são de fundamental importância para aquisição e processamento de sinais, pois, a partir de sua correta operação,

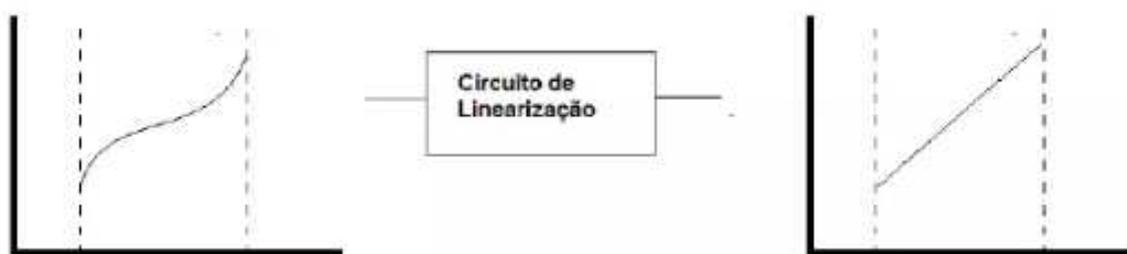


Figura 13 – Exemplo de linearização de sinal não linear.

Fonte: Cassiolato (2011)

podemos seguir com os próximos passos em sistemas que interagem fisicamente com o mundo real.

A maioria dos sensores e transdutores são do tipo analógico, pois convertem uma grandeza analógica em outra que também é analógica. Por conta disso, sensores analógicos precisam de conversores analógico-digitais. Atualmente, as placas de processamento de sinais já vêm embutidas com estes conversores supracitados.

Os conversores analógico-digitais, de forma simplificada, farão com que um sinal digital discreto se pareça com um sinal analógico que está sendo enviado pela entrada da placa de processamento num processo chamado de quantização. O conversor fará isso colocando o sinal dentro de um intervalo de níveis de sinal digital, portanto, se um conversor qualquer tiver um intervalo de 256 níveis, estes 256 serão distribuídos uniformemente entre o intervalo de tensão de trabalho da placa de processamento, então cada nível será correspondente a um nível de tensão fixa, assim, quantificando-o. Estes níveis são definidos pelo número de bits que a placa de processamento disponibiliza para fazer estas conversões, a fórmula que define isso é:

$$2^{\text{número de bits}} = \text{quantidade de níveis digitais} \quad (4.9)$$

Isso quer dizer que, no exemplo que foi citado no parágrafo anterior, a quantidade de bits utilizada pelo conversor é 8, pois,  $2^8 = 256$  níveis. Para que se haja uma boa conversão de sinal analógico para o digital, também é necessário que haja uma frequência de amostragem (também conhecida como taxa de amostragem) condizente com o sinal original, pois quanto mais fiel, melhores os resultados. Para contemplarmos o que foi supracitado, observemos a figura 14.

Observa-se na figura 14 que a parte superior se trata de um sinal puramente analógico, enquanto a parte inferior se trata de um sinal digital que foi convertido do sinal analógico da parte superior da figura. Segundo esta mesma figura, podemos observar também que se trata de um conversor de 8 bits, por apresentar 8 níveis de conversão e

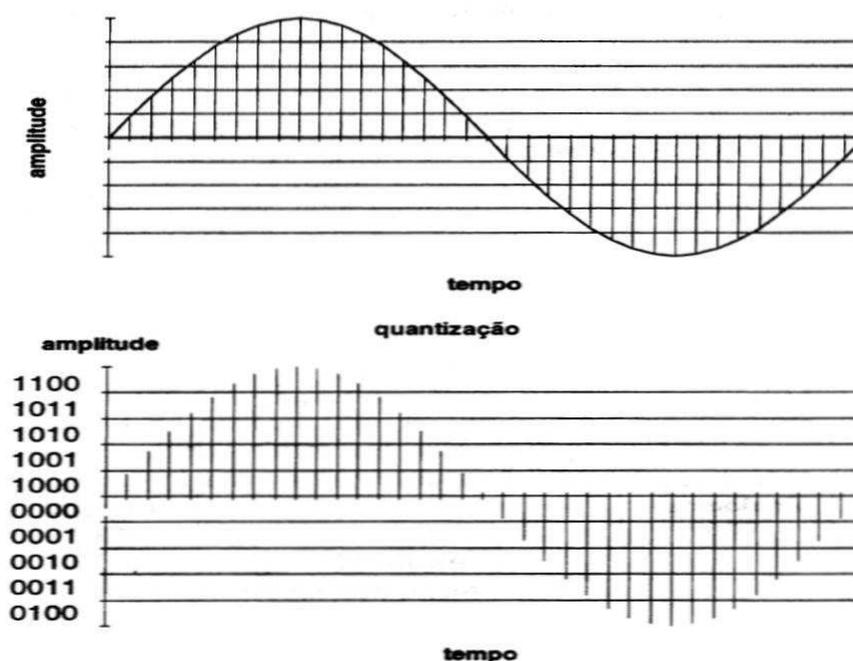


Figura 14 – Exemplo de amostragem e quantização aliada a codificação.

Fonte: Monteiro (2013)

podemos ver as amostras coletadas pelo conversor (as retas verticais que aparecem na parte inferior da figura). Agora que o sinal digital foi convertido numa sequência numérica de base binária, podemos fazer a relação entre voltagem e níveis discretos, através da equação:

$$\frac{\text{Maior Nivel Discreto}}{\text{Maior Valor de Tensão}} = \frac{\text{Valor de Leitura do Conversor}}{\text{Tensão Analógica Medida}} \quad (4.10)$$

É a partir dos valores adquiridos através dessa equação que podemos trabalhar no âmbito digital, fazendo com que o programa decida o que fazer com as entradas numéricas que ele receber, fazendo tomadas de decisão, paradas, ignorar certas etapas, entre outros.

#### 4.1.4.2.7 Calibragem

Calibração é o nome dado ao conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento (calibrador) ou sistema de medição e os valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, ou os correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (TEKSCAN, 2010a). Ou seja, é o ato de dar um calibre, uma unidade, aos valores medidos. Existem diversas formas de se fazer isso, mas a maioria delas envolve medições repetidas em torno de uma resposta dado pelo própria fabricante do instrumento a ser calibrado. Como já dito, é sempre necessário calibrar um instrumento quando este nunca foi usado

ou depois de muito tempo sem uso, para que este volte a ter como referência os padrões de fábrica.

## 4.2 CIRCUITOS

Esta subseção tratar-se-á da abordagem aos itens eletrônicos que serão utilizados no circuito de aquisição dos sinais provindos do sensor piezoresistivo, a saber, estes:

- Resistores;
- Capacitor;
- Regulador de Tensão;
- Amplificador Operacional;
- Arduino;

### 4.2.1 RESISTORES

O fluxo de carga elétrica através de qualquer material encontra uma oposição semelhante, em muitos aspectos, ao atrito mecânico. Essa oposição, resultante das colisões entre elétrons e entre elétrons e átomos do material, que converte energia elétrica em uma outra forma de energia, tal como a energia térmica, é denominada resistência do material (BOYLESTAD, 2004).

Conforme o que foi dito acima, qualquer impedimento ao fluxo de corrente elétrica se constitui em uma forma de resistência e praticamente todos os materiais apresentam uma quantidade de resistência, mesmo que de ordem muito pequena como a atômica. Por causa desse comportamento observado, que, cientistas e engenheiros, desenvolveram os resistores, dispositivos fabricados especificamente para gerar oposição a corrente elétrica. Este dispositivo é de muita importância e está presente em quase todos os circuitos elétricos por ser um elemento básico e necessário para o bom funcionamento dos mesmos.

O efeito da resistência em um circuito pode ser aproveitado de diversas formas, desde o controle de corrente em um circuito, controle e monitoramento de tensão até como parte de um circuito de condicionamento.

Os resistores podem ser construídos em diversos formatos, mas todos eles podem ser divididos em dois grupos: fixos e variáveis. O mais comum dos resistores fixos de baixa potência é o sensor de carbono moldado (BOYLESTAD, 2004). As dimensões relativas de todos os resistores variáveis e fixos variam de acordo com a potência especificada, e as dimensões maiores correspondem aos que tem maiores potências especificadas para possibilitar valores mais elevados de corrente e dissipação de calor (BOYLESTAD, 2004).

### 4.2.1.1 RESISTOR FIXO

O resistor possui um corpo resistivo transpassado por um fio condutor e listras de diversas cores. Estas listras servem para indicar a resistência suportada pelo resistor, onde, a ordem e as cores que definem a numeração e o multiplicador. A aparência do resistor, tal como a tabela de valores das listras podem ser observados na figura 15 abaixo:

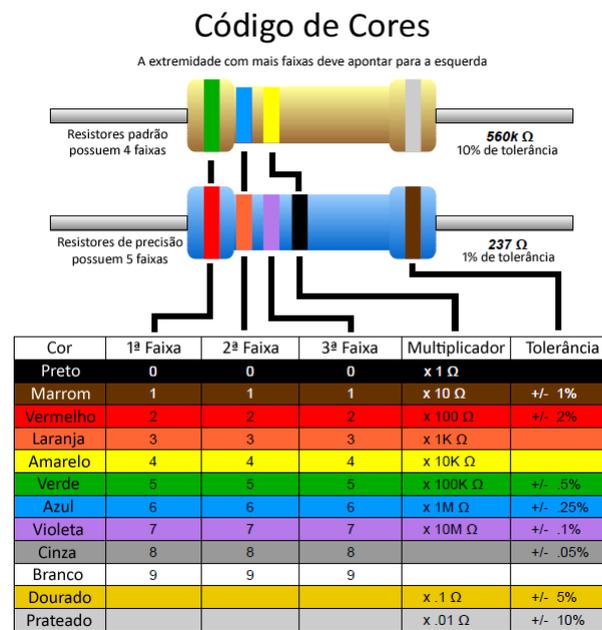


Figura 15 – Tabela de cores para resistores.

Fonte: Cia (2013)

É possível observar que, segundo a figura 15, os resistores podem ter 4 ou 5 listras; a diferença entre o número total de listras está na precisão, um resistor com 5 listras vai ter mais casas decimais do que o de 4 listras. Em relação ao significado das listras, pode-se resumir, que:

- As duas ou três primeiras listras representam o primeiro e segundo dígito;
- A terceira ou quarta listra determina o multiplicador, em forma de potências de 10, dos dois primeiros dígitos (ou seja, o número de zeros que se seguem ao segundo dígito);
- A última listra é a tolerância do resistor fornecida pelo fabricante, que é uma indicação da precisão no valor da resistência. Caso não exista, o valor de 20% deve ser considerado.

### 4.2.1.2 RESISTOR VARIÁVEL

Os resistores variáveis, como o próprio nome sugere, têm resistência que pode ser variada ao girar um botão, um parafuso ou o que for apropriado para a aplicação específica (BOYLESTAD, 2004). Eles podem ter dois ou três terminais sendo que a maioria possui três. Geralmente o primeiro terminal é a entrada, o terceiro é a saída e o segundo é o pino que gera um sinal para ser lido indicando a potência ou resistência do instante medido.

Quando o resistor variável é usado só como uma resistência, é chamado de reostato e quando é usado para variar a potência é chamado de potenciômetro. No entanto, tanto um como o outro são comumente chamados de potenciômetros, mesmo em revistas e manuais especializados neste componente.

Seu funcionamento interno é bem simples, como mostrado na figura 16. Um pino faz com que o cursor percorra uma trilha de resistência, onde, quanto mais para um lado maior a resistência e vice-versa.

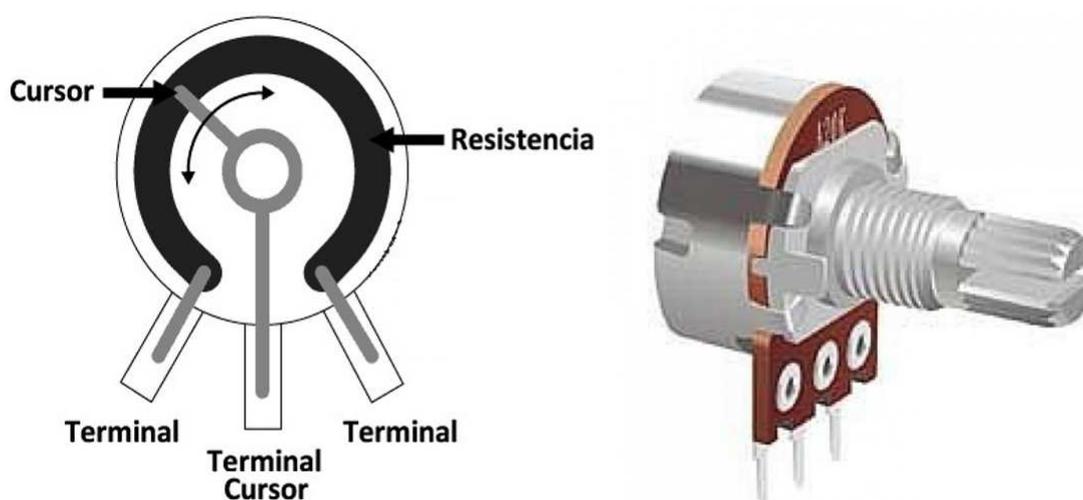


Figura 16 – Esquema de um resistor e sua ilustração .

Fonte: Reis (2013)

### 4.2.2 CAPACITOR

Assim, como um resistor, o capacitor também se trata de um elemento passivo, ou seja, um dispositivo que só reage a corrente e/ou tensão aplicado a ele, não realizando, portanto, nenhuma ação, sozinho.

Basicamente, o capacitor se constitui de um trio, duas placas ou fios condutores e um elemento isolante (ou dielétrico) entre eles. Com esta estrutura, ele acumula carga quando polarizado em uma direção e descarrega a carga quando polarizado no sentido

contrário. Por conta dessa característica, na eletrônica analógica, capacitores são usados para guardar, temporariamente, informações em forma de carga acumulada.

A capacitância é a capacidade de acumular cargas elétricas e está intrínseco ao fabrico e o tipo de material que constitui o capacitor (BOYLESTAD, 2004). Por conta disso, existem diversos tipos de capacitor, dentre eles: os capacitores cerâmicos, eletrolíticos, de tântalo, de mica, de mylar, entre outros, que são fabricados de acordo com um conjunto de cenários e tipos de ações que eles podem proporcionar solução aos problemas da vida real.

Apesar da característica de carga e descarga de um capacitor, este não o faz de forma instantânea, leva-se um tempo de carga e descarga gradual de acordo com a capacitância e resistência aplicadas ao capacitor no momento de carga ou descarga. Este tempo de carga e descarga é dado pela constante mostrada na seguinte fórmula:

$$\tau = R \times C \quad (4.11)$$

O gráfico de carga e descarga dado a constante de tempo dado por RC é como mostrado na figura 17:

Devido tal comportamento, deve-se levar em consideração estes pequenos atrasos principalmente em circuitos de alta frequência, pois os acúmulos desses intervalos podem acarretar em erros de leitura e mal funcionamento de um circuito elétrico.

### 4.2.3 REGULADOR DE TENSÃO

Há uma classe de circuitos integrados, disponíveis no mercado, bastante utilizados como reguladores de tensão. OS CIs reguladores contêm os circuitos de fonte de referência, o amplificador comparador, o dispositivo de controle e a proteção contra sobrecarga, tudo em um único encapsulamento (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

Em resumo, o regulador de tensão vai cortar parte do sinal que seja maior que o especificado, deixando passar só o que foi designado pelo fabricante do elemento. Por ser um CI, dentro dele há diversos tipos de combinações lógicas que são bastante complexas de se compreender, além de serem construídos em escalas muito pequenas e que o seu nível de acoplamento é tão grande que, quando o dispositivo rompe, por algum motivo, este se tornará descartável.

Existem diversos tipos de reguladores de tensão e cada um deles tem características que os diferem uns dos outros, tais como o *range* de leitura, tensão de alimentação, quantidade de canais, disposição física de entradas e saídas, entre outros. A aparência física de um regulador de tensão é muito semelhante à de um transistor, tendo três terminais, sendo que um deles é de entrada, o outro é de saída e o último é o terminal que vai ser

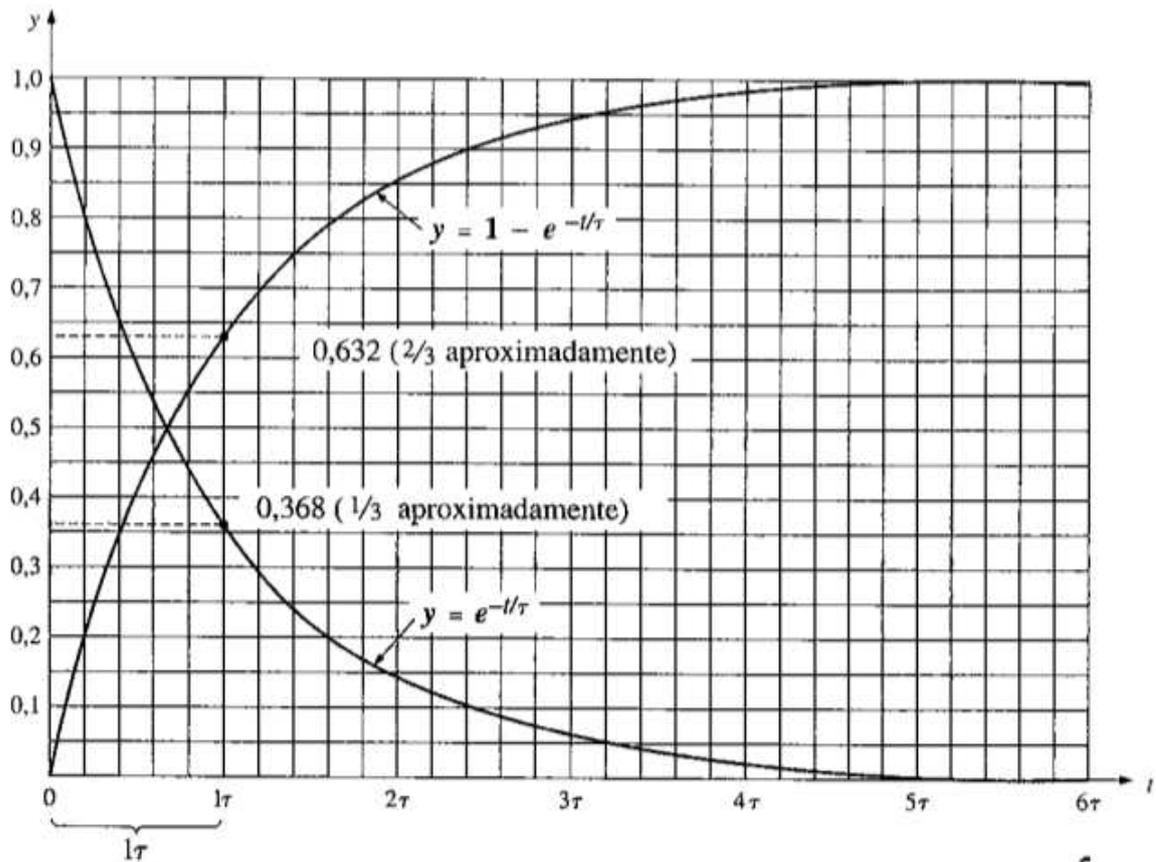


Figura 17 – Gráfico de carga e descarga de um capacitor.

Fonte: Boylestad (2004)

conectado diretamente à tensão terra, que é a referência nula global do circuito. A figura 18 demonstra um exemplo de regulador de tensão.



Figura 18 – Exemplo de regulador de tensão de 8V.

Fonte: Ryndack (2015)

Assim como todo elemento num circuito elétrico, o regulador de tensão também deve seguir o que foi dito no manual para que opere de forma predita e controlável. Por conta desse comportamento e características, os reguladores são usados em diversos circuitos, ora como forma de proteção, ora como circuito que regula tensão.

#### 4.2.4 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Um amplificador operacional, ou amp-op, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito alta e impedância de saída muito baixa (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). Assim como os reguladores de tensão, amp-ops também possuem vários pequenos circuitos dentro de seu encapsulamento, mas, de forma prática e para a maioria dos casos, usamo-los como um bloco e sua configuração dentro do circuito dará sua função.

Estes amplificadores são chamados de operacionais porque realizam diversas operações matemáticas como somar, subtrair, dividir, multiplicar, diferenciar, integrar, aplicar logaritmo e diversas outras a um par de sinal de entrada. Existem diversas formas de se configurar um amp-op, mas, para este trabalho, abordaremos somente o amplificador operacional inversor integrador.

##### 4.2.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL INVERSOR INTEGRAL

A configuração básica de um amplificador operacional inversor integral é dado na figura 19.

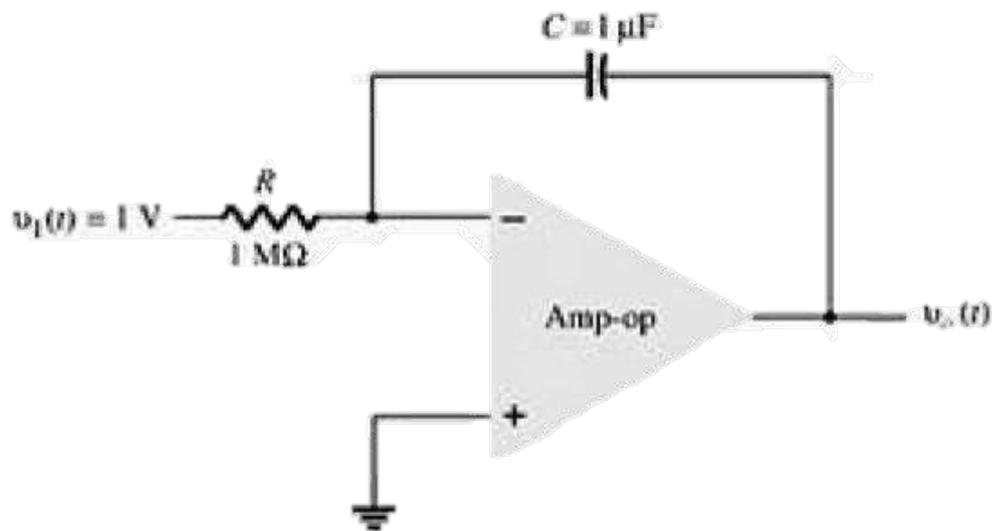


Figura 19 – Amplificador operacional inversor integrador.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2004)

Fazendo uma análise muito simples do amplificador mostrado na figura acima, podemos afirmar as seguintes premissas:

- A tensão de entrada do terminal negativo é igual ao do terminal positivo;
- A corrente de entrada do terminal positivo é a mesma do terminal negativo;

- Ambas, tensão e corrente, do terminal de entrada positivo e negativo são, idealmente, nulas;
- O circuito será realimentado de forma inversa pelo ramo que contém o capacitor.

Apesar de não mostrar na figura 19, mas o amplificador operacional trabalha com uma tensão de alimentação que servirá como tensão máxima alcançada pelo amplificador, também pode ser entendida como uma tensão de referência para o amplificador. Tensões acima da tensão de alimentação do amplificador serão retificadas pelo mesmo.

Assim como todo elemento eletrônico, o amp-op também trabalha dentro de uma faixa em que seu sinal é linear, mas como um amplificador consiste em um dispositivo com ganho, então a tendência normal é que ele aumente seu sinal infinitamente. Para evitar que isso aconteça é necessário que haja uma realimentação que corrija a entrada com base no sinal de saída, assim, o amplificador trabalhará, na maior parte do tempo, dentro de sua zona linear.

Uma simples análise de malha nos dará uma tensão de saída em relação a entrada como descrito na equação a seguir:

$$V_o(t) = \frac{-1}{RC} \times \int V_i(t) dt \quad (4.12)$$

Esta equação nos diz que a saída desse tipo de amplificador é uma integral da entrada multiplicada pelo inverso de uma constante, conhecida como  $\tau$ , que é a constante de carga e descarga de um capacitor. Então é importante frisar que as saídas deste amp-op serão amplificadas conforme a capacitância e a resistência oferecidas pelos elementos que compõe este tipo de amplificador, onde, quanto maior a resistência ou a capacitância, menor o sinal amplificado e vice-versa.

Uma outra observação que deve ser aqui explanada é quanto a situações de alta tensão de entrada ou baixas frequências. Nestes dois casos, há o risco de o capacitor estourar devido à alta tensão que irá acumular uma grande quantidade de carga sobre uma das faces do capacitor. Para evitar tal problema, aconselha-se a colocar um resistor em paralelo com o capacitor, para que, quando o capacitor oferecer uma resistência muito grande ao fluxo de corrente, o resistor assumira esse fluxo, aliviando assim, a tensão sobre o capacitor.

#### 4.2.5 ARDUINO

Arduino é uma placa microcontroladora, também chamada de placa de prototipagem, de hardware livre baseada no microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada e saída embutida, uma linguagem de programação padrão, a qual tem origem em wiring, e é essencialmente C/C++. O objetivo desta placa é criar ferramentas que são acessíveis,

com baixo custo, flexíveis e fáceis de se usar por artistas e amadores. Principalmente para aqueles que não teriam alcance aos controladores mais sofisticados e de ferramentas mais complicadas para este tipo de público (ARDUINO, 2013).

Como o arduino pode ser tratado como um microcomputador, então diversas aplicações embarcadas são realizadas através dele atualmente, desde automações residenciais, até controle de um robô, como também atividades mais simples como monitorar a temperatura ambiente ou enviar mensagens caso alguma condição aconteça. Essas placas de prototipagem, são assim chamadas pelo fato de poder servirem como protótipos de projetos, uma forma mais simples de exibir uma ideia com algo físico, palpável e visível. Como o objetivo dele é lidar com grandezas do mundo real através dos seus canais de envio e recepção, arduinos, geralmente, lidam com sensores, que irão enviar sinais aos quais o firmware da placa terá que lidar.

Como já mencionado, o arduino suporta uma linguagem de programação em seu microcontrolador chamada de wiring, baseada na linguagem C. Essa linguagem encontra suporte dentro do IDE (Integrated Development Environment) proprietária que possui uma estrutura simples de programação. Basicamente sua estrutura se divide em um setup que é um conjunto de configurações iniciais que serão válidas para o início do programa e a segunda parte é o loop que fará as repetições dos comandos que estão dentro desse bloco de forma infinita ou até o mesmo encontrar algum tipo de parada, como por exemplo, faltar alimentação para a placa. O IDE e a estrutura básica podem ser vista na figura 21.

Além das partes informadas, o IDE conta com um monitor de depuração que fica na parte de cor preta inferior do programa (também mostrado na figura 21) e um monitor da porta serial a qual o arduino é conectado ao computador.

Fora os canais analógicos e digitais, o microcontrolador, a porta de comunicação com o computador, a IDE e a linguagem wiring que foram citadas, o arduino ainda conta com uma pequena memória EEPROM, SRAM e flash, um oscilador de cristal e um LED de indicação.

#### 4.2.5.1 ARDUINO MEGA 2560

O arduino escolhido para fazer as medições do sensor piezoresistivo foi o arduino mega 2560 que possui as especificações mostradas na tabela 1.

O arduino mega é uma das placas mais robustas para a tarefa de prototipagem dentre a linha de produtos da empresa que o fabrica; fornece a maior quantidade de pinos, além de uma memória maior e capacidade de tensão e corrente maiores. Apesar de arduinos suportarem shields, que são acessórios ou extensões para a placa, mas esta versão, por si só, já oferece grandes recursos. A figura 20 exemplifica um exemplo desse modelo.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada recomendada	7-12V
Tensão de entrada limite	6-20V
Pinos Digitais de entrada e saída	54 (15 dos quais provem saída PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente DC por pino de entrada e saída	20mA
Corrente DC para o pino de 3.3V	50mA
Memoria Flash	256 KB (dos quais, 8Kb são usados para o bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidade de Clock	16 MHz
Pino do LED de indicação	13
Comprimento	101.52 mm
Largura	53.3 mm
Peso	37 g

Tabela 1 – Especificações do arduino

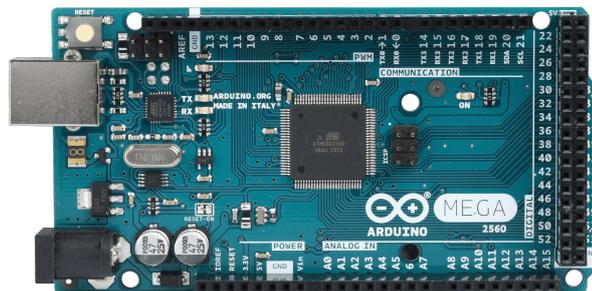


Figura 20 – Arduino Mega 2560.

Fonte: Arduino (2013)

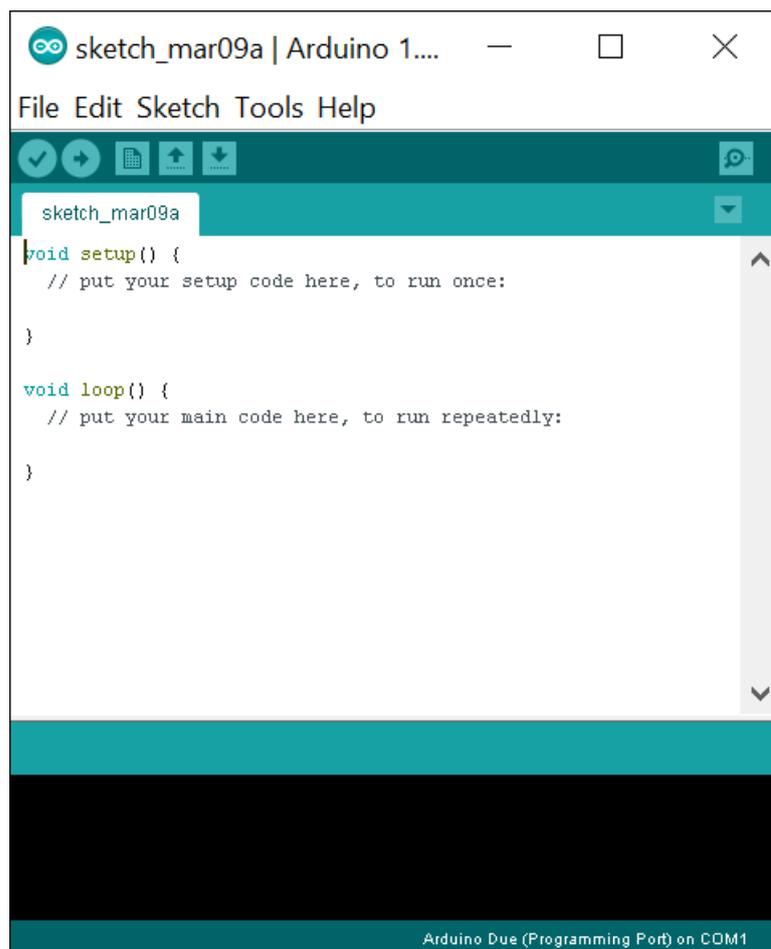


Figura 21 – IDE do arduino.

## 5 METODOLOGIA

Esta seção tratará da maneira que foi desenvolvido o sistema de aquisição do qual trata este trabalho. O método que foi adotado para tal, se baseia no manual de condicionamento, calibração e aquisição de dados da Tekscan<sup>®</sup>, disponível na internet e referenciado na bibliografia (TEKSCAN, 2010b) e (TEKSCAN, 2010c).

### 5.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Após tudo o que foi dito, pode-se, a partir de agora, abordar a proposta de sistema para realizar a aquisição de dados com os fundamentos para entendê-lo. Assim como na Figura 22, o sistema de aquisição também pode ser representado por um conjunto de blocos ligados e com um fluxo de dados, como é mostrado na figura 22.

Fazendo o comparativo com a figura 2, as linhas tracejadas da Figura 22 representam os mesmos blocos que foram expostos na figura que o baseia. O bloco de força e do sensor piezoresistivo representam o bloco de entrada; o bloco de amplificação, filtragem e processamento representam a planta; e por fim, o bloco do monitor representa a saída do sistema de aquisição.

Olhando a figura 23, que representa um *zoom* da figura 22, podemos ver os elementos que compõe cada bloco, como os pesos que representam a força de entrada; o sensor a201-100 que representa o sensor piezoresistivo; os elementos eletrônicos e o arduino no bloco que representam o condicionamento e filtragem; o monitor do notebook e o cabo USB que representam o monitor de saída.

Assim, pode-se, agora, partir para os métodos que foram adotados, segundo o material disponível, para a montagem do circuito e futura aquisição do sinal para a amostragem do mesmo.



Figura 22 – Sistema de aquisição.

Fonte: Autor

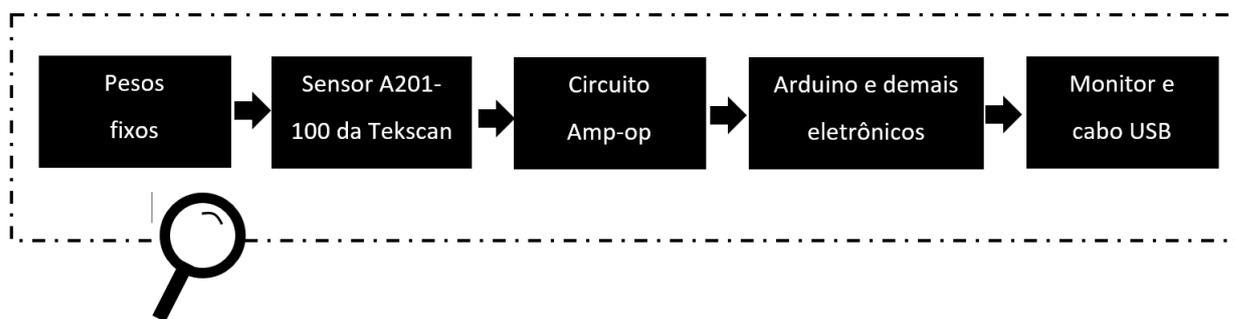


Figura 23 – Alguns componentes do sistema de aquisição.

Fonte: Autor

## 5.2 CONDICIONAMENTO E CALIBRAÇÃO

Para o condicionamento do sinal, fora usado um amplificador operacional integrador com um resistor para tratamento de altas tensões acumuladas, como demonstrado no esquema da figura 24.

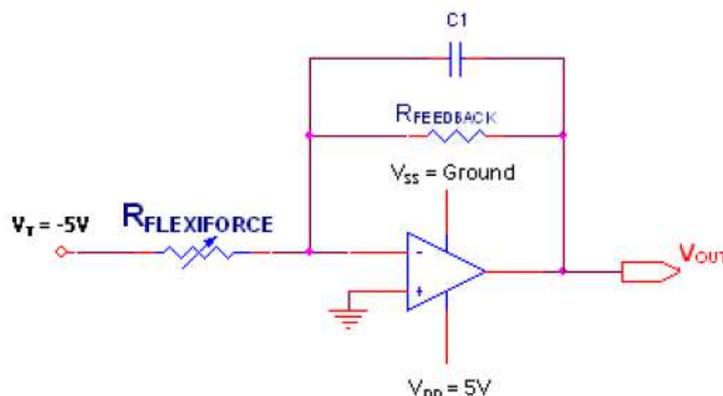


Figura 24 – Circuito de amplificação com fonte dupla.

Fonte: Tekscan (2010b)

Onde está indicado “Vout”, na figura, será acoplado uma placa arduino, que será o responsável pela leitura dos valores. A lista de elementos que serão usados para tal circuito estão na tabela 2.

Após a montagem correta de todos os componentes segundo o manual (TEKSCAN, 2010b), o circuito ficou semelhante à figura 25.

Como já dito, o circuito da figura 25 tem como função ampliar o sinal do sensor A201-100, que tem uma tensão de saída muito baixa. Como o mesmo já é fabricado para ter sinais livres da maioria dos ruídos, com uma linearidade muito boa, histerese baixa e

Elemento	Quantidade
Arduino Mega	1
Amplificador Operacional LM124-M	1
Potenciômetro	2
Capacitor 220 pF	1
Regulador de tensão de 5 V 7805	2
Sensor Tekscan A201-100	1
Bateria 9 V e clipe de anexagem	2
Protoboard	1
Pacote de Resistências Diversas	1
Pacote de fios	1

Tabela 2 – Lista de componentes para o sistema de aquisição.

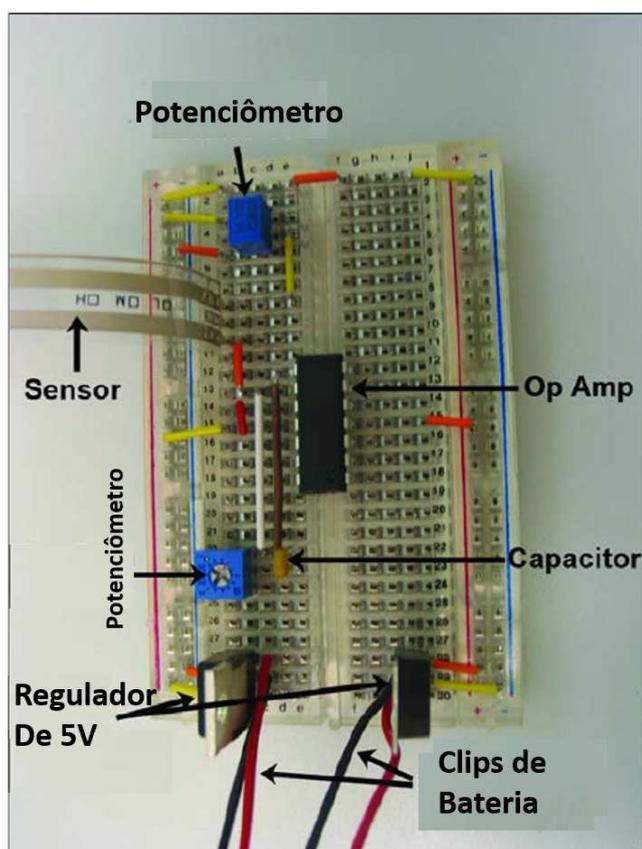


Figura 25 – Circuito montado de duas fontes.

Fonte: Tekscan (2010b)

outras boas características, o sensor precisa somente ser amplificado e calibrado, como pode ser visto na tabela 3:

Para fazer o condicionamento e a calibragem do sinal, foi usado um copo de vidro que foi manipulado com quantidades de água (medidas em uma balança) para realizar os procedimentos.

Característica	Performance Típica	Condições de Avaliação
Linearidade	< +- 3%	Entre 0 a 50% da carga aplicada
Repetibilidade	< +- 2.5% da escala total	Sensor condicionado, 80% da força total aplicada.
Histerese	< 4.5% da escala total	Sensor condicionado, 80% da força total aplicada.
Deriva	< 5% por escala logarítmica	Para cargas constantes de 111 N.
Tempo de Resposta	< 5 microssegundos	Carga de impacto, saída gravada no osciloscópio.
Temperatura de Operação	-40°C até 60°C	Respeitar o tempo necessário para que o sensor responda a força de entrada.

Tabela 3 – Lista de componentes para o sistema de aquisição.

Fonte: Tekscan (2010b)

Primeiramente foi feito o condicionamento, onde se teve como peso de referência um copo com água dentro. Então foi colocado mais 10% do valor que já se tinha no copo, que foi posto sobre o sensor durante três segundos e logo em seguida retirado. O processo foi feito cinco vezes para garantir os resultados.

Logo em seguida, foi feito o processo de calibragem do sensor com os mesmos aparatos, só que dessa vez se segue os seguintes passos (todos eles indicados pelo manual de referência e aplicados dez vezes, cada um):

- Passo 1: Coloque 1/3 do peso de teste, sobre o sensor. Grave a saída e retire o peso de cima do sensor pela mesma quantidade de tempo equivalente à aplicação real. Isso ajuda a minimizar o erro de deriva;
- Passo 2: Coloque 2/3 do peso de teste, e novamente espere cinco segundos. Grave a saída e retire o peso;
- Passo 3: Coloque o peso total de teste sobre o sensor. Espere a quantidade de tempo do passo anterior, grave a saída e retire o copo do sensor;
- Passo 4: Reúna os dados coletados, tanto a tensão de saída quanto a força aplicada, e plote em um gráfico;
- Passo 5: Compare o gráfico obtido com o gráfico de saída padrão dado pelo manual do fabricante.

Caso a fase de teste envolva forças dinâmicas ao invés das forças estáticas, estas forças devem ser levadas em consideração no processo de calibragem. Isto é devido ao

tempo de ascensão associado à saída. O tempo de ascensão refere-se a quanto tempo o sensor leva para se estabelecer com o valor apropriado dentro dos limites de erro.

Feito o processo de condicionamento e o de calibragem, como indicado no manual, o gráfico gerado a partir dos valores adquiridos é plotado, através do programa Excel, e mostrado na figura 26.

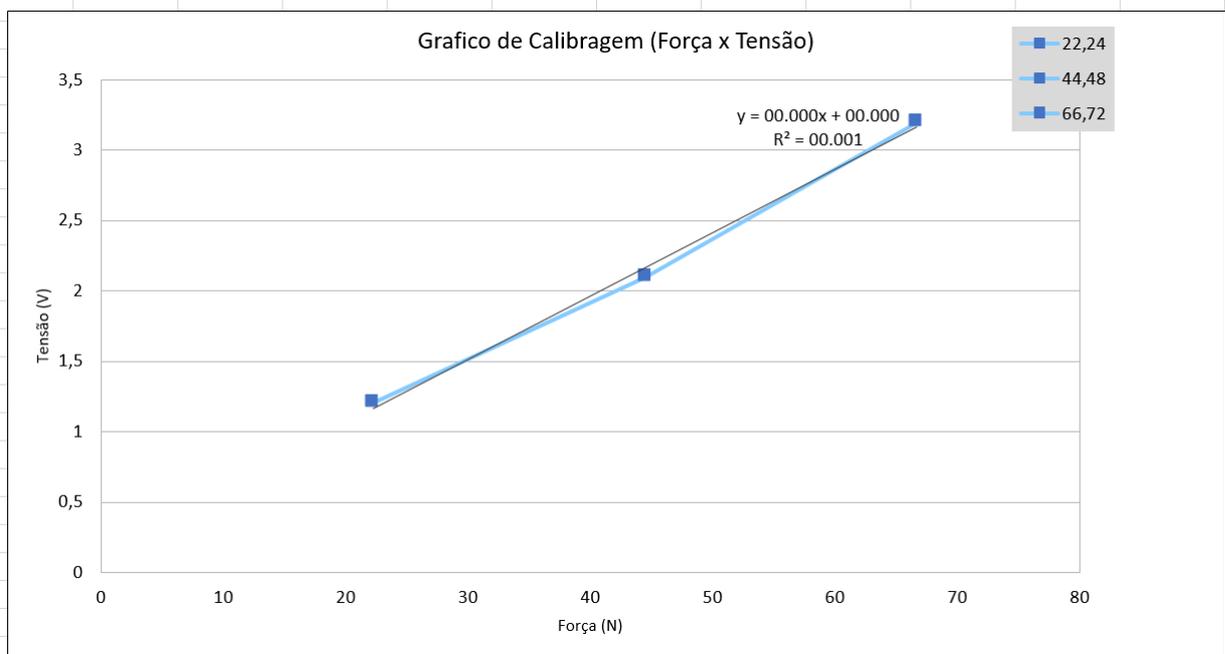


Figura 26 – Gráfico de calibragem.

Através da figura 26, observa-se tanto a saída do sensor na etapa de calibragem quanto a reta de tendência que é demonstrado pela função mostrada no próprio gráfico. Após condicionado e calibrado, o circuito estava pronto para uso e apto a captar os sinais e redirecioná-los para o arduino.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

Após as etapas de condicionamento do sinal e calibragem, foi possível fazer os primeiros procedimentos para captação de sinal.

Segundo o que a fabricante nos indica, é necessário que se verifique as diversas saídas de tensão para as forças fixas aplicadas de acordo com a variação do resistor de feedback (o que fica anexado à realimentação negativa) e à variação da tensão dada pelo potenciômetro que fica em série com o sensor A201-100. O resultado dessa variação é mostrado na figura 27.

A linha a ser adotada entre os dois gráficos abaixo (plotados com o excel) depende muito das especificações do projeto, pois cada uma delas possui um comportamento específico, onde a tensão pode variar rapidamente, ou não, de acordo com a força aplicada ou até mesmo de acordo com as configurações de circuito, onde a força lida pelo sensor tem um pequeno *range* para a tensão de operação. Abaixo vemos o gráfico que ilustra a variação das respostas do sensor através da variação do potenciômetro em serie com o sensor A201-100.

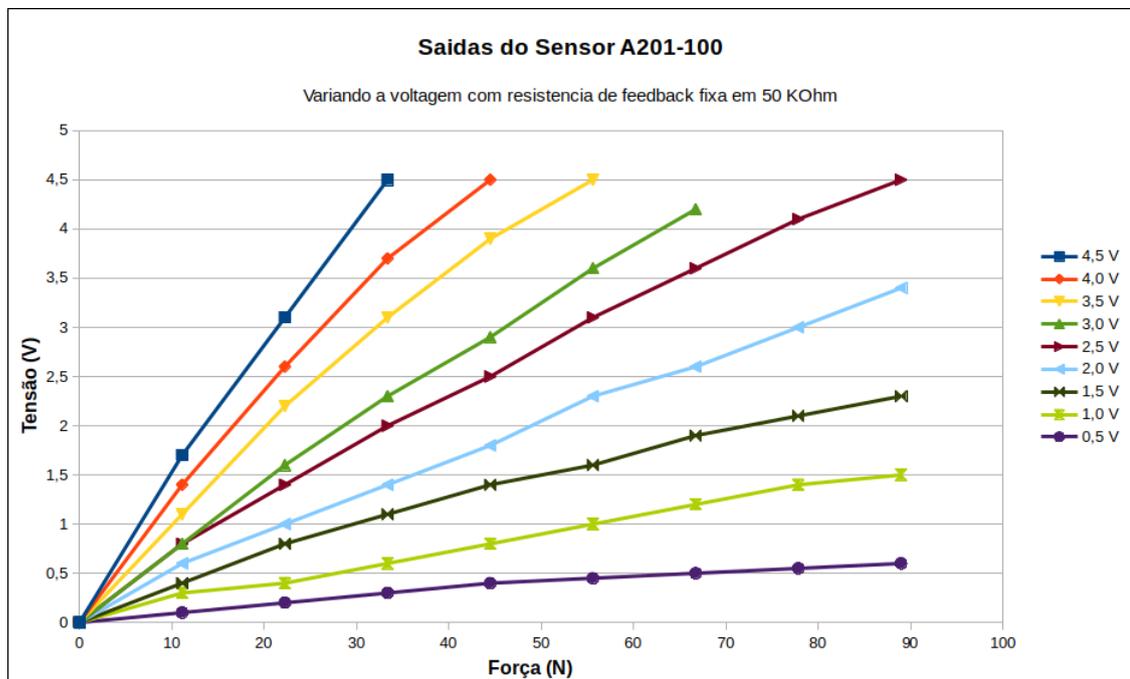


Figura 27 – Saídas do sensor dadas pela variação da tensão de entrada.

Fonte: Autor

É importante frisar que foram feitas 10 amostras para cada variação, sempre respeitando a tensão de 80% da escala total de tensão de saída que é o *range* no qual

se garante a qualidade correta das leituras. Os demais valores não foram plotados no gráfico pelo fato de terem ultrapassado a tensão recomendada pelo fabricante, então foram automaticamente cortadas.

O mesmo que foi dito acima se aplica ao caso de quando a tensão é fixa e o que varia é a resistência de feedback, como se ilustra na figura 28.

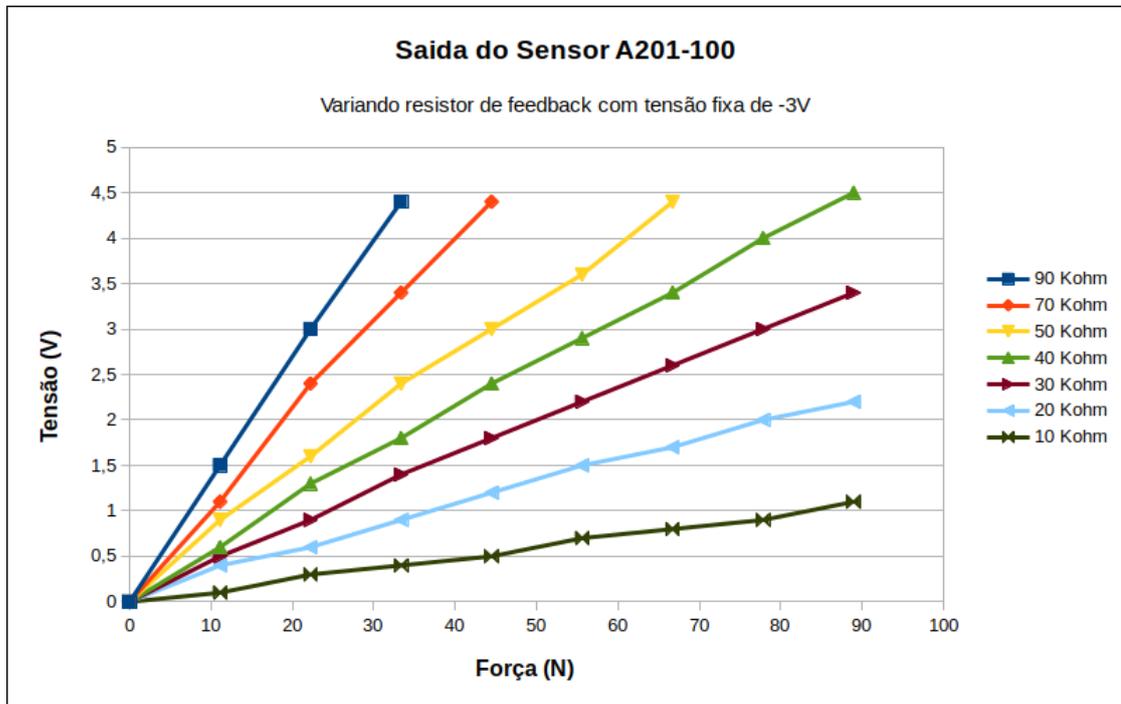


Figura 28 – Saídas do sensor dadas pela variação do resistor de feedback.

Fonte: Autor

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, portanto, que, se utilizando das informações e procedimentos dados pela fabricante, é possível obter um bom sinal sem precisar de muitos elementos externos para a melhora do mesmo. O sensor A201-100 se provou muito acurado em suas leituras e com *ranges* satisfatórios para a maioria das aplicações de pequena ou média força, o que já é necessário para aplicações médicas e prototipagens científicas.

Sua facilidade de montagem e apoio de materiais disponibilizados gratuitamente pela fabricante estimulam bastante o uso do sensor, tendo apenas a ressalva em relação ao custo de se adquirir um fora dos Estados Unidos, local aonde reside a empresa que fabrica os sensores e por onde adquiriu-se o equipamento. O custo de aquisição é um empecilho que desencoraja a opção por estes sensores, mas, com parcerias institucionais, isso pode ser resolvido.

## REFERÊNCIAS

- ARDUINO. *Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560#>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- BARLIAN, A. A. et al. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 3, p. 513–552, March 2009. ISSN 0018-9219. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. PRENTICE HALL BRASIL, 2004. ISBN 9788587918222. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=OyAVAAAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- BOYLESTAD, R. L. *Introdução à Análise de Circuitos*. 10<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Prentice Hall Brasil, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 37, 39, 40 e 41.
- BRAGA, A. R.; BRAGA, C. M. P. Instrumentação industrial. Notas de Aula. 2011. Disponível em: <[http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Instrumentacao\\_NotasAula.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Instrumentacao_NotasAula.pdf)>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 21, 22 e 23.
- CASSIOLATO, C. *Condicionamento de Sinais Analógicos & Sensores*. 2011. Disponível em: <<http://www.instrumatic.com.br/artigo/condicionamento-de-sinais-analogicos-sensores>>. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 35.
- CIA, A. e. *Código de cores de resistores*. 2013. Web. Disponível em: <<http://www.arduinoecia.com.br/2013/08/codigo-de-cores-de-resistores.html>>. Citado na página 38.
- CO., L. K. E. I. *What's a strain gage? Introduction to Strain Gages*. 2014. Disponível em: <<http://www.straintech.fi/pdf/whats.pdf>>. Citado na página 28.
- MONTEIRO, O. *Historia da musica eletronica*. 2013. Web. Disponível em: <<https://oliviamonteiro.wordpress.com>>. Citado na página 36.
- REIS, M. dos. *Potenciometro*. 2013. Web. Disponível em: <<http://baudaeletronica.blogspot.com.br/2011/09/potenciometro.html>>. Citado na página 39.
- RYNDACK. *L7808CV - Regulador de Tensão 8V (7808)*. 2015. Web. Disponível em: <<https://www.ryndackcomponentes.com.br/l/778-l7808cv-regulador-de-tensao-8v-7808.html>>. Citado na página 41.
- SENAI. *Metrologia*. 2000. Disponível em: <<http://bmalbert.yolasite.com/resources/Telecurso%202000%20-%20Metrologia.pdf>>. Citado na página 15.
- TEKSCAN. *FLEXIFORCE SENSORS USERS MANUAL*. 307 West First Street, South Boston, MA USA, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 31, 32 e 36.
- TEKSCAN. *Flexiforce Starter Kit*. 307 West First Street, South Boston, MA USA, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 47, 48, 49 e 50.

TEKSCAN. *FLX Flexiforce Calibration QuickStart*. 307 West First Street, South Boston, MA USA, 2010. Citado na página 47.

TEKSCAN. *FLX Force Sensor Study Guide*. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. D. *SENSORES INDUSTRIAIS - FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES*. 1. ed. ERICA, 2005. ISBN 9788536500713. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=GJV7PgAACAAJ>>. Citado 5 vezes nas páginas 18, 20, 21, 22 e 23.

## ANEXO A – DATASHEET DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL



Product Folder



Sample &amp; Buy



Technical Documents



Tools &amp; Software



Support &amp; Community


**LM124-N, LM224-N**  
**LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

## LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers

### 1 Features

- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain) 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
  - Single Supply 3 V to 32 V
  - or Dual Supplies  $\pm 1.5$  V to  $\pm 16$  V
- Very Low Supply Current Drain (700  $\mu$ A)  
—Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Biasing Current 45 nA (Temperature Compensated)
- Low Input Offset Voltage 2 mV and Offset Current: 5 nA
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing 0 V to  $V^+ - 1.5$  V
- **Advantages:**
  - Eliminates Need for Dual Supplies
  - Four Internally Compensated Op Amps in a Single Package
  - Allows Direct Sensing Near GND and  $V_{OUT}$  also Goes to GND
  - Compatible With All Forms of Logic
  - Power Drain Suitable for Battery Operation
  - In the Linear Mode the Input Common-Mode, Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage
  - Can Swing to Ground, Even Though Operated from Only a Single Power Supply Voltage
  - Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated
  - Input Bias Current is Also Temperature Compensated

### 2 Applications

- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks
- Conventional Op Amp Circuits

### 3 Description

The LM124-N series consists of four independent, high-gain, internally frequency compensated operational amplifiers designed to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split-power supplies is also possible and the low-power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

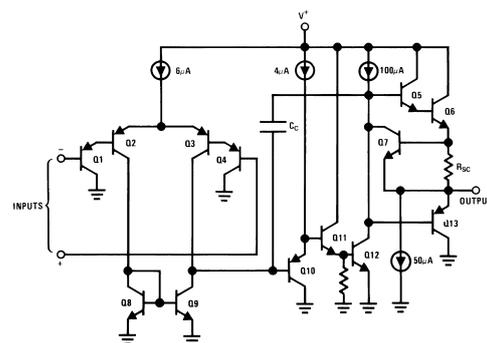
Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124-N series can directly operate off of the standard 5-V power supply voltage which is used in digital systems and easily provides the required interface electronics without requiring the additional  $\pm 15$  V power supplies.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM124-N	CDIP (14)	19.56 mm $\times$ 6.67 mm
LM224-N	CDIP (14)	19.56 mm $\times$ 6.67 mm
LM324-N	CDIP (14)	19.56 mm $\times$ 6.67 mm
	PDIP (14)	19.177 mm $\times$ 6.35 mm
	SOIC (14)	8.65 mm $\times$ 3.91 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm $\times$ 4.40 mm
LM2902-N	PDIP (14)	19.177 mm $\times$ 6.35 mm
	SOIC (14)	8.65 mm $\times$ 3.91 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm $\times$ 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

#### Schematic Diagram



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.