

Projecto – Medição de Massa (Balança)

Sandro Augusto Costa Magalhães, up201304932
Sérgio António Moreira Fernandes, up201305659
03MIEEC06

Resumo—Neste projecto implementou-se uma cadeia de medição – balança – cuja mensuranda é a massa. O sinal foi adquirido e condicionado no seu formato analógico e, posteriormente, convertido para digital onde, cujo valor DC, foi transformado, após um processo de calibração, num valor expresso em gramas.

O projecto descrito apresenta um erro de medição de $\pm 3,68\text{g}$ e é capaz de medir numa gama de 0 a 3,67 kg.

Index Terms—Calibração, medição, sensor, extensómetro, balança, célula de carga, massa, transdutor, LabView

I. INTRODUÇÃO

No âmbito da unidade curricular de medição, sensores e instrumentação, propoemo-nos à elaboração de uma cadeia de medição para a construção de uma balança cuja mensuranda será a massa.

Para iniciar este projecto foi-nos disponibilizada a escolha entre uma régua para medir a massa ou uma célula de carga – tendo nós escolhido a segunda opção, que já estava devidamente montada com os quatro extensómetros e respectivas conexões (figura 1).

Além do circuito de aquisição e condicionamento do sinal que deverá ser feito de forma analógica, todo o resto do projecto deverá ser implementado no software *LabView* que fornece todas as ferramentas de cálculo e funções para o posterior tratamento do sinal digital para o qual será convertido através de uma placa de aquisição montada ao computador das bancada do laboratório.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. Ponte de Medida (Wheatstone)

As pontes de medida [9, cap. 4.4] servem para adquirir sinais de sensores resistivos, sendo muito utilizadas com quatro braços activos, uma vez que permitem uma maior variação da tensão diferencial entre os nós de saída $V_{out} = V_A - V_B$ onde V_A e V_B podem ser calculados por um divisor resistivo cada – $V = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

B. Regressão Linear

A regressão linear [9, cap. 2.5] é um método matemático que permite aproximar um conjunto de pontos que evoluem de forma linear numa dada relação numa equação matemática polinomial de grau um.

Neste método é possível calcular um conjunto de parâmetros que caracterizam o erro da aproximação, como por exemplo o erro quadrático médio que vem nas mesmas unidades da nossa aproximação.

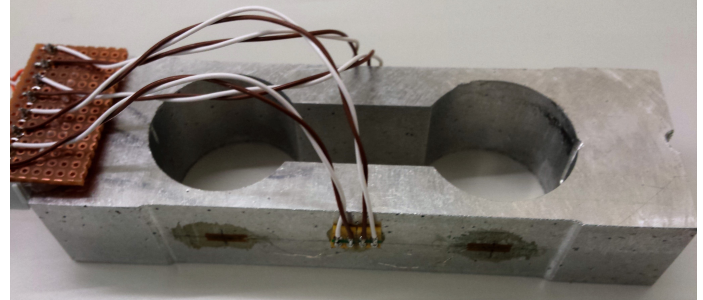


Figura 1: Célula de Carga

C. Incerteza de Medição

“A incerteza do resultado de medição reflete o grau de desconhecimento do valor da mensuranda” [9, p. 49] e pode ser estimado com base em dois tipos de avaliação: avaliação do tipo A – por métodos estatísticos – e avaliação do tipo B, contrário ao primeiro. Ambos os métodos devem ser combinados dentro do possível de forma a garantir o intervalo de erro de cada medição.

III. MATERIAL UTILIZADO

Para que este projecto fosse construído nas melhores condições foi necessário:

- Célula de carga
- 4 Extensómetros N11MA512011
- 1 INA101 (Amplificador de Instrumentação)
- 1 OPA2277
- Placa de Aquisição PCI-6221
- 1 Grampo
- 1 BreadBoard
- Programa LabView, Matlab e FilterPro
- Balança comercial analógica de referência
- Osciloscópio
- Massas (neste caso chumbos de pesca)

A. Célula de Carga

A célula de carga é um transdutor de carga que converte forças e pesos em sinais eléctricos contínuos com o recurso de quatro extensómetros colocados nas extremidades da mesma, como mostra a figura 1.

Devido à sua elevada rigidez ela é capaz de suportar elevadas massas e responde segundo o mecanismo de Roberval e a lei de Hooke ($F = K \cdot \Delta x$) [7].

Esta peça é construída à base de ligas de alumínio com dois orifícios no centro interligados e apresenta as seguintes especificações:

Dimensões: 14 x 4,8 x 2,6 cm
Diâmetro das circunferências: 3,3 cm
Maior distância do orifício: 9,5 cm
Menor distância do orifício: 1cm
Distância entre os extensómetros 6 cm em relação ao centro

B. Extensómetros

Os extensómetros [4] são sensores resistivos [9] sensíveis à deformação, alterando a sua resistência quando sujeitos a uma.

Portanto, podemos facilmente, e de forma linear relacionar, teoricamente, a deformação do extensómetro com a sua resistência e a força que lhe foi aplicada, sabendo que $K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$, onde K é o factor de deformação, e R e L são, respectivamente a resistência e o tamanho do extensómetro do seu estado normal (sem stress) [4].

C. Amplificadores

Para a realização deste projecto também vai ser necessário o uso de dois amplificadores.

O INA101¹ [1] é um amplificador de instrumentação que tem como principal objectivo, tal como a sua *datasheet* indica, a aquisição de sinais diferenciais, nomeadamente de pontes de medição com extensómetros (como esta menciona explicitamente), cuja tensão de saída é muito pequena (na ordem dos milivolts). Ele preza-se por ter características próprias e específicas para a sua função como o seu elevado CMR (rejeição em modo comum) – que impede a intervenção de tensões DC², que possam existir por comparação com sinais com massas ligeiramente diferentes – e as baixas correntes de polarização e tensões de *offset* (desvio).

O ganho do INA101, segundo a sua folha de características [1] pode ser calculado por

$$G = 1 + \frac{40k\Omega}{R_G} \quad (1)$$

A escolha do OPA2277³ [2] teve em busca umas características semelhantes dado que faz parte de um dos estágios de tratamento do sinal, embora a sua exigência não seja tão elevada como a do INA, visto que apenas exerce uma função de filtragem, principalmente no que se refere ao CMR.

D. Placa de Aquisição e LabView

Foi utilizada uma placa de aquisição de sinal PCI-6221⁴ [5] que funciona como um conversor AD (analógico-digital) e tem compatibilidade com a aplicação *LabView* que irá funcionar como a nossa bancada de trabalho virtual (VI⁵), convertendo a tensão de saída do circuito em massa.

¹INA – *Instrumentation Amplifier*, em inglês

²DC – *Direct Component*, componente contínua

³OPA – *Optical Parametric Amplifier* – Amplificador Óptico Paramétrico

⁴PCI – *Peripheral Component Interconnect* – Componente de Interconexão Periférica

⁵VI – *Virtual Instrument* – Instrumento Virtual

IV. METODOLOGIA

Para que a célula de carga pudesse medir as massas, ela foi presa à bancada pela extremidade que possui os conectores com a ajuda de um grampo.

A. Aquisição do Sinal

Para adquirir a variação da resistência provocada pela força das massas conectou-se os fios dos extensómetros da célula de carga a um *header* e montou-se numa ponte de Wheatstone (anexo 3) alimentada a 10V numa breadboard.

B. Amplificação do Sinal

Como o sinal proveniente da ponte é muito pequeno, tivemos de amplificar o sinal recorrendo a um INA101. Pretendemos que este tenha um ganho de aproximadamente 200, portanto, substituímos na equação a resistência R_G [1, p.1] por uma de 220Ω, obtendo um ganho de 181,82. A utilização deste ganho permite-nos obter uma diferença de potencial razoável e perceptível ao osciloscópio [6] com uma escala de 50mV, facilitando o tratamento e a calibração do circuito.

C. Condicionamento do Sinal

Com o osciloscópio da bancada, verificamos que o sinal adquirido estava a ser influenciado pelo ruído, alterando o seu valor DC. Para colmatar este problema recorremos a um filtro activo de segunda ordem Sallen-Key calculado pelo *FilterPro* com uma frequência de corte $f_c = 1,365\text{Hz}$ e um factor de qualidade $Q = 0,957$ (figura 2 e anexo 1).

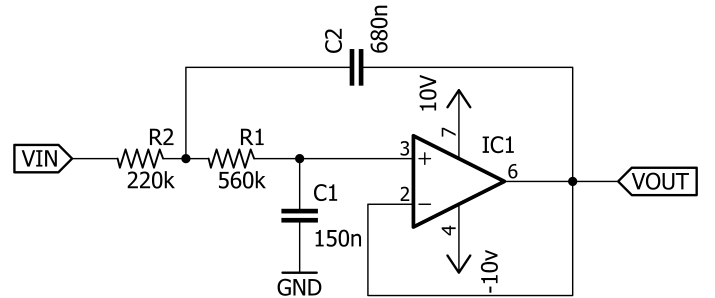


Figura 2: Filtro passa-baixo calculado com o *FilterPro*

Além disso, testamos a utilização de um condensador na saída da ponte de Wheatstone, mas dado o facto que os condensadores cerâmicos serem muito pequenos, o que implica uma frequência de corte muito grande ($f_c = \frac{1}{2\pi RC}$, onde R corresponde à resistência equivalente dos quatro extensómetros, assumimos que aproximadamente 120Ω) o que não nos é interessante devido ao ruído de baixas frequências e o facto de os condensadores electrolíticos terem uma impedância associada muito elevada, não é útil a sua utilização, sendo suficiente o filtro Sallen-Key.

D. Aquisição de Sinal em LabView – Conversão AD

No nosso VI em branco, adicionamos a função DAQ Assist⁶ dentro de um ciclo *while* com um botão de *stop*. Configurámo-la para obter dados numa gama de valores $[-200, 200]$ mV de numa tensão diferencial na entrada ai0 da PCI-6221 [5] com uma taxa de amostragem de 250kHz com 50k amostras e para maximizar a gama de medição da balança ligamos ao pinos 6 e 7 do INA101 [1] um potenciômetro para ajustar a tensão, com a ajuda do osciloscópio, a zero gramas nos -200 mV, permitindo assim uma gama de medição igual à da PCI-6221.

Para podermos visualizar o sinal e conseguirmos calibrar a nossa balança, conectamos à saída de dados da DAQ Assist um *WaveFormGraph* e uma ferramenta de obtenção do valor DC, cujos dados foram transferidos para um *array* (vector) e calculou-se a sua média, sendo mostrado o seu valor final num *value indicator* (figuras 3).

E. Calibração

Dada relação linear da variação da resistência com a deformação do extensómetro, da resistência com a tensão na ponte de Wheatstone e da deformação da célula de carga (lei de Hooke), podemos assumir que todo o sistema evolui de forma linear.

Portanto, medimos a massa de 8 chumbos da pesca numa balança analógica de referência existente no laboratório e medimos a tensão que estas provocavam na cadeia de medição (tabela I), tendo consideração que tínhamos o ponto zero ajustado a -200 mV.

Uma obtida a tabela I, recorrendo ao *software MATLAB* e à sua aplicação *Curve Fitting*, traçamos uma regressão linear (gráfico da figura 4) da tensão em função da massa [9, cap. 2.5], obtendo a equação 2.

$$V = 0,000108967 \cdot m - 0,1994 \quad (2)$$

$$m = \frac{V + 0,1994}{0,000108967} \quad (3)$$

onde m corresponde à massa expressa em gramas e V à tensão em volts.

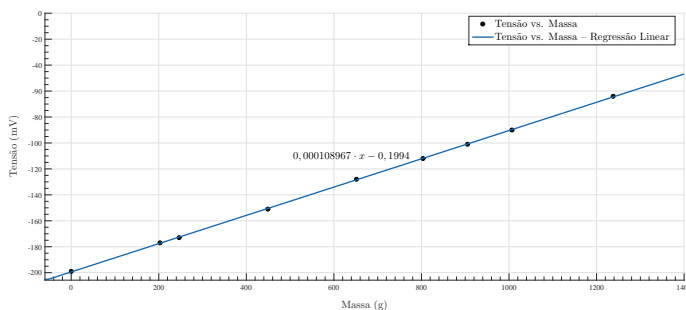


Figura 4: Regressão linear para calibração da balança

⁶DAQ Assist – Data Acquisition Assistant – Assistente de Aquisição de Dados

Qualidade do Ajuste — M vs. V	
SSE	$1,352 \times 10^{-6}$
R-square	0,9999
Adjusted R-square	0,9999
RMSE	0,0004395
Qualidade do Ajuste — V vs. M	
coeficiente 1	9176
coeficiente 2	1830
SSE	113,9
R-square	0,9999
Adjusted R-square	0,9999
RMSE	4,033

Tabela II: Qualidade do ajuste da recta de regressão linear para calibração da cadeia de medição – obtida do *MATLAB* – e da recta da massa vs. tensão

F. Conversão para a nossa mensuranda

Uma vez obtida a equação 3 por dedução da 2, podemos rapidamente transformar a nossa grandeza eléctrica em volts na massa mensuranda em gramas.

No nosso VI, utilizamos a média dos valores DC obtidos e transformámo-los pela equação 3, somando-lhe, primeiramente $-0,1994$ e depois dividindo por $108,967 \times 10^{-6}$, de onde resulta um valor expresso em gramas. Este último resultado, foi seguidamente impresso num *XYGraph* numa função com o tempo, num *classic number* (número clássico) e num *Classic Gauge* (medidor clássico).

Por análise mais aproximada à nossa equação, e em comparação com o gráfico da figura 4 e a tabela I, conseguimos concluir que o valor somado ao tensão DC instantânea, $-0,1994$, corresponde ao valor do DC ao qual a massa que estamos a calcular é nula, permitindo-nos assim reajustar através do *LabView* o valor do zero da função. Para isto, criamos um *OK Button* ao qual chamamos *TARE* e usando uma condição *Case* definimos que quando pressionamos este botão o valor DC naquele instante é transmitido para o ciclo *while* como um *shift register* e que é usado como o novo valor do zero, em substituição de $-0,1994$. Este valor é continuamente armazenado no ciclo até que seja novamente pressionado o botão *TARE*.

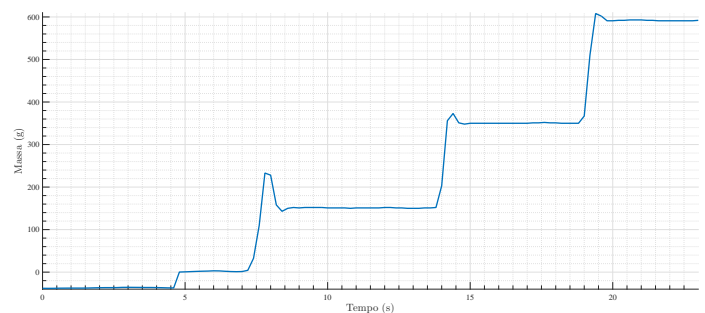


Figura 5: Gráfico de medição de três massas em função do tempo – 152,30g, 202,10g e 246,55g, sucessivamente somadas

V. ANÁLISE CRÍTICA DE RESULTADOS

	Tipo A (u_i)	Tipo B (u_j)
Análise 30 Medições	1,81	
Regressão Linear (EQM) INA101	0,510	1,83 m
OPA2277		1,83 m
TOTAL	1,88	2,59 m

Tabela III: Incertezas-padrão [9, p.58]

De acordo com a tabela III e com a equação 4, temos uma incerteza-padrão total de $u_c(m) = 1,88g$. Considerando um intervalo de confiança de 95%, através da equação 5 onde EQM é a nossa incerteza, podemos assumir que um valor da medição estará num intervalo de 3,68g. Embora nem todas as fontes de erro tivessem sido analisadas.

$$u_c(y) = \sqrt{u_{cA}^2(y) + u_{cB}^2(y)} \quad (4)$$

A. Avaliação do tipo A

Para realizar esta análise, realizamos um conjunto de 30 medições (tabela IV) nas mesmas condições, isto é, antes de cada medição fizemos um *TARE*, para reposicionar o zero da medição e medimos a mensuranda.

Uma vez obtidos todos os pontos, verificamos que este seguiam um distribuição normal e calculamos, recorrendo à aplicação *Distribution Fitting* do *MATLAB* a curva de distribuição normal [10][9] da figura 6 e respectivos valores (apresentados na legenda). Numa primeira análise podemos dizer que a nossa medição teve um erro absoluto de $|m_{real} - \mu_m| = 3,79g$.

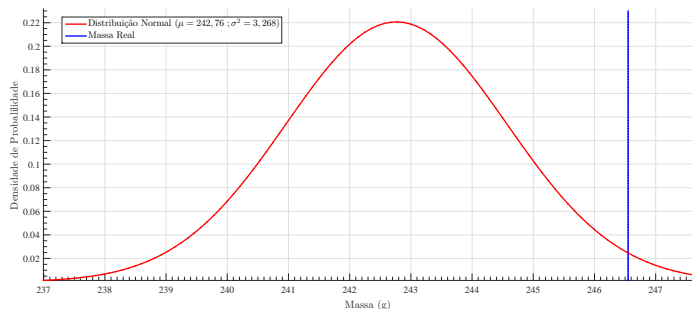


Figura 6: Distribuição Normal da medição da tabela IV

No que se refere ao erro correspondente à recta de calibração, sabe-se que o EQM⁷ é de 0,999 para a recta $V(m)$ e o mesmo para a recta da $m(V)$, pela tabela II, por isso é possível dizer-se que a incerteza da nossa equação é de 0,999g. Como o *MATLAB* calcula o EQM para um intervalo de confiança de 95%, pela equação 5 com $k = 1,96$, calculamos que $u_i(m) = 0,510$.

$$u_i(x) = \frac{EQM}{k} \quad (5)$$

⁷EQM – Erro Quadrático Médio

Outras fontes de erros mais complexas de complexas de calcular e que exigiam um conjunto de medições para uma inferência estatística [10] são as das tensões de *offset* (figura 7) causadas pela placa *breadboard*.

B. Avaliação do tipo B

Para a avaliação dos erros do tipo B, temos, como exemplo os erros provenientes dos amplificadores.

Segundo a *datasheet* do INA101 [1, p.2], este apresenta duas fontes de erro principais, as tensões de *offset* ($250 + \frac{900}{G}(\mu V)$) e o erro de ganho ($0,1 + 0,0003 \cdot G - \frac{0,02}{G}(\mu V)$). Isto, sabendo que temos um ganho de 181,82 resulta num erro total de $255,10\mu V$ que, pela equação 2 resulta num erro de 1,83mg.

No que se refere ao OPA2277, segundo a sua *datasheet* [2, p.8], sabe-se que este tem uma tensão de *offset* de $50\mu V$ o que resulta num erro de 1,83mg, pela equação 2.

VI. CONCLUSÃO

Podemos concluir que a nossa cadeia de medição não apresenta um elevado rigor, contudo permitiu-nos compreender o funcionamento e a construção das cadeias de medição e como calcular os seus respectivos erros.

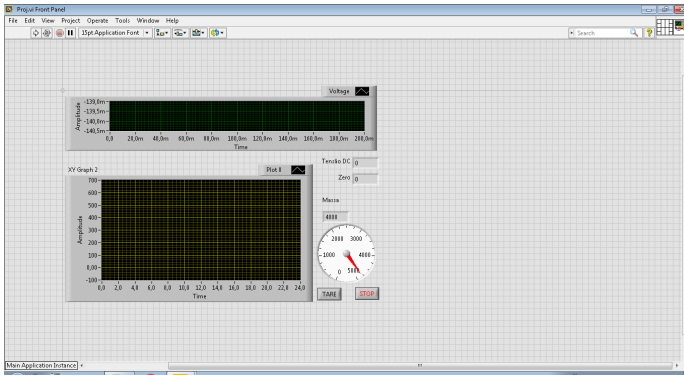
A elaboração deste projecto foi deveras construtiva, preparando-nos para a construção de futuras cadeias de medição.

REFERÊNCIAS

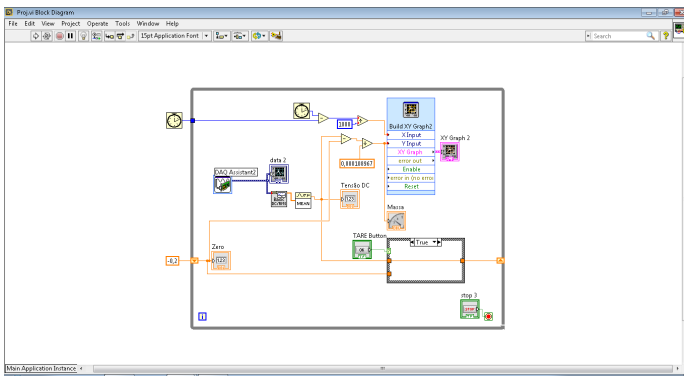
- [1] “High accuracy instrumentation amplifier,” Burr-Brown Corporation, Datasheet INA101, July 1998. [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/ina101>
- [2] “Opax277 high precision operational amplifiers,” Burr-Brown Corporation, Datasheet OPA2277, Jun., 2015 1999. [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/opa277>
- [3] “Breadboard – wikipedia, the free encyclopedia,” https://en.wikipedia.org/wiki/Breadboard/#Typical_specifications, Dec. 10, 2015.
- [4] “Strain gauges and load cells,” RS Components, Datasheet N11MA512011, Mar. 1996.
- [5] “Ni 622x specifications,” National Instruments Corporation, Datasheet PCI-6221, Jun. 2007.
- [6] “LeCroy waveace oscilloscope - getting started manual,” LeCroy Corporation, User Manual WA-GSM-E-RevA, August 2008.
- [7] “Ishida - technologies - load cell,” 2011. [Online]. Available: <http://www.ishida.com/technologies/loadcell/html.html>
- [8] W. Callister and D. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition*. Wiley, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=Oa1bAAAAQBAJ>
- [9] A. J. d. C. Campilho, *Instrumentação electrónica Métodos e técnicas de medição*, ser. Coleção Manuais 2. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000, aurélio Campilho il. 30 cm.
- [10] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

ANEXOS

- 1) VCVS.pdf – Relatório do filtro passa-baixo
- 2) Projecto.vi – Instrumento virtual
- 3) Circuito eléctrico da montagem
- 4) Gráficos e imagens do relatório em tamanho original



(a) Painel Frontal



(b) Painel de Controlo

Figura 3: VI construído em LabView

Massa (g)	Tensão (V)
0	-0,199
202,75	-0,177
246,35	-0,173
449,1	-0,151
651,4	-0,128
803,55	-0,112
905,35	-0,101
1006,6	-0,090
1237,85	-0,064

Tabela I: Tabela de valores para a calibração da Balança

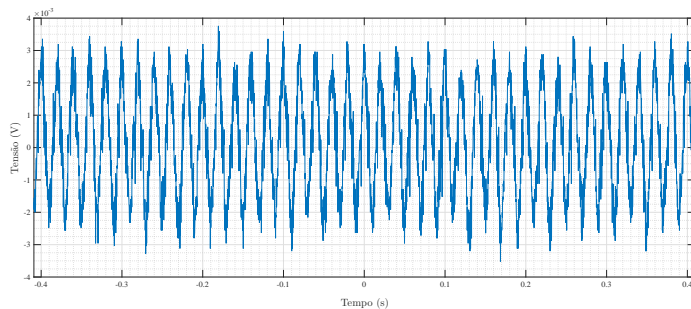


Figura 7: Ruído electrostático da *breadboard*

VALOR TEÓRICO	
246,55	
VALOR MEDIDO	

1°	243.3
2°	244.5
3°	244.4
4°	243.8
5°	247.5
6°	242.8
7°	243.5
8°	242.8
9°	237.1
10°	243.3
11°	242.1
12°	243.4
13°	240.8
14°	242.2
15°	242.4
16°	242.5
17°	237.8
18°	241.6
19°	240.5
20°	243.4
21°	242.3
22°	241.8
23°	243.3
24°	244.3
25°	242.6
26°	243.3
27°	241.5
28°	241.1
29°	244.4
30°	243.8
31°	240.7
32°	242.8
33°	243.1
34°	243.1
35°	242.2
36°	245.8
37°	243.7
38°	243.2
39°	244.6
40°	242.6
41°	242.1
42°	238.2
43°	244.1
44°	242.8
45°	242.3
46°	242.8
47°	244.3
48°	244.6
49°	243.4
50°	243.7

Tabela IV: Tabela de Medição para o calculo do erro