

Extensómetro – célula de carga de 5kg

Relatório final de Eletrónica Aplicada

Anaísa Cristina Pereira Carvalho

Departamento de Engenharia Eletrotécnica
ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
Porto, Portugal
1150389@isep.ipp.pt

Rodolfo Ricardo Pinto Almeida

Departamento de Engenharia Eletrotécnica
ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
Porto, Portugal
1131158@isep.ipp.pt

Abstract - As part of the curricular unit of Electrónica Aplicada, integrated in the degree de Engenharia Electrotécnica e de Computadores of ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) has been developed a project regarding the implementation of electronic analogue sensor. This project required the amplification, rectification and conditioning of its generated signal. This signal was then converted into a digital form to provide the means of measuring of integrating it in software. In this document its described the procedure taken upon a load cell for 5 Kg, dividing and conditioning the provided signal in two different manners and multiplexing it into an Arduino Mega 2560.

Keywords— *Célula de carga; Sensor resistivo; Análise sensor; Balança; Amplificador de instrumentação; Ponte de Wheatstone; Condicionamento de sinal; Conversão A/D; Arduino Mega 2560;*

I. INTRODUÇÃO

O trabalho descrito neste artigo recai sobre uma célula de carga de 5Kg com o objetivo de recriar de uma balança. Para isso, foram recriadas diversas experiências de forma a testar os parâmetros da célula. Após o estudo da mesma, foi utilizado um amplificador de instrumentação para amplificar o sinal proveniente da célula de forma a que este fosse mais facilmente mensurável. Todo o estudo e criação do circuito foi realizado recorrendo ao software ORCAD CAPTURE CIS, de forma a simular e testar o comportamento do mesmo. Como se pretendia que à saída do circuito se obter-se duas resoluções de leitura diferentes implementou-se um Schmitt Trigger e dois condicionamentos de sinal. Estes três circuitos foram ligados a um multiplexer que posteriormente se encontrava ligado a um conversor analógico/digital (A/D). Após ser obtido o sinal digital este é enviado para a interface gráfica desenvolvida no âmbito deste projecto.

II. CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DO PROJECTO

A. Diagrama de blocos do circuito

O diagrama de blocos [1] representativo do circuito que foi desenvolvido encontra-se representado na figura 1 deste artigo. O circuito consiste em uma célula de carga de 5 Kg, ligada a

uma ponte de Wheatstone (de forma a linearizar o sinal proveniente da célula) e a um amplificador de instrumentação (AI) de forma a que seja amplificado o sinal proveniente da célula de carga que se encontra na ordem dos 0 mV aos 5 mV para um sinal na ordem dos 0 V aos 5 V. Como era pretendido que fosse realizada a leitura do sinal com duas resoluções distintas, foram implementados no circuito dois condicionamentos de sinal diferentes, de forma a que cada um possuisse a sua resolução. Pretendeu-se que para a gama de peso de 0 a 2 Kg a resolução fosse de 0.25 V/0.1 Kg, que por consequência levou a que a resolução da gama de 2 Kg a 5 Kg se encontrasse em 0.17 V/0.1 Kg. Para que a comutação entre os condicionamentos de sinal fosse realizada sem intervenção humana, implementou-se no circuito um Schmitt Trigger e um multiplexer. O referido multiplexer, possuía como sinais de entrada os condicionamentos de sinal, e também o sinal de controlo proveniente do Schmitt Trigger. Na saída do multiplexer sai o sinal com a referida resolução que é ligado a uma porta analógica/digital da placa de desenvolvimento Arduino Mega 2560 de forma a converter o sinal analógico em um sinal digital com uma resolução de 10 bits. Finalmente, o sinal digital é mostrado em computador, num programa desenvolvido em C++, que mostra o valor medido pela célula de carga.

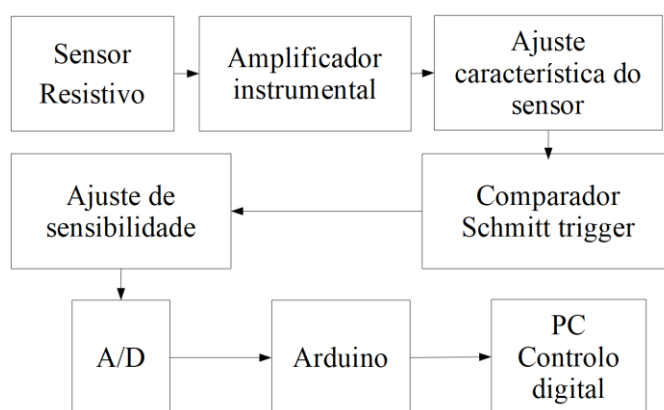


Figura 1: Diagrama de blocos do projeto

B. Lista de material utilizado neste projecto

- 1 Célula de carga de 5 Kg
- 2 circuitos integrados: TL084
- 1 Multiplexer: CD74HC4051
- 1 Arduino Mega 2560
- 1 diodo N4148
- 1 resistência de valor: $100\ \Omega$ / $120\ \Omega$ / $200\ \Omega$ / $3.9\ k\Omega$ / $12\ k\Omega$ / $20\ k\Omega$ / $150\ k\Omega$
- 2 resistências de valores: $1.2\ k\Omega$ / $1.5\ k\Omega$ / $2.2\ k\Omega$ / $33\ k\Omega$ / $56\ k\Omega$
- 3 resistências de valor: $1\ k\Omega$
- 6 resistências de valor: $100\ k\Omega$

C. A célula de carga e a ponte de Wheatstone

A célula de carga de 5 Kg utilizada neste trabalho possui uma variação linear com uma sensibilidade de $1\ mV/V$. Esta célula possui quatro fios de ligação, tal como representado na figura 2. O fio vermelho representa a alimentação da célula que é de $+5\ V$ e o fio preto é ligado à massa do circuito. Os fios branco e verde representam a variação de tensão aos terminais da ponte de Wheatstone que já se encontra integrada nesta célula de carga e encontram-se representados nas simulações como pontos A e B. Pelo facto de ser uma célula de carga fornecida pelo docente da disciplina, não existia o respetivo datasheet, tendo por isso assumido os padrões de mercado [2] e realizado dados experimentais sobre a mesma. Para mais detalhes sobre esta parte do circuito, consultar o relatório entregue anteriormente.



Figura 2: Célula de Carga

D. Amplificador de instrumentação

O circuito do amplificador de instrumentação (AI) encontra-se representado na figura 3. Os pontos A e B representam a saída da ponte de Wheatstone e a sua entrada

nos pinos do circuito integrado TL084. O TL084 é um circuito integrado que possui 4 amplificadores operacionais (ampop's). No primeiro ampop definido pelos pinos 1,2 e 3 entra o lado B proveniente da ponte de Wheatstone - fio verde da célula de carga. No segundo ampop identificado pelos pinos 5,6 e 7 entra o lado A da ponte de Wheatstone - fio branco da célula de carga. O terceiro ampop (pinos 8,9 e 10) realiza a amplificação do sinal proveniente dos ampop's 1 e 2. Este sinal é referido como sendo v_1 em todos os esquemas elétricos simulados e durante o texto deste artigo.

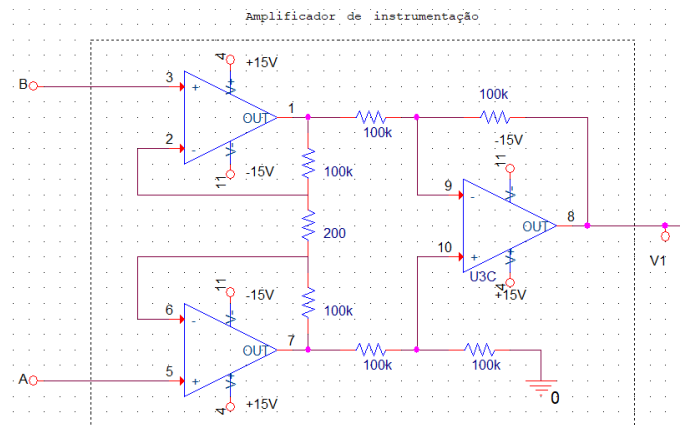


Figura 3: Circuito representativo do amplificador de instrumentação

E. Schmitt Trigger

O Schmitt Trigger é um circuito comparador que funciona analogicamente por implementação de uma histerese proveniente do ampop. A histerese associada a este tipo de circuitos é necessária e importante para que quando a medida efetuada pelo sensor quando se encontra no ponto de comutação não oscilar constantemente entre as diferentes resoluções implementadas. O circuito de Schmitt Trigger é necessário neste projeto para realizar a comutação entre os condicionamentos de sinal de forma a que se obtenham as duas gamas de resolução diferentes. Foi definido que a primeira gama de resolução é para medições de massa no intervalo de $0\ Kg$ a $2\ Kg$. A segunda gama de resolução encontra-se definida para o intervalo de $2\ Kg$ a $5\ Kg$. O ponto de comutação encontra-se para uma massa na célula de carga igual a $2\ Kg$, que dependendo da histerese do circuito a sua resolução pode estar na primeira ou na segunda gama, no entanto nunca a oscilar entre ambas. De acordo com os dados experimentais obtidos anteriormente, para uma massa igual a $2\ Kg$ a tensão medida correspondia a $1.86\ V$, logo o Schmitt Trigger deste circuito encontra-se dimensionado para comutar a uma tensão de $1.86\ V$. O circuito simulado para o Schmitt Trigger encontra-se na figura 4. Para a elaboração do Schmitt Trigger, implementou-se o circuito utilizando o quarto ampop do TL084 (pinos 12,13 e 14). De forma a que a saída do Schmitt Trigger não atingisse tensões negativas, foi acrescentado ao circuito um diodo de referência N4148, para

limitar a tensão de saída do Schmitt Trigger a 5 V implementou-se no circuito um divisor de tensão. Os parâmetros calculados para este circuito encontram-se descritos nas seguintes fórmulas [3], as quais possuem como parâmetros: $V_{ref}=1.86$ V, $V_I=1.85$ V e $V_S=1.87$ V.

$$\begin{cases} V_S = V_{ref} \cdot \frac{R_3+R_4}{R_4} - \frac{R_3}{R_4} \cdot (-15) \\ V_I = V_{ref} \cdot \frac{R_3+R_4}{R_4} - \frac{R_3}{R_4} \cdot (15) \end{cases} \quad (1)$$

Na fórmula 2, é mostrada qual a razão entre as resistências correspondentes ao circuito comparador.

$$R_4 = 1500 \cdot R_3 \quad (2)$$

A partir da razão mostrada na fórmula 2, e assumindo $R_3 = 100 \Omega$ concluem-se os cálculos para o circuito na fórmula 3.

$$R_3 = 100 \Omega \Rightarrow R_4 = 150 k\Omega \quad (3)$$

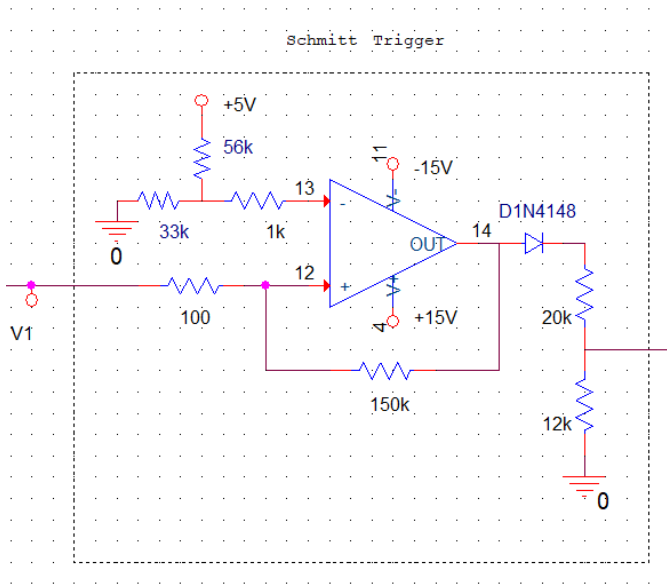


Figura 4: Circuito representativo do Schmitt Trigger

Na simulação da figura 5, é possível de visualizar a cor vermelha o sinal de saída do AI (sinal ao qual se pretende inserir dois condicionamentos de forma a possuir duas resoluções de leitura) e a cor verde o sinal lógico proveniente do Schmitt Trigger. Para o valor lógico zero irá ser aplicado o condicionamento de sinal 1 e para o valor lógico cinco será aplicado o condicionamento de sinal 2.

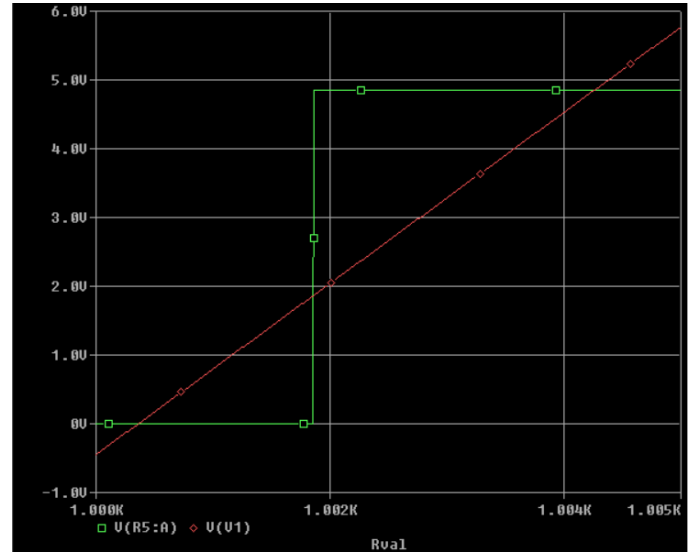


Figura 5: Saída do Schmitt Trigger proveniente da simulação

F. Condicionamento de sinal 1

A saída do Schmitt Trigger foi dimensionada para que até ao ponto de comutação (tensão proveniente do amplificador de instrumentação igual a 1.86 V) a saída lógica fosse igual a zero, e após esse ponto a saída lógica fosse igual a cinco. O condicionamento de sinal 1, foi criado para que no intervalo de zero a dois quilogramas, fosse obtida uma resolução igual a 0.25 V/0.1 Kg. A representação deste circuito encontra-se na figura 6. Como o sinal proveniente do AI para 0 Kg é de valor negativo, foi utilizado um divisor de tensão partindo de potencial inicial de -15 V, através da expressão matemática descrita em 4.

$$V_{divisor} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1+R_2} \quad (4)$$

Condicionalmento de sinal 1 (2kg - 5kg)

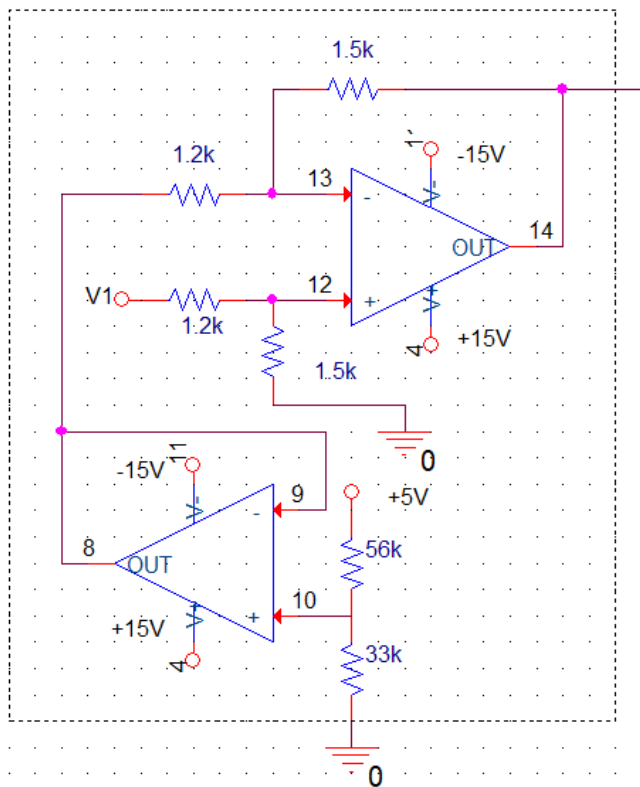


Figura 6: Circuito do condicionamento de sinal 1

Como visualizado na figura 7, a saída do condicionamento de sinal 1 é representada por uma reta verde que varia dos 0 V aos 15 V. No ponto em que esta atinge os 5 V intersecta a comutação de tensão (passagem dos -15 V para +15 V) do Schmitt Trigger. Desta forma é realizada a primeira resolução de leitura, ou seja, para o valor lógico zero (recta negativa vermelha) a curva de saída que o circuito “lê” é apenas dos 0 aos 5 V do condicionamento 1.

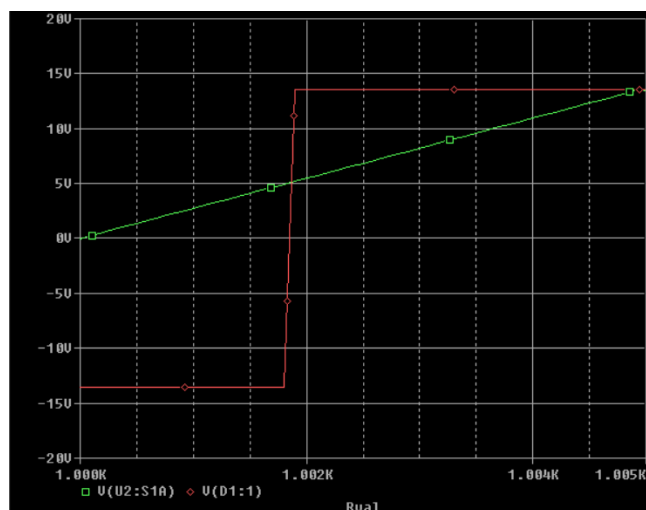


Figura 7: Saída do condicionamento de sinal 1

G. Condicionalmento de sinal 2

Para o condicionamento de sinal 2 pretendia-se que este recomeçasse a leitura a 0 V até aos 5 V, mas para o valor lógico de cinco do Schmitt Trigger. Para que fosse possível baixar a tensão. Novamente foi aplicado um divisor de tensão a partir dos 5 V para se obter 1,86 V, descrito na fórmula 4. O esquema do deste condicionamento de sinal encontra-se na figura 8.

Condicionalmento de sinal 1 (2kg - 5kg)

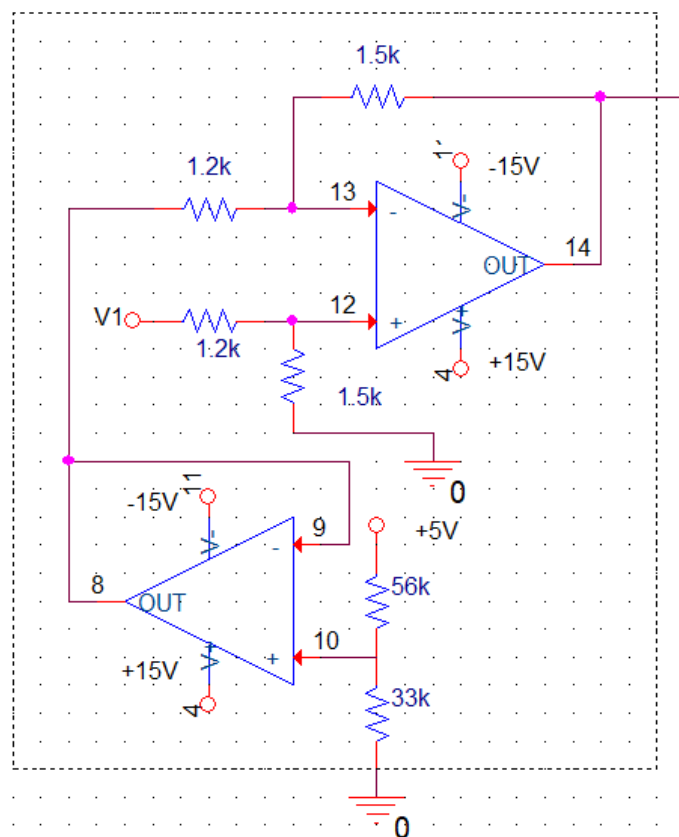


Figura 8: Circuito de condicionamento de sinal 2

Como visualizado na figura 9, o sinal proveniente do condicionamento 2 possui um intervalo dos -3 V aos 5 V, interpolando-se com o sinal do Schmitt Trigger aos 0 V e num dos pontos de comutação do último. Como o valor lógico comutou, o circuito irá “ler” o intervalo dos 0 V aos 5 V do condicionamento 2, ou seja, a nova gama de resolução do circuito.

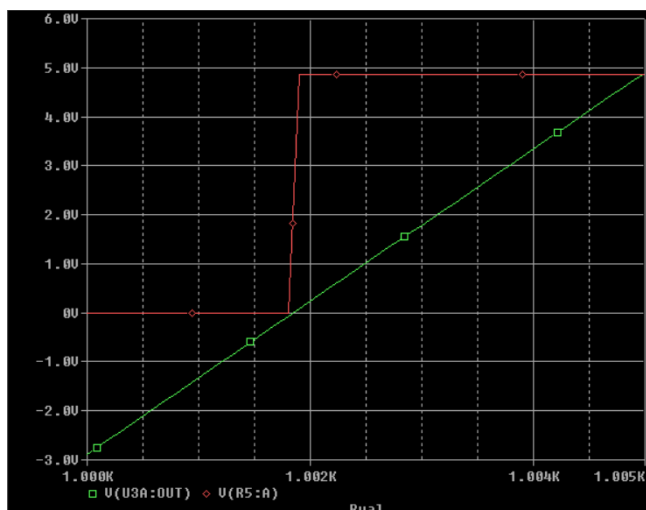


Figura 9: Saída do condicionamento de sinal 2

H. O Multiplexer

O multiplexer é um circuito integrado lógico que tal como o nome indica, permite que seja feita uma seleção de vários sinais às suas entradas para uma saída/saídas comum(s). O multiplexer utilizado corresponde à referência CD74HC4051 [4] fabricado pela Texas Instruments, cujo esquema de pinos se encontra na figura 10. Neste caso, o sinal de controlo é o sinal proveniente do Schmitt Trigger, ligado no pino 11, e os sinais de entrada são respetivamente o condicionamento de sinal 1 no pino 13, e o condicionamento de sinal 2 no pino 14. Como o programa Capture CIS que utilizamos não possuía este multiplexer na sua biblioteca, para efeitos de simulação recorreremos ao multiplexer ADG409 que é equivalente.

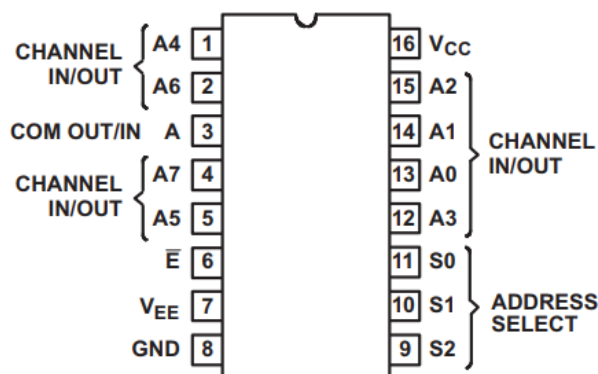


Figura 10: Pinos do multiplexer CD74HC4051

No entanto, o resultado na simulação pode ser analisado na figura 11, em que se encontra representado a cor verde a saída do multiplexer com as respetivas variações de acordo com os condicionamentos de sinal anteriormente explicados e a cor vermelha o circuito de Schmitt Trigger demonstrado que nos pontos de comutação esta ocorre. Como existe histerese associada ao circuito de Schmitt Trigger a linha de comutação

não é paralela ao eixo vertical, mas sim um pouco inclinada devido à histerese. A saída do sinal proveniente do multiplexer é realizada no pino 3 e para que este seja tratado digitalmente é ligado ao conversor analógico/digital.

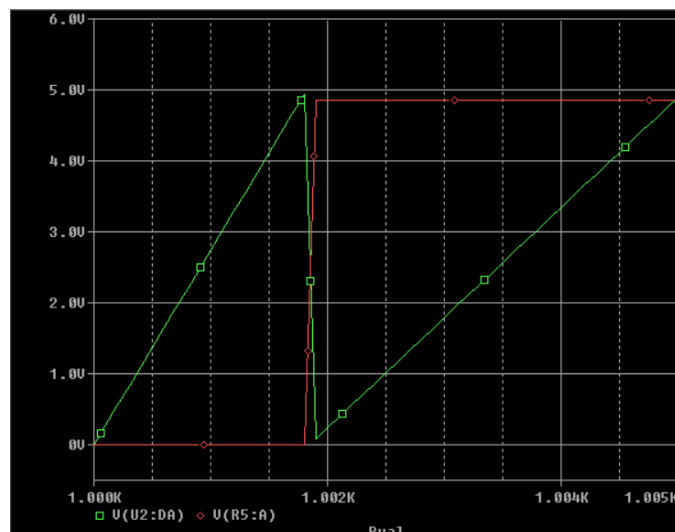


Figura 11: Saída do multiplexer

I. Valores experimentais

De forma a testar todas as fases de montagem do circuito foram retirados valores experimentais e comparados com as simulações realizadas no PSPICE.

Na tabela 1, encontram-se os valores experimentais obtidos.

Tabela 1: Tabela de dados experimentais

Massa (Kg)	Saída do Amplificador Instrumental (V)	Schmitt Trigger (V)	Schmitt Trigger – valor lógico	Saída do multiplexer
0	-0.52	-13.54	0.00	-0.32
1	0.54	-13.52	0.00	2.03
2	1.62	-13.51	0.00	4.54
3	2.64	14.05	4.99	2.12
4	3.79	14.06	4.99	3.30
5	4.87	14.05	4.99	4.68

III. TRATAMENTO DIGITAL DO SINAL

Para poder mostrar os valores obtidos pelo sensor de forma digital, é necessário realizar a sua conversão de valor analógico para digital. Recorreu-se ao conversor A/D que já está integrado na placa de desenvolvimento Arduino para realizar a conversão do sinal. De forma a visualizar graficamente os dados e não apenas em linha de comandos criou-se um software em linguagem C++ para o efeito.

A. Conversão analógica/digital

A conversão do sinal analógico em sinal digital, foi realizada através do A/D integrado na placa de desenvolvimento Arduino Mega 2560. A utilização de um conversor externo foi descartada na fase de projecto do circuito, tendo em conta a já existência de um A/D na placa Arduino que possui uma resolução de 10 bits.

A conversão é realizada por comparação do sinal (analógico) lido, com uma tensão de referência (neste caso 5 V de alimentação do Arduino). A tensão de referência é dividida em 2^{10} patamares, entre 0 e 1023, valores que poderão ser interpretados com clareza digitalmente.

Do sinal analógico de amplitude variável e contínuo no tempo, todos os valores compreendidos entre $\frac{n \times 5}{1024}$ e $\frac{(n+1) \times 5}{1024}$ é atribuído um valor de amplitude constante, binário com 10 bits, analisado e tratado digitalmente de forma a ser obtida uma aproximação do peso que está a ser medido pela célula de carga, pela seguinte fórmula:

$$m = \frac{Ad \cdot 5}{1024} \quad (5)$$

Onde m corresponde à massa do objecto a ser pesado, Ad corresponde ao valor fornecido pelo conversor A/D.

B. Arduino Mega 2560

O sistema Arduino é composto por duas componentes, uma de hardware e outra de software, ambas open-source que pretendem permitir a fácil e rápida prototipagem de sistemas de controlo digital. Na sua maioria são compostas por um microcontrolador Atmel e diversos periféricos relevantes, facilmente programáveis através do próprio ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês Integrated Development Environment – IDE). [5]

A placa Arduino Mega 2560 integra um microcontrolador Atmega2560 de 16 MHz e um A/D de 10 bits de resolução com 15 entradas analógicas (A0 a A14), das quais foram utilizadas as entradas:

1. A0 de forma a poder interpretar qual o condicionamento de sinal a ser aplicado ao sinal proveniente do amplificador de instrumentação;
2. A1, entrada onde é aplicado o sinal proveniente do multiplexer, variável entre 0 V e 5 V.

O Atmega2560 foi programado através das ferramentas disponibilizadas pela Arduino e a linguagem de programação do mesmo que consiste num conjunto de macros e protótipos de funções baseadas na linguagem de programação C/C++, bem como o auxílio de uma biblioteca externa, também associada a uma licença open-source (GPLv2).

C. O software criado para leitura digital

De forma a, uma vez mais, serem aproveitados ao máximo os recursos disponibilizados pelos diversos componentes constituintes do circuito utilizado para a realização do projecto, recorrendo ao poder de processamento do Atmega2560, toda a interface gráfica e tratamento dos dados provenientes do A/D foram processados na íntegra pelo microcontrolador, utilizando apenas o computador como terminal série para visualização da interface criada e para introdução de input para interatividade com o micro.

A interatividade com o microcontrolador e visualização dos seus resultados consiste numa interface de texto (do inglês text-based user interface – TUI) implementada com a biblioteca ncurses, desenvolvida por Frank Meyer [6], simplificação e adaptação da biblioteca ncurses.

A biblioteca ncurses, distribuída com a licença MIT, permite a criação de software com interface em linha de comandos (do inglês command line interface – CLI) que se assemelhem a interfaces gráficas (do inglês graphical-based user interface), compatíveis com terminais do tipo V100 (terminais criados nos anos 70 que permitiam a utilização de código ANSI para criação de interfaces com o utilizador)-tecnologias que não são largamente relatadas neste documento por se afastarem do propósito do mesmo.

Para a simulação de um terminal VT220 – terminal com a qual a biblioteca ncurses é compatível, segundo o seu autor é utilizado o software Putty, também registado com a licença GPLv2.

O microcontrolador fica responsável pela construção dos conjuntos de caracteres que serão enviados para o computador através da comunicação série, integrada no módulo USB do Arduino compondo a interface visualizada no terminal simulado pelo Putty.

CONCLUSÕES

Este projecto permitiu uma abordagem diferente aos conceitos de electrónica abordados durante as restantes unidades curriculares desta licenciatura. O facto de ser requerido que todo o projecto seja realizado de forma analógica permite perceber melhor o funcionamento da microelectrónica subjacente, mesmo existindo circuitos integrados que o realizem de uma forma mais directa, esses não permitem a compreensão total do seu funcionamento.

REFERENCIAS

- [1] Costa, Ricardo, Apointamentos teóricos, UC de Electrónica Aplicada, 2019
- [2] Load Cell: página web, acedida através do link: https://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html?fbclid=IwAR25F3mnB54RRqx4t7Cex1czCx5vKdJBqKhxk2IcOMO-fycBviMzvF_4B7U
- [3] Marques, Avelino, Apointamentos teóricos, UC de Electrónica 1 e 2, 2018/2019
- [4] Datasheet multiplexer consultado em página web, acedida através do link: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4051.pdf>

- [5] Documentação Arduino consultada n página web:
<https://www.arduino.cc/>
- [6] Documentação online sobre a biblioteca mcurses, acedida através do
link: <https://github.com/ChrisMicro/mcurses>
- [7] Documentação online sobre a biblioteca ncurses, acedida através do
link: https://invisible-island.net/ncurses/ncurses.faq.html#what_is_it
- [8] Documentação online sobre standards internacionais ANSI, acedida
através do link: <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-048.html>