

# Controlo de um motor de corrente contínua

## Relatório descritivo do projeto

Erendiro Pedro  
Instituto Superior de Engenharias do Porto  
ISEP  
Porto, Portugal  
1160555@isep.ipp.pt

Elmer Graça  
Instituto Superior de Engenharias do Porto  
ISEP  
Porto, Portugal  
1161424@isep.ipp.pt

**Abstract**—Este artigo tem o intuito de investigar, analisar e evidenciar aspectos da eletrônica analógica de modo a poder suportar um projeto com foco no controlo de um motor. Este debruça-se sobre alguns métodos de condicionamento de sinais analógicos, assim como a sua conversão para digital e a seleção do circuito mais indicado para satisfazer o projeto pretendido.

**Keywords**—*Ponte de Wheatstone; motor dc; controlo; arduino uno; eletrônica analógica; amplificador operacional*

### I. INTRODUÇÃO

No âmbito da cadeira de Eletrônica Aplicada (ELEAPL), do curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Instituto Superior de Engenharias do Porto foi proposta a realização de um projeto académico incidente sobre a área da eletrônica analógica, com um foco particular no condicionamento do sinal de um sensor analógico e a sua posterior conversão para digital.

Assim sendo, para a prossecução do projeto utilizar-se-ão os seguintes componentes:

- 1 resistência 100 Kilo Ohm;
- 2 resistências 71 Kilo Ohm;
- 2 resistências 10 Kilo Ohm;
- 4 resistências 220 Ohm;
- 2 Breadboard (400 pontos e 200 pontos);
- 2 Arduínos Uno;
- 1 LCD alfanumérico 16X2;
- 3 LEDs (vermelho, amarelo, azul);
- 2 interruptores de pressão;
- 1 extensómetro resistivo 30-81794 Modelo 402;
- 1 conversor analógico-digital ADC MCP3002;
- 1 amplificador operacional TL082;
- 1 fonte de alimentação DC;
- 1 Sensor de temperatura TMP26;
- 1 Motor DC 6/9V;
- 1 bateria 9V;

1 ponte H L293D.

Sob estes parâmetros, o projeto aqui exposto consiste num sistema de controlo de funcionamento de um motor dc mediante a deformação sofrida na armadura e a temperatura monitorada do motor. As deformações sofridas na armadura serão calculadas consoante a força aplicada sobre a mesma, esta leitura que por sua vez será efetuada com recurso a um extensómetro (30-81794 Modelo 402). A temperatura do motor será mensurada recorrendo ao sensor de temperatura (TMP36).

### II. ESTADO DA ARTE

O extensómetro é um transdutor capaz de medir deformações mecânicas que um corpo sofre. A construção típica do extensómetro consiste em um fio percorrendo em ziguezague ligando dois pontos (terminais). O extensómetro é acoplado a um corpo de forma que a reta imaginária que une os dois terminais fique perpendicular à tensão que vai causar a deformação que se pretende medir, assim quando ocorre uma deformação, o fio sofre distensão ou compressão, variando a resistência. Esta variação de resistência é usada em um circuito elétrico de forma que se tenha à saída uma variação de tensão que é depois processada por outros circuitos elétricos[1], como por exemplo as máquinas de tomografia computadorizada nos hospitais, ou ainda na construção de pontes por meio de cabos de tensão, de forma a possibilitar uma monitorização em tempo real, e dentro do contexto do projeto, é utilizado para medir o torque aplicado por motores, turbinas, geradores, etc, normalmente em usinas de energia, navios, refinarias, automóveis e indústria em geral [2][3].

### III. METODOLOGIA

Tendo como suporte a investigação feita, o projeto segue a seguinte metodologia:

Primeiramente é feita a leitura das grandezas físicas e a sua conversão para grandezas elétricas, em seguida o seu condicionamento (por meio dos circuitos julgados mais apropriados), depois a conversão deste sinal para digital (usando o ADC MCP3002), e por fim este será enviado para um microprocessador (Arduino Uno), responsável pelo tratamento dos dados e a respetiva ação sobre os atuadores.

Dito isto, num panorama geral o projeto pode ser descrito pelo seguinte diagrama de blocos:

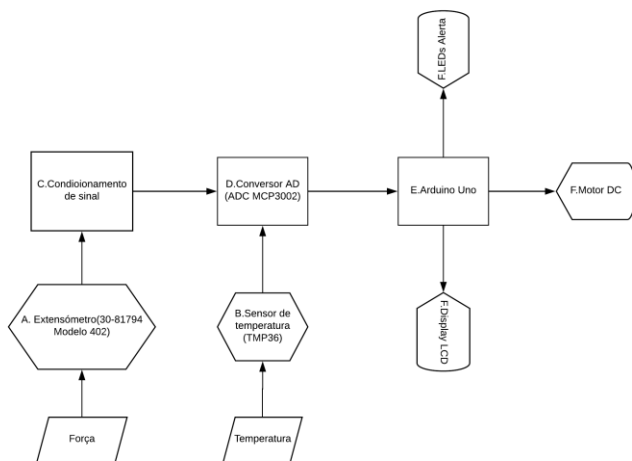


Fig. 1. 1 Diagrama de blocos

#### A. Extensômetro (30-81794 Modelo 402)

Este será um dos blocos responsáveis por fazer a conversão da grandeza física em análise para a grandeza elétrica pretendida, neste caso, força para resistência (e posteriormente tensão).

Como já foi referido o extensômetro utilizado no desenvolvimento deste projeto é o “30-81794 Modelo 402”. Por consulta do datasheet evidenciam-se algumas características relevantes para o projeto desenvolvido.

A resistência interna nominal do extensômetro (a resistência antes de ,sob este, ser aplicada qualquer força) é inicialmente muito elevada (da ordem dos mega Ohms) e após a aplicação de uma força superior a 0.2 Newtons comporta-se aproximadamente de forma logarítmica (Fig. 2), o que a torna pouco viável para o projeto em desenvolvimento, desta forma, de modo a simplificar os circuitos de condicionamento de sinal, consideraremos esta função como sendo totalmente logarítmica e com resistência nominal da ordem dos cem mil Ohms. Tal simplificação implica alguns erros no condicionamento de sinal, os quais serão mais aprofundados à frente.

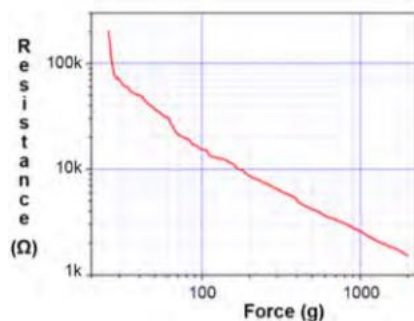


Fig. 2. 2 Relação resistência força aplicada ao extensômetro

#### B. Sensor de temperatura (TMP36)

Assim como o anterior este bloco também é responsável por fazer a conversão da grandeza física em análise para a

grandeza elétrica pretendida, neste caso, temperatura para tensão.

É utilizado o sensor TMP36, que possui três pinos, cuja a configuração é apresentada em Fig. 3. 3 Configuração dos Pins. O sensor já possui uma saída em tensão que varia de 0 a 5 Volts, como consequência não será necessário um circuito amplificador para assegurar essa gama de valores, devido a tensão de funcionamento do conversor AD. De acordo com o gráfico da curva característica apresentado no datasheet, o sensor possui uma relação entre a temperatura e a tensão de saída linear, como mostra a Fig. 4, portanto não haverá necessidade de lineariza-la. Assim sendo, não precisamos de condicionamento de sinal para este sensor, podendo ligar a tensão de saída do TMP36 diretamente a entrada do conversor.

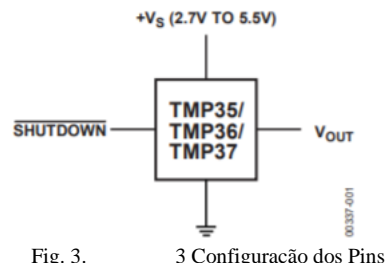


Fig. 3. 3 Configuração dos Pins

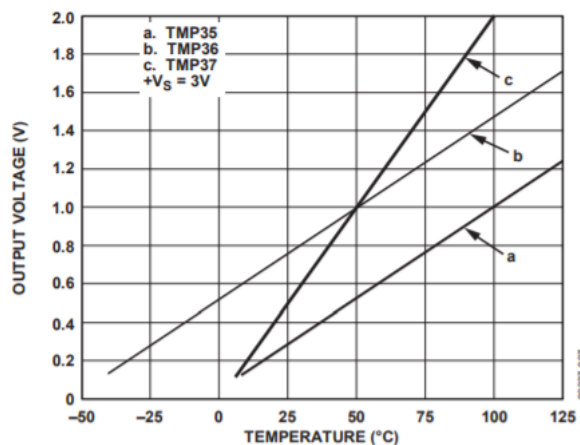


Fig. 4. 4 Curva característica TMP36

#### C. Condicionamento de sinal

Este bloco é responsável pela atenuação dos ruídos, limitação e linearização do sinal, entre outros, de modo que será melhor abordado no capítulo sobre condicionamento de sinal.

#### D. Conversão Analógico-Digital

Após a conversão das grandezas físicas em eletrônicas, para que possamos processar os dados adquiridos é necessário fazer a conversão do sinal analógico obtido, para sinal digital, isto é, converter o valor de tensão em um número mediante a quantidade de bits a utilizar (número este, que representa um sinal digital).

#### E. Arduino Uno (Microcontrolador)

Após a conversão do sinal para digital é necessário processá-lo, e servir-se deste para acionar os atuadores. Para esta tarefa será utilizada a placa de prototipagem “Arduino Uno”.

#### F. Atuadores (LEDs Alerta, Display LCD, Motor DC)

Para o processo de atuação, estabeleceu-se que no caso da deformação, se o valor ultrapassar um predefinido, deverá ser acendida uma luz de alerta (LED amarelo), e caso este ultrapasse um valor crítico (também predefinido), será desligada a alimentação do motor e uma luz de alerta crítico será acionada (LED vermelho). Sendo similar o processo relativo a temperatura, se a temperatura ultrapassar um valor predeterminado o microprocessador diminuirá a velocidade do motor e acionará uma luz de alerta (LED laranja) até que os valores de temperatura recebidos voltem a normalizar-se, colocando assim o motor novamente no seu regime nominal, em paralelo com o caso anterior, se este valor atingir proporções críticas será desligada a alimentação do motor e uma luz de alerta crítico será acionada (LED vermelho), em ambos os casos teremos um botão que simulará a reparação da avaria detetada. Durante todo o processo teremos um display que mostrará constantemente a temperatura e a velocidade do motor.

### IV. CONDICIONAMENTO DE SINAL

Reconhecendo as limitações inerentes dos sensores a utilizar, é necessário acoplá-los a circuitos de modo a conseguir saídas nas condições desejadas. Atendendo ao que foi dito antes, relativamente aos componentes disponíveis, o ADC utilizado (MCP3002) funciona com valores entre 0 e 5 Volts (por consulta ao datasheet), assim sendo, o circuito de condicionamento de sinal, terá foco em linearizar a saída analógica final (para que haja uma sensibilidade constante, isto é, para a mesma variação de resistência haja a mesma variação de tensão), e será igualmente necessário que a saída em tensão final esteja entre 0 e 5 Volts. Por hábito é neste tipo de circuitos também que é feita a atenuação de ruídos, mas sendo este projeto meramente académico, e como será executado em condições de ruídos desprezáveis não teremos esta componente em consideração na elaboração deste projeto. Deste ponto, entre os diversos circuitos existentes, optou-se por explorar o seguinte, tendo em consideração os recursos disponíveis, a praticidade de implementação, e o grau de satisfação relativamente ao problema enunciado:

#### Ponte de Wheatstone acoplada a um amplificador operacional [5]:

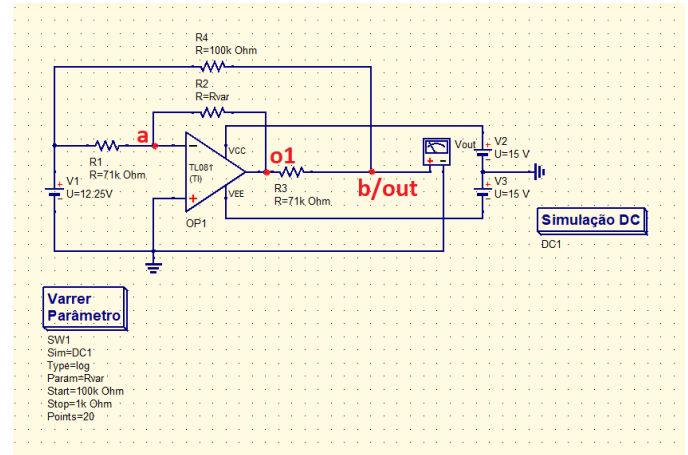


Fig. 5. 5 Circuito de condicionamento de sinal

Ao associarmos um amplificador em paralelo com o nosso extensômetro na ponte de Wheatstone (Fig. 5.) é possível obter uma saída linearizada pelo próprio amplificador, seguindo o seguinte raciocínio:

Considerando o nó entre a R2 e R3 como O1, Vo1 será a tensão entre a saída do amplificador e a massa.

Como o amplificador apresenta uma montagem inversora, e caso a ponte esteja equilibrada, de forma que:  $R1=R3$  e  $R2=R4$ , temos que:

$$Vo1 = -V * \frac{R2}{R1} \quad (1)$$

Ainda para que a ponte esteja equilibrada  $V_{ab} = 0$ , ou seja  $V_a - V_b = 0 \Leftrightarrow V_a = V_b$ , como  $V_a$  está ligado ao terminal negativo do amplificador, que tem a mesma tensão que o positivo,  $V_- = V_+ = V_a = 0$ , logo  $V_b = 0$ .

Mas por outro lado:

$$V_b = \frac{V - Vo1}{R3 + R4} * R4 \Leftrightarrow$$

$$V_b = \frac{V(1 + \frac{R2}{R1})}{R1 + R2} * R2 = 0 \quad (2)$$

Quando desequilibramos a ponte,  $R2 = R - \Delta R$ , e como  $V_a = 0$ , esta variação refletir-se-á a saída do amplificador,  $Vo1$ , então  $Vo1 = -V - \Delta V$  (forçada pelas características do Ampop), então da equação anterior teremos as seguintes equações:

$$V_b = \frac{V - (-V * \frac{R2}{R1} - \Delta V)}{R1 + R2} * R2 = \frac{V + V * \frac{R2}{R1} + \Delta V}{R1 + R2} * R2 = \left[ \frac{V(1 + \frac{R2}{R1})}{R1 + R2} * R2 \right] + \left[ \frac{\Delta V * R2}{R1 + R2} \right]$$

, de (1) sabemos que :

$$\frac{V(1 + \frac{R2}{R1})}{R1 + R2} * R2 = 0$$

Sabendo que  $i_x = \frac{V}{R1}$ , e que  $\Delta V = i_x * \Delta R \Leftrightarrow \Delta V = \frac{V}{R1} * \Delta R$ , logo:

$$Vb = \frac{\frac{V}{R1} * \Delta R}{1 + \frac{R1}{R2}} \quad (3)$$

Para  $R2=100 \text{ K}\Omega$  e  $R1=71 \text{ K}\Omega$ , temos os seguintes resultados:

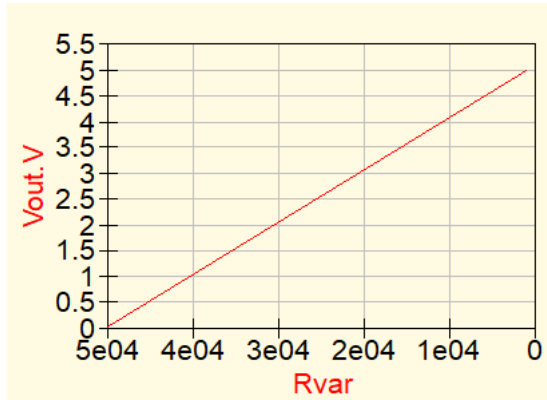


Fig. 6. 6 Tensão de saída (tensão em Volt, resistência em Ohm)

Nota: Devido as não idealidades dos nossos componentes, e acima de tudo da aproximação da resistência nominal do extensômetro efetuada, a nossa tensão inicial experimentalmente será diferente de zero (a ponte nunca estará realmente em equilíbrio), podendo este efeito ser atenuado recorrendo ao seguinte circuito:

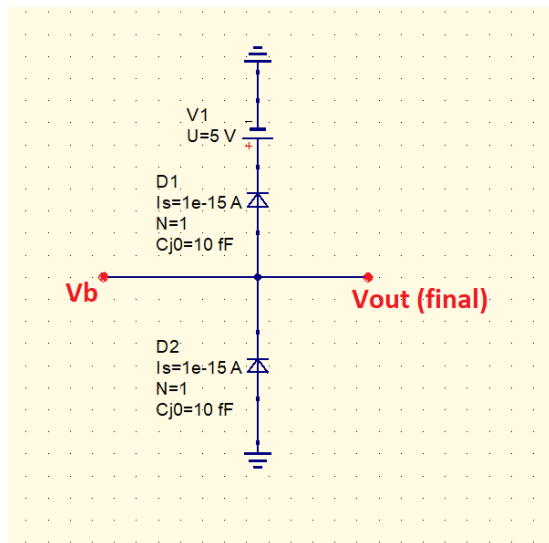


Fig. 7. 7 Limitador de tensão

Com a seguinte montagem consegue-se limitar a saída em tensão, entre valores pretendidos, pois caso a tensão exceda os 5 Volts máximos, o diodo D1 entra em condução fazendo com que hajam 5 Volts à saída, e de modo similar, caso a tensão seja menor que os 0 Volts mínimos, o diodo D2 entra em condução e a saída tem-se 0 Volts, deste modo, garantimos (em teoria) que à saída encontrar-se-á sempre entre 0-5 Volts. Apesar da implementação deste circuito de limitação, na prática, é possível obter-se uma pequena discordância de valores, que como já foi atenuada já não será prejudicial ao ADC.

## V. CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

Para fazer-se a conversão dos valores analógicos para digital foi utilizado o conversor analógico-digital ADC MCP3002.

O ADC tem dois canais para leitura de dados, CH0 e CH1, dos quais apenas o primeiro foi utilizado, ou seja, conectou-se o CH0 a saída final do circuito de condicionamento de sinal, e o CH1 a terra, em seguida conectou-se o clock do Arduino, Clock generator (pin13), a respetiva entrada de clock do ADC, CLK, isto é, Clock generator – CLK - pin13. Como pretende-se fazer uma conversão de 0 – 5 Volts, pode-se conectar a tensão referência a tensão de alimentação do ADC,  $V_{dd} - V_{ref}$ . E conecta-se o  $V_{ss}$  (valor mínimo de conversão) a terra. O Arduino uno tem ainda 2 pinos reservados para a troca de dados com periféricos externos. MOSI - pin11, “Master Out Slave In” que recebe dados do periférico, e MISO - pin12, “Master In Slave Out” que envia dados ao periférico. De maneira similar, o conversor ADC tem dois pinos responsáveis pela comunicação com dispositivos externos, o Dout, saída de dados, e o Din, entrada de dados, assim sendo, para estabelecer a conexão entre o Arduino uno e o conversor ADC conectou-se o pin MOSI ao Dout (pin11), e o MISO ao Din (pin12). Por fim o Slave estará conectado a um pino digital que funcionará como seletor, 0 - ADC ativo, 1 - ADC inativo.

Desta forma conseguimos converter o sinal analógico em digital.

## VI. PROCESSAMENTO DO SINAL DIGITAL

Para efeito do tratamento do sinal digital é usada a placa de prototipagem “Arduino Uno”, como já foi referenciado em capítulos anteriores.

O “Arduino Uno” é uma placa de microcontrolo baseada no ATmega328P. Contém 14 pinos digitais (input/output), 6 pinos de entrada analógica, 1 cristal de quartz de 16MHz, conexão USB, alimentação, ICSP header e um botão de reset. Assim a codificação do projeto é explicada nos ficheiros anexo Arduino1\_main\_code.ino e Arduino2\_main\_code.ino.

## VII. TESTES E BUGS

Durante o decorrer do projeto deparámo-nos com diversas adversidades à conceção bem-sucedida deste. Inicialmente

pretendeu-se fazer o condicionamento do sinal recorrendo a uma ponte de Wheatstone seguida de um amplificador operacional, apesar de ser um circuito de fácil implementação e entendimento, para pequenas variações de resistência a relação da tensão de saída e da resistência do extensômetro era pouco linear, deste modo descartou-se esta possibilidade e em vez disso, optou pela implementação do circuito de condicionamento de sinal descrito anteriormente. Outro dos empecilhos durante o projeto foi a inconveniência do tamanho do extensômetro, como a superfície de medida era muito diminuta foi difícil conseguir corpos com forma apropriada para mensurar a força que estava a ser aplicada sob o sensor, assim sendo, optou-se por usar valores aproximados recorrendo ao gráfico da curva característica apresentado no datasheet, e, portanto, há um erro associado a função de transferência do circuito. Ainda na fase da conceção teórica do projeto, durante a fase de simulação, devido à algumas falhas técnicas foi necessário mudar de software de simulação do PS Spice para o QUCS, deste modo, todas as simulações aqui expostas foram feitas no QUCS. Já na fase de testes experimentais, apesar de todos os cálculos teóricos estarem concordantes, e as simulações não apresentarem erros, a tensão de saída não apresentava o comportamento esperado, ao aplicarmos força sobre o extensômetro a tensão de saída elevava-se até 5 Volts e de seguida ia para 1 Volt, constituindo assim um erro sistemático e que apesar dos nossos esforços e dos docentes para solucionar-lo persistiu.

#### AGRADECIMENTOS

Agradece-se aos docentes Ricardo Costa e Luís Lima, pelo seu apoio, encorajamento e aconselhamento no decorrer deste projeto, assim como todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a conceção do mesmo.

#### ANEXOS

Arduino1\_main\_code.ino

Arduino2\_main\_code.ino

#### REFERENCES

- [1] Wikipédia, “Extensômetro,” 2017. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Extensômetro>. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [2] S. Systems, “Strain Gauge Technology in Field Testing,” 2016. [Online]. Available: <http://www.sensing-systems.com/blog/strain-gauge-technology-in-field-testing>. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [3] H. B. M. G. (HBM), “Advantages of Applying Strain Gauges in Medical Equipment,” 2013. [Online]. Available: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=187>. [Accessed: 18-Mar-2018].

- [4] J. A. da Silveira, “Os Amplificadores Operacionais.” [Online]. Available: [http://ordemnatura.com.br/articles/os\\_amplificadores\\_operacionais.html](http://ordemnatura.com.br/articles/os_amplificadores_operacionais.html). [Accessed: 17-Mar-2018].
- [5] M. Integrated, “APPLICATION NOTE 6144 LINEARIZATION OF WHEATSTONE-BRIDGE,” pp. 1–10. [http://ordemnatura.com.br/articles/os\\_amplificadores\\_operacionais.html](http://ordemnatura.com.br/articles/os_amplificadores_operacionais.html). [Accessed: 17-Mar-2018]
- [6] Williams, A. (2002). *Microcontroller projects using the Basic Stamp* (2nd ed.). CMP Books. Retrieved from [https://books.google.com/books?id=E0\\_07GFxo2wC&pg=PA344](https://books.google.com/books?id=E0_07GFxo2wC&pg=PA344)
- [7] John Nussey. (n.d.). How to Control the Speed of a DC Motor with the Arduino. Retrieved June 9, 2018, from <http://www.dummies.com/computers/arduino/how-to-control-the-speed-of-a-dc-motor-with-the-arduino/>
- [8] Arduino DC Motor Speed Control Potentiometer. (2015). Retrieved June 9, 2018, from <http://www.instructables.com/id/Arduino-DC-motor-speed-control-potentiometer/>
- [9] Toni DiCola. (2016). MCP3008 | Raspberry Pi Analog to Digital Converters | Adafruit Learning System. Retrieved June 9, 2018, from <https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-analog-to-digital-converters/mcp3008>
- [10] João Alexandre da Silveira. (n.d.). Os Amplificadores Operacionais. Retrieved June 9, 2018, from [http://ordemnatura.com.br/articles/os\\_amplificadores\\_operacionais.html](http://ordemnatura.com.br/articles/os_amplificadores_operacionais.html)
- [11] Mangukiya Harsh. (2017). Serial Communication Between Two Arduino Boards - Arduino Project Hub. Retrieved June 9, 2018, from <https://create.arduino.cc/projecthub/harshmangukiya/serial-communication-between-two-arduino-boards-d423e9>
- [12] Robin2. (2016). Serial.readBytes. Retrieved June 9, 2018, from <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=439405.0>
- [13] Robin2. (2016). Serial Input Basics - updated. Retrieved June 9, 2018, from <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=396450.0>
- [14] Sending different informations to arduino with serial monitor. (2012). Retrieved June 9, 2018, from <http://forum.arduino.cc/index.php/topic,117482.0.html>
- [15] Robin2. (2014). Serial Input Basics. Retrieved June 9, 2018, from <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=288234.0>
- [16] Arduino - Read. (n.d.). Retrieved June 9, 2018, from <https://www.arduino.cc/en/Serial/read>
- [17] Arduino - Write. (n.d.). Retrieved June 9, 2018, from <https://www.arduino.cc/en/Serial/Write>
- [18] SM. (2015). Arduino - HelloWorld. Retrieved June 9, 2018, from <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HelloWorld>
- [19] Arduino - SPI. (n.d.). Retrieved June 9, 2018, from <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>
- [20] Heather Dewey-Hadborg. (2018). Arduino - DigitalPotControl. Retrieved June 9, 2018, from <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalPotControl>
- [21] Solutions, M. I., & World, C. (n.d.). FS R @ 400 Series Data Sheet Human - Machine Interface Solutions for a Connected World FSR @ 400 Series Data Sheet.
- [22] Voltage, L., & Operation, V. (2002). a Less than 50  $\mu$ A Quiescent Current, 1–16.