

---

# INSTRUMENTAÇÃO

---

Parte Experimental

Larissa Driemeier, Marcilio Alves, Rafael T. Moura

VERSÃO  
Outubro 2018

ESCOLA  
Escola Politécnica da USP  
Engenharia Mecatrônica

# CONTENTS

---

CONTENTS    ii

<b>I</b>	<b>EXTENSOMETRIA</b>	<b>1</b>
1	TEORIA SOBRE EXTENSOMETRIA	3
1.1	Objetivo	3
1.2	Extensômetros	3
1.2.1	Como funcionam os extensômetros?	3
1.2.2	Fator de ganho	4
1.3	Ponte de Wheatstone	5
1.4	Viga engastada	7
2	ENSAIO EXPERIMENTAL	9
2.1	Material a ser utilizado	9
2.1.1	Extensômetro	9
2.1.2	Resistência	11
2.1.3	Conversor	11
2.1.4	LCD	12
2.2	Etapas do ensaio experimental	14
2.3	Programação usada neste tutorial	15
3	RELATÓRIO	21
3.1	Questões	21
3.2	Documentos anexados	21

# I

## EXTENSOMETRIA





# TEORIA SOBRE EXTENSOMETRIA

---

*Se você não pode medir algo, não pode melhorá-lo!*  
*Lord Kelvin*

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo é construir uma *balança* com uso de extensômetro.

## 1.2 EXTENSÔMETROS

Extensômetro, ou, em inglês, strain gauges, são sensores resistivos, i.é, medem deformação por mudança de resistividade elétrica. É um metal muito fino (2-5  $\mu m$  de espessura) depositado sobre um suporte (10-30  $\mu m$  de espessura, usualmente de epóxi, policarbonato ou poliamida), como mostra a Fig. 1.1. Ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando, a deformação da superfície. Existem dois valores padronizados de resistência: 120  $\Omega$  e 330  $\Omega$ .

### 1.2.1 Como funcionam os extensômetros?

Lord Kelvin, em 1856, foi quem primeiro percebeu que condutores metálicos sujeitos a deformações mecânicas exibem mudança em sua resistência elétrica. Lembre-se que,

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.1)$$

A deformação altera a geometria de um condutor e, por consequência, sua resistência (Fig. 1.2).

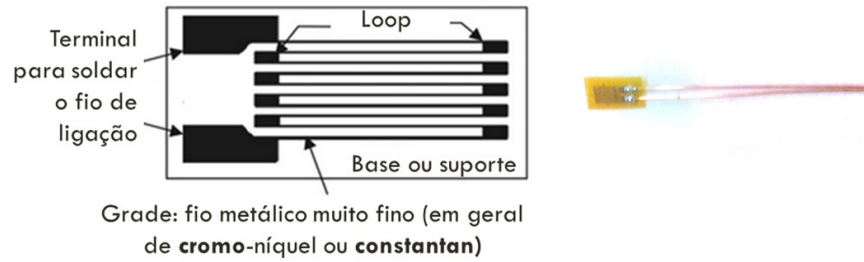


Figure 1.1: Strain gauge simples, que será usado na experiência.

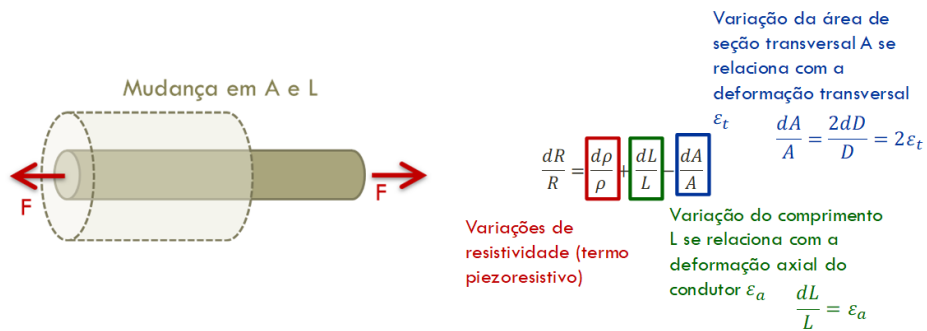


Figure 1.2: Variações da resistência como consequência da deformação.

### 1.2.2 Fator de ganho

Portanto,

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \\ \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \\ \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon_a - 2\epsilon_t \end{aligned} \quad (1.2)$$

Sabendo-se que o coeficiente de Poisson é definido como,

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (1.3)$$

tem-se que,

$$\frac{dR/R}{\epsilon_a} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_a} + (1 + 2\nu) \quad (1.4)$$

Por definição, Gauge Factor (GF), ou *fator de ganho*, é dado por:

$$GF = \frac{dR/R}{\epsilon_a} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_a} + (1 + 2\nu) \quad (1.5)$$

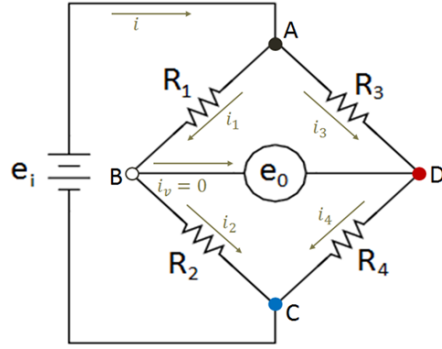


Figure 1.3: Ponte de Wheatstone.

ou,

$$\frac{dR}{R} = GF\epsilon_a \quad (1.6)$$

Sabe-se, ainda, que, na maioria dos extensômetros comerciais,  $1 \leq GF \leq 2,5$ .

Dada a ordem de grandeza do GF, as mudanças de resistência devem ser da mesma ordem que as mudanças na deformação! Em materiais de engenharia este nível de deformação é, tipicamente, de 0,000002 - 0,01. Assim, alterações na resistência de não mais do que 1% devem ser detectadas! Aqui reside o desafio na concepção de circuitos de medição e um problema em instalações práticas.

### 1.3 PONTE DE WHEATSTONE

Em 1843, Sir Charles Wheatstone projetou um circuito em ponte que capaz de medir pequenas variações de resistência elétrica [baseado no trabalho de Samuel Hunter Christie, 1833]. O circuito pode ser montado com um ou mais de seus resistores sendo strain gages, de forma a se obter uma voltagem de saída  $e_o$  que indique a deformação imposta ao sensor.

Considera-se a ponte de Wheatstone em sua forma mais simples (Fig. 1.3). Um voltímetro (com altíssima impedância,  $i_v = 0$ ) mede a diferença de potencial entre os nós B e D, isto é, a voltagem de saída da ponte.

$$e_{BC} = i_1 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e_i \quad e_{DC} = i_3 R_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} e_i \quad (1.7)$$

Portanto, a voltagem de saída da ponte é,

$$e_o = e_{BC} - e_{DC} \\ e_o = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) e_i \quad (1.8)$$

ou ainda,

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (1.9)$$

Diz-se que a ponte está em equilíbrio quando:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (1.10)$$

Portanto,

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (1.11)$$

Supondo-se a ponte em equilíbrio... Se cada resistência variar um valor infinitesimal  $dR_i$ , de modo que  $R_i \gg dR_i$  (efeitos de segunda ordem desprezados), o equilíbrio da ponte é desfeito e surge uma voltagem de saída diferente de zero, de modo que,

$$e_0 = \left[ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( -\frac{dR_1}{R_1} + \frac{dR_2}{R_2} \right) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left( \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \right] e_i \quad (1.12)$$

O princípio básico da ponte pode ser aplicado de duas maneiras diferentes:

1. Método da deflexão: a mudança de pelo menos uma das resistências irá desbalancear a ponte e aparecerá uma voltagem  $e_0 \neq 0$ . Portanto, a mudança de voltagem lida é uma indicação de mudança de resistência;
2. Método nulo: um dos resistores deve ser manualmente ajustável. Por exemplo, se  $R_1$  muda e causa variação de voltagem,  $R_2$  pode ser manualmente ajustado até que seu efeito cancele aquele de  $R_1$  e a ponte retorne à posição de equilíbrio. Ambos os métodos podem ser utilizados. No método da deflexão, um medidor calibrado é necessário. Se a excitação  $e_i$  variar um erro é introduzido, já que o medidor mede a variação de  $e_0$ . A vantagem é que a resposta é praticamente instantânea com relação à entrada. O método nulo, por outro lado, requer balanceamento de resistores e, portanto, não é imediato.

A teoria da ponte de Wheatstone é relativamente simples. Porém, equilibrar uma ponte não é trivial. Uma prática comum com instrumentação moderna é operar o circuito da ponte em modo desbalanceado.

Por exemplo, considerando-se a variação somente do resistor  $R_2$  (1/4 de ponte), tem-se:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix}_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix}_1 = \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (1.13)$$

e,

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix}_0 - \begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix}_1 = \Delta \begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix} = \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.14)$$

Para todas as resistências iguais, tem-se  $R_1 = R_2 = R$  e  $\Delta R_2 = \Delta R$ , de modo que:

$$\Delta \begin{bmatrix} e_0 \\ e_i \end{bmatrix} = \frac{\Delta R}{4(R + \Delta R/2)} \quad (1.15)$$

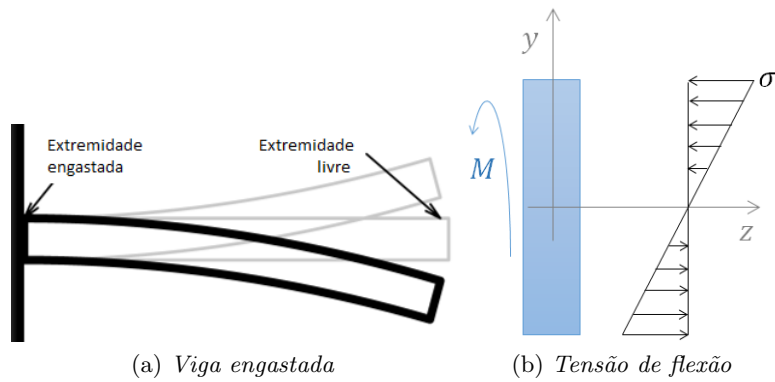


Figure 1.4: Detalhes de geometria e estado de tensões para viga engastada sujeita a flexão pura.

#### 1.4 VIGA ENGASTADA

A Fig. 1.4a mostra uma viga engastada de comprimento  $L$ . Quando um carregamento  $P$  é colocado na extremidade livre da viga, este gera um momento no engaste definido como,

$$M = PL \quad (1.16)$$

quando se despreza o peso próprio.

O momento fletor gera tensões máximas de tração na face superior e de compressão na face inferior da viga - veja Fig. 1.4b. A tensão de tração, definida a partir da linha neutra, é dada por,

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (1.17)$$

onde  $I$  é o momento de inércia da seção transversal da viga e  $y$  é a distância à linha neutra. A tensão e a deformação estão relacionadas através da lei constitutiva elástica linear,

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.18)$$

$E$  é o módulo de elasticidade do material.



# ENSAIO EXPERIMENTAL

---

*Hands-on!*

## 2.1 MATERIAL A SER UTILIZADO

### 2.1.1 *Extensômetro*

O extensômetro a ser utilizado está esquematizado na Fig. 2.1. De acordo com o fabricante, a resistência é de  $120\ \Omega$  e o *gauge factor* é  $GF=2,13$ .

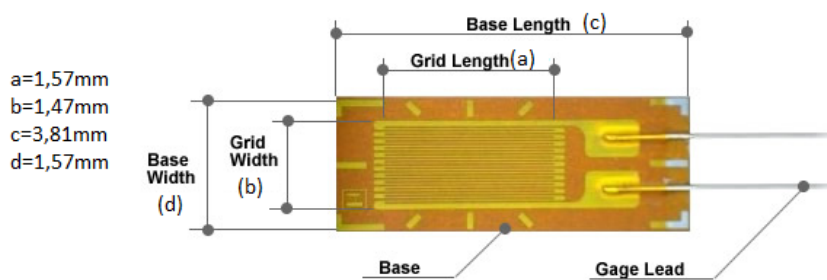


Figure 2.1: Esquema de um extensômetro simples.

A Fig. 2.2 mostra como você deve colar o strain gauge. No procedimento ilustrado, na etapa de soldagem dos fios, você deverá soldá-los em tiras do terminal colável de ligação e ligá-los com jumpers, para facilitar a manipulação.

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Separe a peça de alumínio, o extensômetro (use a pinça para manipular o extensômetro), lixa, álcool, condicionador e neutralizador, fita durex, algodão.</li> <li>▪ Lixe a superfície do alumínio, na região onde você irá colar o extensômetro, com uma lixa fina, em movimentos circulares para evitar ranhuras. Lixe cuidadosamente até "sentir" a superfície lisa;</li> <li>▪ Limpe a região onde o extensômetro será colado com álcool para que impurezas não prejudiquem a aderência da cola;</li> <li>▪ Limpe com condicionador (vermelho) – coloque 1 gota pequena e passe o algodão várias vezes (até não sair mais tão cinza). Depois passe o neutralizador (verde) repetindo o processo. Essa limpeza é química, e, portanto, mais profunda que a limpeza com álcool.</li> <li>▪ Marque a posição do extensômetro com estilete (verifique as linhas de ajuste de posição que existem no extensômetro e faça linhas guia na superfície do alumínio). <b>OBVIAMENTE</b>, cuidado para não riscar a região que você irá colar o extensômetro;</li> <li>▪ Pegue um pedaço de fita durex e diminua "a força da cola da fita" colando e descolando da mesa. Depois cole o extensômetro na fita com a resistência para cima e posicione-o corretamente em relação às linhas guias que você fez. Será "no olho". É uma parte que dá trabalho.</li> <li>▪ Levante a fita durex devagar e coloque a cola. Pressione com o dedo (a pressão deve ser tal que a unha comece a ficar branca) por 120s.</li> <li>▪ Segure os fios do extensômetro e puxe a fita durex devagar para que não descole o extensômetro;</li> <li>▪ Cole o material isolante para apoio dos fios;</li> <li>▪ Corte aprox. 3 tiras do terminal colável de ligação abaixo do material isolante e solde os fios para posterior ligação no equipamento de aquisição de dados;</li> <li>▪ Coloque pasta (borracha) isolante para proteger o extensômetro.</li> </ul>	
--	--

Figure 2.2: Instalação de extensômetro.



### 2.1.2 Resistência

Para montar a Ponte de Wheatstone, você precisará de resistências de boa precisão, de  $120\ \Omega$ . Em sua bancada, são disponibilizadas resistências com precisão de 1% ou três extensômetros já colados que você pode usar para construir sua ponte (Figura 2.3).

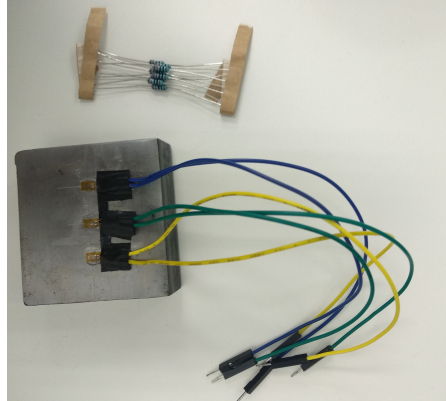


Figure 2.3: Resistências e extensômetros para construção da Ponte de Wheatstone.

### 2.1.3 Conversor

Você irá utilizar o conversor A/D HX711, com precisão de 24 bits. Canal A pode ser programado com um ganho de 128 ou 64, canal B tem um ganho fixo de 32. Não é necessária nenhuma programação para os registros internos. Todos os controles para o HX711 são através dos pinos. O conversor está mostrado na Figura 2.4.

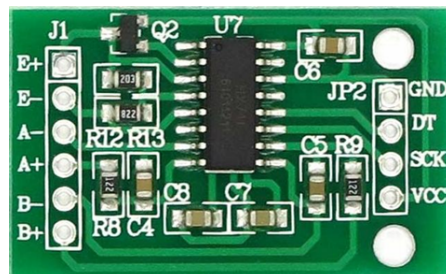


Figure 2.4: Conversor HX711.

A precisão desse amplificador de sinal pode variar em até 5% conforme condições de ambiente, principalmente afetado por temperatura.

A Fig.2.5 mostra um esquema extraído do *datasheet*.

A Figura 2.6 mostra as ligações da ponte com o conversor e o arduino. Uma das coisas que o Arduino proporciona de bom é uma comunidade inteira desenvolvendo códigos para agilizar tarefas! O lado negativo é que vocês deixarão de por a mão em baixo nível, mas claro que reinventar a roda aqui e agora não é a melhor opção. Nossa aula é de

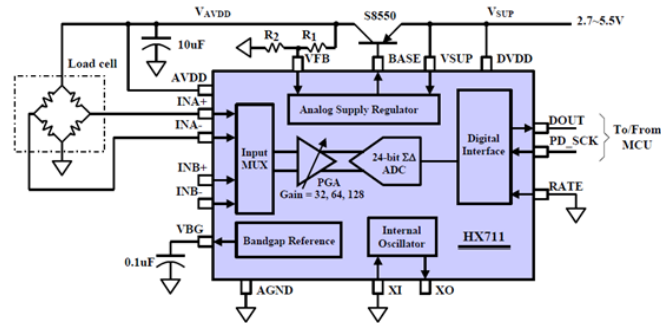


Figure 2.5: Diagrama de blocos com aplicação típica para balança.

Instrumentação... Vocês podem baixar a biblioteca do HX711 disponibilizada no STOA, juntamente com exemplos de programação. A biblioteca está impressa e disponível na bancada e os programas estão listados ao final desta parte.

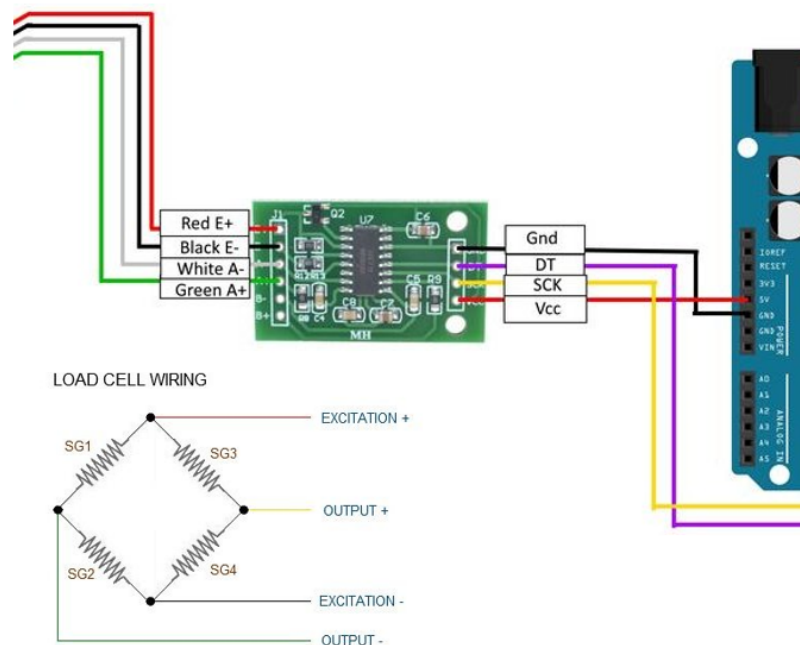


Figure 2.6: Conexões para montagem do sistema.

#### 2.1.4 LCD

Para saída em LCD, veja a montagem do circuito com Arduino detalhada na Fig.2.7. Importante: caso você queira trabalhar com o LCD que você já usou em sala,... ótimo!

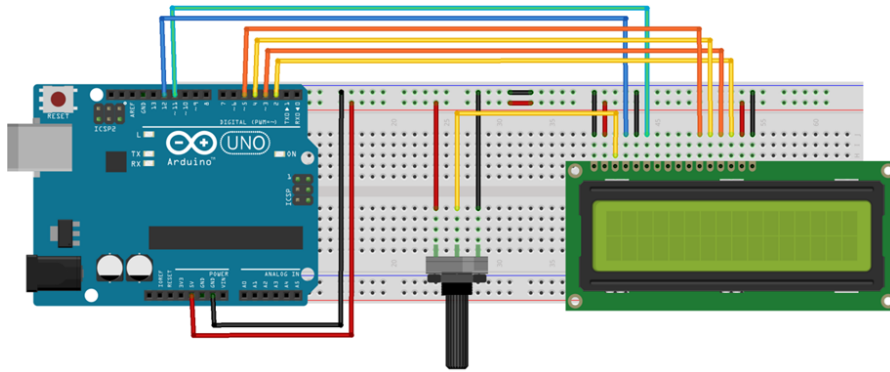


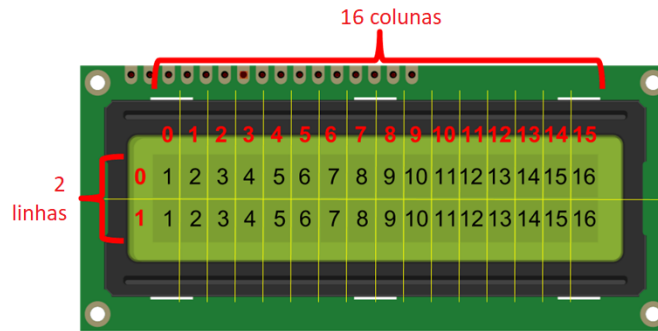
Figure 2.7: Setup para escrever no LCD. Figura extraída do site [https://rydepier.files.wordpress.com/2015/06/img\\_1930.png](https://rydepier.files.wordpress.com/2015/06/img_1930.png).

A Fig. 2.8a mostra o posicionamento do cursor, usado no comando `setCursor()`. A Fig. 2.8b mostra a configuração dos pinos. Caso queira optar por uma configuração mais simples, retire o potenciômetro do circuito e ligue o canal 3 diretamente ao GND. A descrição de cada pino do LCD é dada na Tabela 2.1.

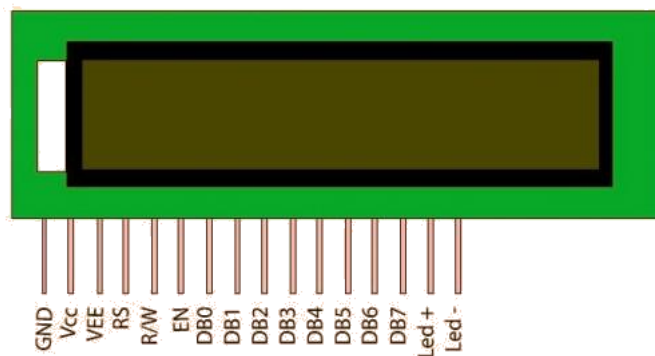
Um tutorial de exemplo está listado na Seção 2.3.

Table 2.1: Pinagem do LCD. **Atenção: verifique, no verso do LCD, onde está o pino 1.**

Pino	Símbolo	Função
1	VSS	GND (alimentação)
2	VDD	5V (alimentação)
3	V0	Ajuste de contraste
4	RS	Habilita/Desabilita Seletor do Registrador
5	R/W	Leitura/Escrita
6	E	Habilita Escrita no LCD
7	DB0	Dado
8	DB1	Dado
9	DB2	Dado
10	DB3	Dado
11	DB4	Dado
12	DB5	Dado
13	DB6	Dado
14	DB7	Dado
15	A	5V(Backlight)
16	K	GND(Backlight)



(a) Posição linha-coluna



(b) Identificação dos pinos

Figure 2.8: LCD.

## 2.2 ETAPAS DO ENSAIO EXPERIMENTAL

As etapas são:

1. Montem a balança. Para isso vocês têm uma viga de alumínio, extensômetro, resistências, LCD. Cuidado ao definir onde colocarão o extensômetro, como montarão a ponte.
2. Façam a leitura ser mostrada no LCD.
3. Com os pesos conhecidos, ajustem a escala da balança.
4. Encontrem o valor do peso de ouro que está na mesa, usando o sistema que acabaram de montar. Se acertarem, o *ouro* é de vocês!

## 2.3 PROGRAMAÇÃO USADA NESTE TUTORIAL

### Sketch 1: Calibrando o HX711

```
1
2 /*
3 <br> Example using the SparkFun HX711 breakout board with a
   scale
4 By: Nathan Seidle
5 SparkFun Electronics
6 Date: November 19th, 2014
7 License: This code is public domain but you buy me a beer if
   you use this and we meet someday (Beerware license).
8 This is the calibration sketch. Use it to determine the
   calibration_factor that the main example uses. It also
9 outputs the zero_factor useful for projects that have a
   permanent mass on the scale in between power cycles.
10 Setup your scale and start the sketch WITHOUT a weight on the
   scale
11 Once readings are displayed place the weight on the scale
12 Press +/- or a/z to adjust the calibration_factor until the
   output readings match the known weight
13 Use this calibration_factor on the example sketch
14 This example assumes pounds (lbs). If you prefer kilograms,
   change the Serial.print(" lbs"); line to kg. The
15 calibration factor will be significantly different but it will
   be linearly related to lbs (1 lbs = 0.453592 kg).
16 Your calibration factor may be very positive or very negative.
   It all depends on the setup of your scale system
17 and the direction the sensors deflect from zero state
18 This example code uses bogde's excellent library: https://
   github.com/bogde/HX711
19
20 bogde's library is released under a GNU GENERAL PUBLIC LICENSE
21 Arduino pin 2 -> HX711 CLK
22 3 -> DOUT
23 5V -> VCC
24 GND -> GND
25 Most any pin on the Arduino Uno will be compatible with DOUT/
   CLK.
26 The HX711 board can be powered from 2.7V to 5V so the Arduino
   5V power should be fine.
27 */
28 #include "HX711.h"
```

```
29 #define DOUT 3
30 #define CLK 2
31 HX711 scale(DOUT, CLK);
32 float calibration_factor = 8000; //start guess
33 void setup() {
34     Serial.begin(9600);
35     Serial.println("HX711_calibration_sketch");
36     Serial.println("Remove_all_weight_from_scale");
37     Serial.println("After_readings_begin,_place_known_weight_on_
    scale");
38     Serial.println("Press_+_or_a_to_increase_calibration_factor")
    ;
39     Serial.println("Press_-_or_z_to_decrease_calibration_factor")
    ;
40     scale.set_scale();
41     scale.tare(); //Reset the scale to 0
42     long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline
    reading
43     Serial.print("Zero_factor:_"); //This can be used to remove
    the need to tare the scale. Useful in permanent scale
    projects.
44     Serial.println(zero_factor);
45 }
46 void loop() {
47     scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this
    calibration factor
48     Serial.print("Reading:_");
49     Serial.print(scale.get_units(), 1);
50     Serial.print("_lbs"); //Change this to kg and re-adjust the
    calibration factor if you follow SI units like a sane
    person
51     Serial.print("_calibration_factor:_");
52     Serial.print(calibration_factor);
53     Serial.println();
54     if(Serial.available())
55     {
56         char temp = Serial.read();
57         if(temp == '+' || temp == 'a')
58             calibration_factor += 10;
59         else if(temp == '-' || temp == 'z')
60             calibration_factor -= 10;
61     }
62 }
```

## Sketch 2: Programa básico para saída escalonada do conversor HX711

```
1 /*
2 <br> Example using the SparkFun HX711 breakout board with a
   scale
3 By: Nathan Seidle
4 SparkFun Electronics
5 Date: November 19th, 2014
6 License: This code is public domain but you buy me a beer if
   you use this and we meet someday (Beerware license).
7 This example demonstrates basic scale output. See the
   calibration sketch to get the calibration_factor for your
8 specific load cell setup.
9 This example code uses bogde's excellent library: https://
   github.com/bogde/HX711
10
11 bogde's library is released under a GNU GENERAL PUBLIC LICENSE
12 The HX711 does one thing well: read load cells. The breakout
   board is compatible with any wheat-stone bridge
13 based load cell which should allow a user to measure
   everything from a few grams to tens of tons.
14 Arduino pin 2 -> HX711 CLK
15 3 -> DAT
16 5V -> VCC
17 GND -> GND
18 The HX711 board can be powered from 2.7V to 5V so the Arduino
   5V power should be fine.
19 */
20 #include "HX711.h"
21 #define calibration_factor -80000 //This value is obtained
   using the SparkFun_HX711_Calibration sketch
22 #define DOUT 3
23 #define CLK 2
24 HX711 scale(DOUT, CLK);
25 void setup() {
26   Serial.begin(9600);
27   Serial.println("HX711_scale_demo");
28   scale.set_scale(calibration_factor); //This value is obtained
   by using the SparkFun_HX711_Calibration sketch
29   scale.tare(); //Assuming there is no weight on the scale at
   start up, reset the scale to 0
30   Serial.println("Readings:");
31 }
32 void loop() {
```

```

33 Serial.print("Reading:");
34 Serial.print(scale.get_units(), 1); //scale.get_units()
    returns a float
35 Serial.print("_g"); //You can change this to kg, lbs,
    whatever - but remember to change the calibration_factor
36 Serial.println();
37 }

```

### Sketch 3: Escrevendo no LCD

```

1 #include <LiquidCrystal.h> //Include LCD library
2
3 LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); // Pin configuration
4 // LiquidCrystal(rs, enable, d4, d5, d6, d7)
5 // rs: the number of the Arduino pin that is connected to the
    RS pin on the LCD (12)
6 // rw: the number of the Arduino pin that is connected to the
    RW pin on the LCD (optional) (11)
7 // enable: the number of the Arduino pin that is connected to
    the enable pin on the LCD
8 // d0, d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7: the numbers of the Arduino
    pins that are connected to the
9 // corresponding data pins on the LCD.d0, d1, d2, and d3 are
    optional; if omitted, the LCD will
10 // be controlled using only the four data lines (d4, d5, d6,
    d7). (5,4,3,2)
11
12 int temp; // Starts an integer variable (temp)
13
14 void setup()
15 {
16
17 lcd.begin(16, 2); // Define LCD dimensions 16x2(Columns x Rows)
18 lcd.setCursor(0, 0); // Set cursor position at first column (0)
    and first row (0)
19 lcd.print("PMR_3408"); // Write "PMR 3408"
20 lcd.setCursor(0, 1); // Set cursor position at first column (0)
    and second row (1)
21 lcd.print("Best_moments"); //Write "Best moments"
22
23 }
24
25 void loop()
26 {
27 lcd.setCursor(13, 1); //Set cursor position at fourteenth

```



```
    column (13) and second row (1)
28 lcd.print(temp); // Write the current value of the count
    variable
29 delay(1000); // 1sec delay
30 temp++; //Increment count variable
31
32 if(temp == 6) // If the temp variable reaches 6 (5 Seconds),
    ...
33 {
34   temp = 0; //...reset the count variable
35 }
36 }
```



# RELATÓRIO

---

*Unless you can communicate effectively, the knowledge and skills you acquire are of little use to others. You have to be able to collect information, organize it, and present it in a logical and concise form.*

<https://uwaterloo.ca/science/importance-reports>

Ao final de cada experimento, o grupo colocar no STOA, na área reservada a esse experimento, um arquivo zipado contendo as questões teóricas e os anexos pedidos neste capítulo. O nome do arquivo ZIP deve ser *Extensometria-XX-YY*, onde *XX* é o número do seu grupo e *YY* vale 01 para turma de segunda e 02 para turma de quinta.

## 3.1 QUESTÕES

As seguintes questões devem ser discutidas e apresentadas no relatório.

1. Façam um esquema da *balança* (não precisa detalhar a eletrônica, façam um esquema simplificado). Justifiquem o posicionamento do extensômetro.
2. Com a ajuda dos conhecimentos de vocês em resistência dos materiais, definam o peso máximo que pode ser colocado na balança e a variação de voltagem correspondente.
3. Descrevam a metodologia de calibração utilizada.
4. Qual o valor do peso desconhecido? Descrevam a metodologia definida pelo grupo para descobrir o peso.

## 3.2 DOCUMENTOS ANEXADOS

Incluam os arquivos usados para o circuito com o Arduino.