

**AMANDA BIANCHI BENEDICTO BRITO**

**Integração entre o Matlab/Simulink e a plataforma Arduino para desenvolvimento por linguagem gráfica e *hardware-in-the-loop* (HIL) de algoritmos de controle para levitação magnética de uma esfera**

**Amanda Bianchi Benedicto Brito**

**Integração entre o Matlab/Simulink e a plataforma Arduino para desenvolvimento por linguagem gráfica e *hardware-in-the-loop* (HIL) de algoritmos de controle para levitação magnética de uma esfera**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Professor Doutor Samuel Euzédice de Lucena

Guaratinguetá - SP  
2016

B862i

Brito, Amanda Bianchi Benedicto

Integração entre o Matlab/Simulink e a plataforma Arduino para desenvolvimento por linguagem gráfica e hardware-in-the-loop (HIL) de algoritmos de controle para levitação magnética de uma esfera / Amanda Bianchi Benedicto Brito – Guaratinguetá, 2016.

29 f : il.

Bibliografia: f. 28

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena

1. Arduino (Controlador programável) 2. Controladores PID  
3. SIMULINK (Software) I. Título

CDU 681.5


**AMANDA BIANCHI BENEDICTO BRITO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. FRANCISCO ANTÔNIO LOTUFO  
UNESP-FEG

Dezembro/2016

## **DADOS CURRICULARES**

**AMANDA BIANCHI BENEDICTO BRITO**

<b>NASCIMENTO</b>	25.08.1993 – Mogi das Cruzes / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Ricardo Feital de Souza Brito Selma Aparecida Benedicto
<b>2012/2016</b>	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho à minha mãe,  
Selma e ao meu irmão, Arthur.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus,

à minha mãe e ao meu irmão que me acompanham por toda a minha trajetória e me dão apoio e motivação para sempre buscar pelos meus sonhos,

ao meu orientador, Samuel E. de Lucena, que confiou em mim para a realização desse projeto,

à Super Rep que, durante esses cinco anos, foi minha segunda família em Guaratinguetá, aos amigos em especial Vera, Thayane, Érick, Vitória, George, Pedro, Danilo, Daniel, Carolina que, em diferentes etapas da minha vida, foram companhias essenciais durante momentos alegres e tristes,

aos meus colegas de classe da turma de 2012 e 2013 que compartilharam árduas noites de estudo, regadas a café e energético,

e por fim, à todos os funcionários da FEG-UNESP .

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

Novak, Aldo.



## RESUMO

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de um controlador digital *Proportional, Integral, Derivative* (PID) na plataforma Simulink, integrado diretamente ao Arduino Mega2560 para o controle da levitação magnética de uma esfera metálica. O sinal correspondente à posição vertical atual da esfera é lido por uma entrada analógica do Arduino, sendo utilizado para isso um diodo emissor de infravermelho e um fototransistor. A mudança de posição da esfera pode ser percebida pela maior ou menor incidência de luz no receptor. A saída resultante do microcontrolador é um sinal de *Pulse Width Modulation* (PWM), cujo *duty cycle* é controlado pela malha PID. Este sinal é enviado a um amplificador de potência para controlar a quantidade de corrente em um eletroímã responsável pelo campo magnético que levita a esfera. Com o intuito de facilitar e otimizar a programação, o Simulink integrado ao Arduino permitiu a utilização da técnica de *Hardware-in-the-loop* (HIL), que possibilita trabalhar com o sistema de controle e seus parâmetros em tempo real e é tida como uma solução avançada para o desenvolvimento de *hardware* embarcado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Levitação Magnética. Arduino. Simulink. Hardware-in-the-loop. PID.

## **ABSTRACT**

The development of a digital PID controller (Proportional, Integral, Derivative) was proposed using the Simulink platform integrated directly to Arduino Mega2560 for the control of the magnetic levitation of a metallic sphere. The signal corresponding to the current vertical position of the sphere is read by an analog input of the Arduino, being used for this an infrared emitting diode and a phototransistor. The change of position of the sphere can be perceived by the greater or lesser incidence of light in the receiver. The resulting output of the microcontroller is a PWM signal, whose duty cycle is controlled by the PID loop. This signal is sent to a power amplifier to control the amount of current in an electromagnet responsible for the magnetic field that levitates the sphere. In order to facilitate and optimize programming, the Simulink integrated with the Arduino enabled the use of the HIL (Hardware-in-the-loop) technique, which makes it possible to work with the control system and its parameters in real time and is considered as an advanced solution for the development of embedded hardware.

**KEYWORDS:** Magnetic Levitation. Arduino. Simulink. Hardware-in-the-loop. PID.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema elétrico dos Circuitos Emissor de Luminosidade e Receptor .....	19
Figura 2 – Esquema elétrico do Circuito de Potência .....	20
Figura 3 – Diagrama de blocos em Simulink para teste .....	21
Figura 4 – Diagrama de blocos representativo do sistema. ....	22
Figura 5 – Módulo de levitação magnética .....	23
Figura 6 – Diagrama de blocos PID final .....	25
Figura 7 – Levitação magnética da esfera. ....	26
Figura 8 – Sinal da saída PWM .....	26

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

A/D	Conversor Analógico/Digital
HIL	Hardware-in-the-loop
ICSP	In Circuit Serial Programming
PID	Proportional, Integral, Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_P$	ganho proporcional
$K_I$	ganho integral
$K_D$	ganho derivativo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA .....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1	LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Levitação magnética, modelagem e controle .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>SOFTWARE E HARDWARE .....</b>	<b>17</b>
3.1	MATLAB/SIMULINK.....	17
3.2	ARDUINO MEGA2560 .....	17
3.3	INTEGRAÇÃO ENTRE SIMULINK E ARDUINO.....	17
<b>4</b>	<b>EXECUÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>19</b>
4.1	CIRCUITOS EMISSOR DE INFRAVERMELHO E RECEPTOR .....	19
4.2	CIRCUITO DE POTÊNCIA .....	19
4.3	PROGRAMAÇÃO: INTEGRAÇÃO ENTE HARDWARE E SOFTWARE.....	20
4.4	MÓDULO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	21
4.5	AJUSTE DOS GANHOS E PARÂMETROS.....	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>28</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A natureza multi e interdisciplinar da engenharia de controle atual torna o ensino/aprendizagem de sua prática muito desafiador. É necessário se lançar mão a conhecimentos especializados de microprocessadores (em especial, de microcontroladores e DSPs), controle discreto e eletrônica industrial. Apenas para realizar a parte digital de uma solução moderna de controle são imprescindíveis bons conhecimentos de “sistemas operacionais de tempo real” e programação nos mínimos detalhes de estruturas como conversores Analógico/Digital (A/D) e controladores de PWM (*pulse width modulator*) e temporizadores (*timers*).

Isso, sem se falar nos algoritmos de controle propriamente ditos. Felizmente, surgiram soluções no mundo comercial que permitem a programação e lida com diversos microcontroladores, DSPs e FPGAs de maneira simbólica (quase “iconográfica”), como o faz, por exemplo, o Matlab/Simulink (THE MATHWORKS INC., 2016). Estes ambientes de projeto e desenvolvimento aliviam sobremaneira a pressão sobre o desenvolvedor (estudante, engenheiro, pesquisador, etc), liberando mais tempo para que este dirija seus esforços às técnicas de controle que deseja investigar. Além do incrível aumento na produtividade, há ainda outros atrativos oferecidos por estes ambientes de desenvolvimento, como a possibilidade de interagir em tempo real com a planta/processo (HIL), e ainda registrar graficamente o que for de interesse, como sinais fundamentais do processo, usando o próprio PC como um superinstrumento virtual. Mas não é trivial integrar o ambiente de desenvolvimento com compiladores, sistemas operacionais de tempo real e placa-alvo (aquela onde o programa em linguagem de máquina é carregado a partir do PC e onde o algoritmo de controle de fato é executado).

### 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho foram o desenvolvimento de uma plataforma de *hardware* para controle de levitação magnética de uma esfera metálica, assim como a programação da plataforma Arduino Mega2560 usando a linguagem gráfica Simulink/Matlab, ou seja, de modo totalmente iconográfico e, por fim, o desenvolvimento e teste de um algoritmo de controle PID digital clássico para levitação magnética de uma esfera metálica.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Visando a adoção em nosso curso de engenharia elétrica, sobretudo nos laboratórios de microprocessadores e controle, do tipo de ferramenta de projeto/desenvolvimento abordado acima na introdução, escolhemos como um projeto para agregar às duas metas, o desenvolvimento de um módulo para levitação magnética de uma esfera. Este tema mostrou-se atrativo para estudantes de outras instituições e de diferentes partes do mundo, além de encontrar-se tratado com muita clareza por diversos autores (GALVÃO et al., 2003; NAUMOVIC, 2003; HURLEY; WÖLFLE, 1997).

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho divide-se em 6 capítulos e está orientado em uma breve teoria sobre a levitação magnética e sobre um sistema de levitação de uma esfera; a execução do projeto, dividida em circuitos eletrônicos utilizados e programação; resultados e discussões e, por fim, a conclusão e proposta para trabalhos futuros.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

A levitação magnética está associada aos princípios do eletromagnetismo e mostra-se curiosa ao ir contra o teorema de Earnshaw. Segundo esse teorema, primeiramente provado em 1842, afirma-se que nenhum objeto estacionário feito de ímãs pode ser mantido em equilíbrio estável por qualquer combinação de forças magnéticas ou gravitacionais estáticas (GEIM et al., 1999).

“O teorema de Earnshaw pode ser visto como uma consequência das equações de Maxwell, que não permitem que a magnitude de um campo magnético em um espaço livre possua um valor máximo, como requerido para o equilíbrio estável.” (GEIM et al., p.1, 1999).

No entanto, objetos diamagnéticos são repelidos por campos magnéticos. Se os campos são suficientemente fortes, essa repulsão pode equilibrar a gravidade e os objetos levitados podem manter-se em equilíbrio estável, aparentemente violando o teorema de Earnshaw. De fato, esse teorema não se aplica ao magnetismo induzido e é possível que a energia total possua um valor mínimo (ao invés de um máximo) (BERRY; GEIM, 1997).

#### 2.1.1 Sistema de levitação magnética, modelagem e controle

Para a construção de um sistema de levitação magnética de atração é necessária a utilização de um eletroímã que gere um campo magnético suficiente para atrair um objeto (SANTOS, 2011). O sistema de levitação magnética produz força magnética pelo fluxo de corrente elétrica através da bobina e, devido a algumas vantagens como o não contato mecânico, fricção e ruído, ele pode ser usado para posicionamento preciso (LIN; LIN; CHEN, 2011).

A modelagem matemática desse sistema instável é amplamente analisada e já foi realizada por inúmeros autores como Berry e Geim (1997) e Galvão et al. (2003), sendo que estes últimos voltaram seus esforços para fins didáticos.

No caso do projeto realizado, devido ao conhecimento de modelagens prévias e falta de acesso à parâmetros necessários, optou-se por trabalhar com sintonia experimental.

O sistema de levitação magnética torna-se completo ao ser constituído de um sistema responsável por detecção de posição do objeto a ser levitado, no caso do projeto, a esfera, e de um controlador para que ocorra a levitação estável. Tradicionalmente, segundo Hurley, Hynes

e Wöfle (2004), o controle desse tipo de planta se dá por meio de amplificadores lineares. No projeto realizado aqui, assim como proposto pelos autores anteriormente citados e também por Morken e Haffner (2015), será utilizado o controle por meio de um sinal de PWM (*Pulsewidth Modulation*) para que haja modulação de corrente no ímã.

Para que a modulação de corrente utilizando o sinal de PWM possa ocorrer, necessita-se da implementação de um algoritmo de controle. O controlador PID (*Proportional, Integral, Derivative*) tem uma estrutura simples e fácil de ser entendida por engenheiros e estudantes e ainda é uma técnica aplicada na indústria atual. No entanto, esse tipo de controlador tem seus parâmetros ajustados manualmente e precisa de técnicas de auto-ajuste (LIN; LIN; CHEN, 2011). Associado a isso, foi aplicada a técnica de *Hardware-in-the-loop* (HIL), muito difundida atualmente em sistemas embarcados modernos, que permite que o controlador PID seja ajustado em tempo real.

### 3 SOFTWARE E HARDWARE

#### 3.1 MATLAB/SIMULINK

Segundo o fabricante The Mathworks Inc., em guia sobre o software, o MATLAB é uma linguagem de computação técnica de alto nível presente em diversas aplicações como processamento de sinal, processamento de imagem, projeto de controle, robótica, etc. O software oferece vasta biblioteca de caixas de ferramentas pré-construídas para criação de algoritmos e o código pode ser integrado com outras linguagens de programação, permitindo implementação de algoritmos e aplicativos dentro da web, empresa e sistemas de produção.

Sobre o Simulink, a The Mathworks Inc. define como “um ambiente de diagrama de blocos para simulação multidomínio e *Model-Based Design*”. Nele é possível a inclusão de software e hardware no modelo para gerar código para implementação integrada e assim, podem-se “criar bancos de teste para verificação do sistema, economizando tempo e evitando erros codificados manualmente”.

A versão do software adotada foi a 2015a.

#### 3.2 ARDUINO MEGA2560

O Mega2560 , de acordo com o Arduino, é uma placa baseada no microcontrolador ATmega2560. “Possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, oscilador de cristal de 16 MHz, conexão USB, uma tomada de força, um cabeçalho ICSP e um botão de reinicialização”.

Seu conversor A/D é de 10bits e varia de 0 a 5V.

#### 3.3 INTEGRAÇÃO ENTRE SIMULINK E ARDUINO

O MATLAB e Simulink permitem a criação de projetos Arduino usando programação de alto nível e diagramas de blocos. No projeto, deseja-se integrar o Arduino ao Simulink.

Para tanto, a Mathworks oferece o *Simulink Support Package for Arduino* que permite o desenvolvimento de algoritmos que sejam executados no Arduino. O pacote de suporte estende o Simulink com blocos para configurar sensores e ler e gravar dados a partir deles. Uma ferramenta oferecida pelo Simulink é a capacidade de ajustar parâmetros no computador

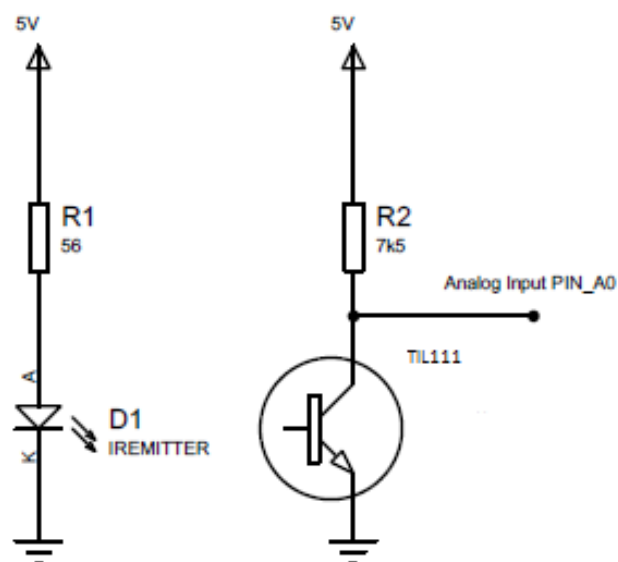
em tempo real enquanto o algoritmo é executado no hardware, função suportada pelo Arduino Mega2560 (THE MATHWORKS INC., 2016; ARDUINO, 2016).

## 4 EXECUÇÃO DO PROJETO

### 4.1 CIRCUITOS EMISSOR DE INFRAVERMELHO E RECEPTOR

O circuito emissor de luminosidade é composto por um diodo emissor de infravermelho. Sua alimentação de 5V-50mA é fornecida pelo próprio Arduino. Já o circuito receptor possui um fototransistor com saída pelo coletor que também é alimentado pelo Arduino. Sua saída fornece um nível de tensão de 0 a 5V dependendo do nível da incidência do infravermelho. Os circuitos emissor e receptor estão dispostos frente a frente e os esquemas elétricos podem ser vistos na Figura 1:

Figura 1 – Esquema elétrico dos Circuitos Emissor de Luminosidade e Receptor.

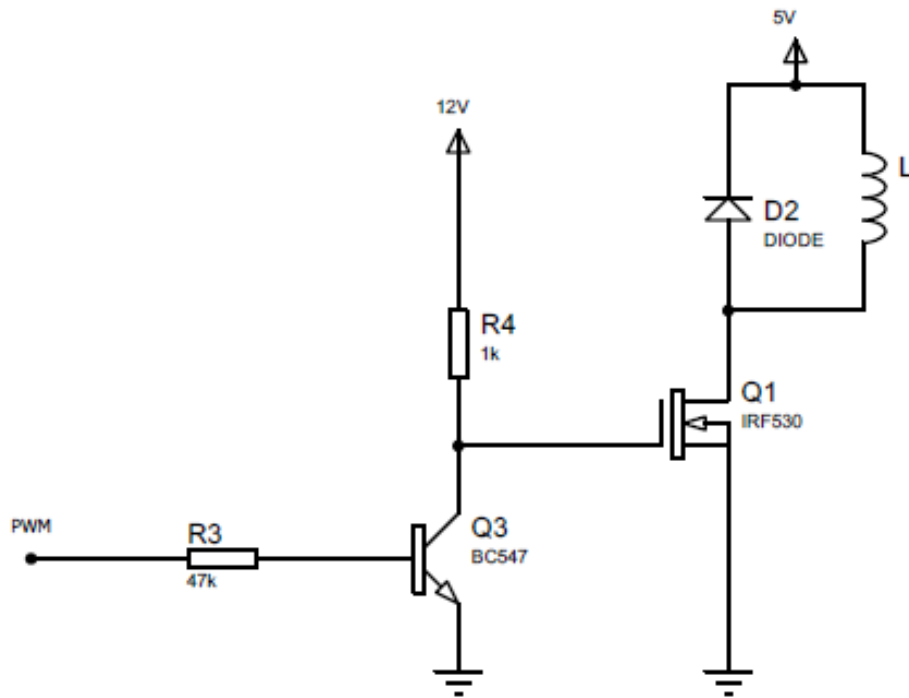


Fonte: (Produção do próprio autor)

### 4.2 CIRCUITO DE POTÊNCIA

Como a tensão e a corrente fornecidas pelo Arduino não são suficientes para alimentar o eletroímã, há um circuito de potência, composto por um MOSFET IRF530, que recebe a saída do controlador e amplifica este sinal para o eletroímã. Assim, ao invés de uma saída limitada, obtém-se níveis de corrente adequados para o eletroímã. A tensão de alimentação de 12V é devido aos valores de funcionamento necessários do MOSFET ( $V_{GS}$  mínimo de 10V). O circuito está representado na Figura 2:

Figura 2 – Esquema elétrico do Circuito de Potência



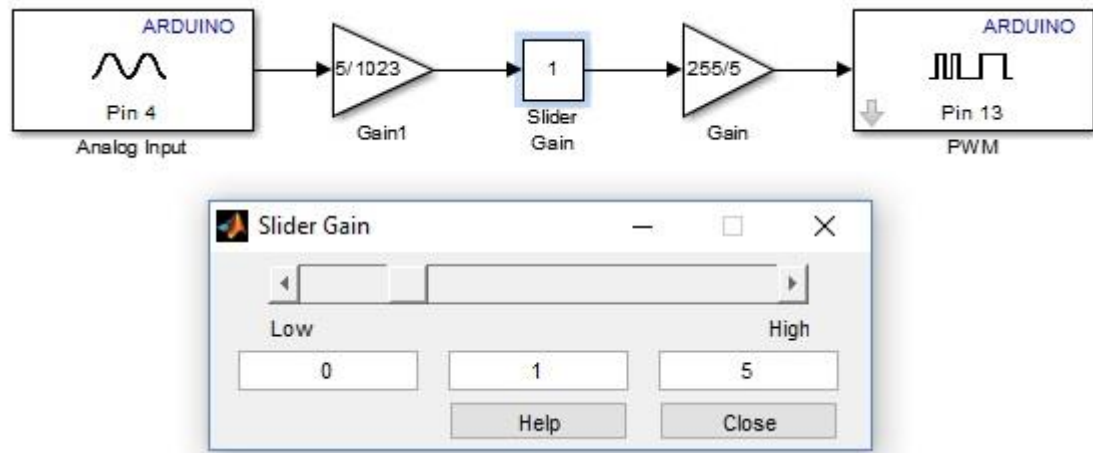
Fonte: (Produção do próprio autor)

#### 4.3 PROGRAMAÇÃO: INTEGRAÇÃO ENTRE HARDWARE E SOFTWARE

Primeiramente, foi necessário integrar o Software (Arduino Mega2560) e o Hardware para o desenvolvimento do algoritmo de controle e ajuste dos parâmetros do controlador (sintonia) em tempo real. Para tanto, os pacotes “Arduino Support from Matlab/Simulink” foram baixados diretamente do Software Matlab 2015a.

No ambiente do Simulink, os primeiros testes foram realizados com o sistema cujo diagrama de blocos é mostrado na figura 3:

Figura 3 – Diagrama de blocos em Simulink para teste.



Fonte: (Produção do próprio autor)

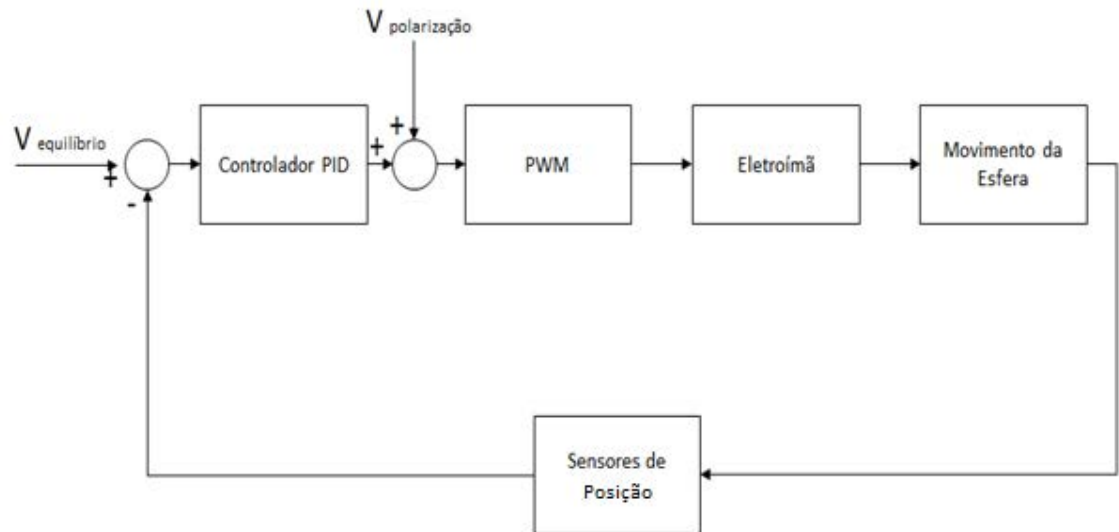
Os blocos Arduino são representações dos pinos físicos da plataforma. Na entrada analógica, foi conectado o sinal proveniente do fototransistor. A variação de luminosidade no receptor faz variar a saída de PWM. O *slider gain* foi adicionado a fim de facilitar o ajuste em tempo real dos parâmetros do controlador.

Tanto o controle do PWM com a variação do sinal do sensor quanto a possibilidade de poder trabalhar em tempo real com a programação puderam ser efetivados com os primeiros testes.

#### 4.4 MÓDULO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

O sistema do projeto pode ser resumido pelo diagrama de blocos da Figura 4:

Figura 4 – Diagrama de blocos representativo do sistema.



Fonte: (Produção do próprio autor)

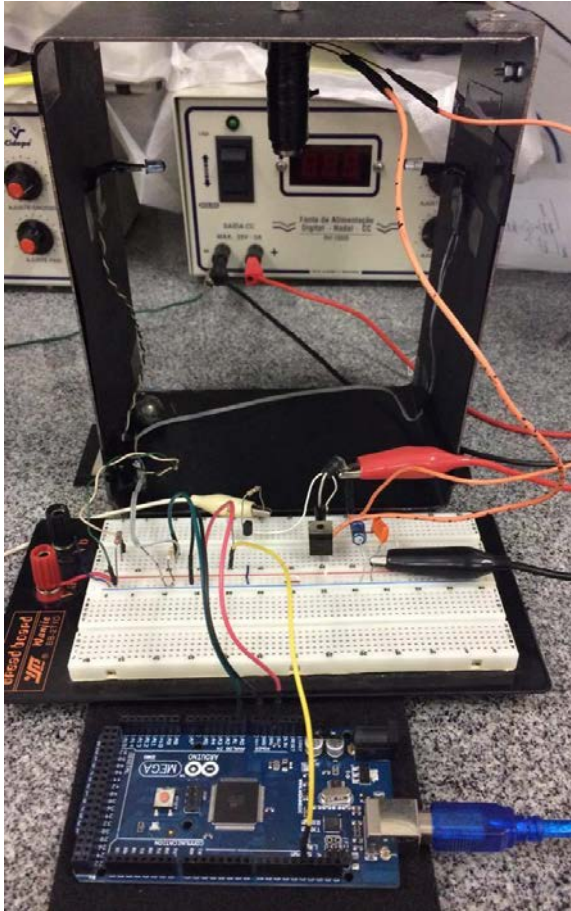
Antes de iniciar os ajustes de parâmetros e teste da malha de controle PID, foi necessário unir os circuitos emissor, receptor e de potência, o eletroímã e o Arduino em um sistema único.

Logo depois, foi definido um ponto de equilíbrio para a posição da esfera (equivalente a 2,6 V na saída do fototransistor). O diodo IR e o fototransistor foram alinhados de forma que a movimentação da esfera em torno do ponto desejado gerasse variação no nível da tensão de saída. Conforme a esfera se aproxima do eletroímã, os valores de tensão diminuem e conforme se afasta, esses valores aumentam.

A Figura 5 mostra uma fotografia da forma final do módulo físico.



Figura 5 – Módulo de levitação magnética.



Fonte: (Produção do próprio autor)

#### 4.5 AJUSTE DOS GANHOS E PARÂMETROS

Após as etapas anteriores e montado o controlador PID no Simulink, iniciaram-se os ajustes dos parâmetros.

Primeiramente, deve-se considerar que caso o erro do sistema realimentado seja zero, ainda é necessário que a esfera flutue, portanto, uma tensão de polarização é adicionada para a manutenção da levitação nessa condição. Esse valor foi definido colocando a esfera abaixo do eletroímã e variando-o até que o campo magnético superasse a força peso da esfera e começasse a puxá-la. O ganho proporcional é ajustado logo após a definição de  $V_{\text{polarização}}$ . Ele geralmente aumenta a velocidade de resposta do sistema, porém, se muito alto, torna o sistema instável. O seu valor foi variado até que a esfera pudesse ser levitada por um tempo, mesmo que com oscilações bruscas. O ganho derivativo que responde conforme a velocidade de variação do erro possibilita que a levitação ocorra em torno do ponto de equilíbrio. Seu ajuste é feito até o valor que elimina as oscilações bruscas e permite a levitação mais

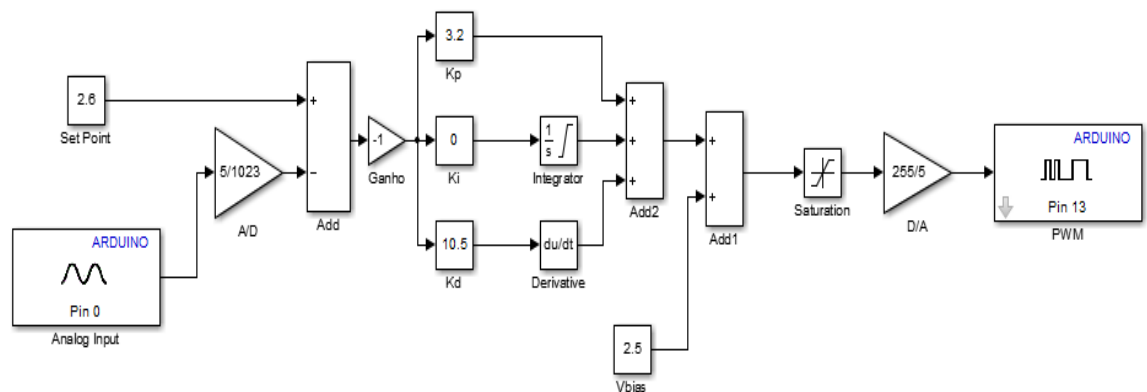
“estacionária”. Por fim, o ganho integral, responsável por corrigir erro de regime, nesta aplicação mostrou-se desnecessário (MORKEN; HAFFNER, 2015).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com primeiros testes oferecendo resultados positivos, a malha PID foi construída e os parâmetros então ajustados até atingirem valores que favoreceram a levitação estável.

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 6:

Figura 6 – Diagrama de blocos PID final.

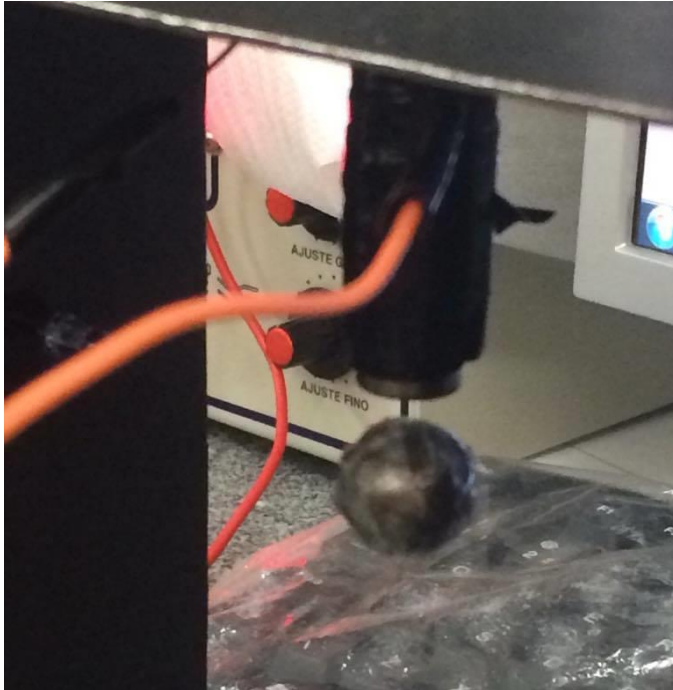


Fonte: (Produção do próprio autor)

Os valores resultantes foram:  $K_P = 3.2$ ,  $K_I = 0$  e  $K_D = 10.5$ .

Era esperado que ação integral (I) não fosse fundamental para o controle desta planta e, durante o experimento, não foi notada mudança no desempenho do sistema de levitação ao se variar o valor deste ganho. Então, optou-se por mantê-lo em zero. Uma fotografia da esfera levitando pode ser vista na Figura 7:

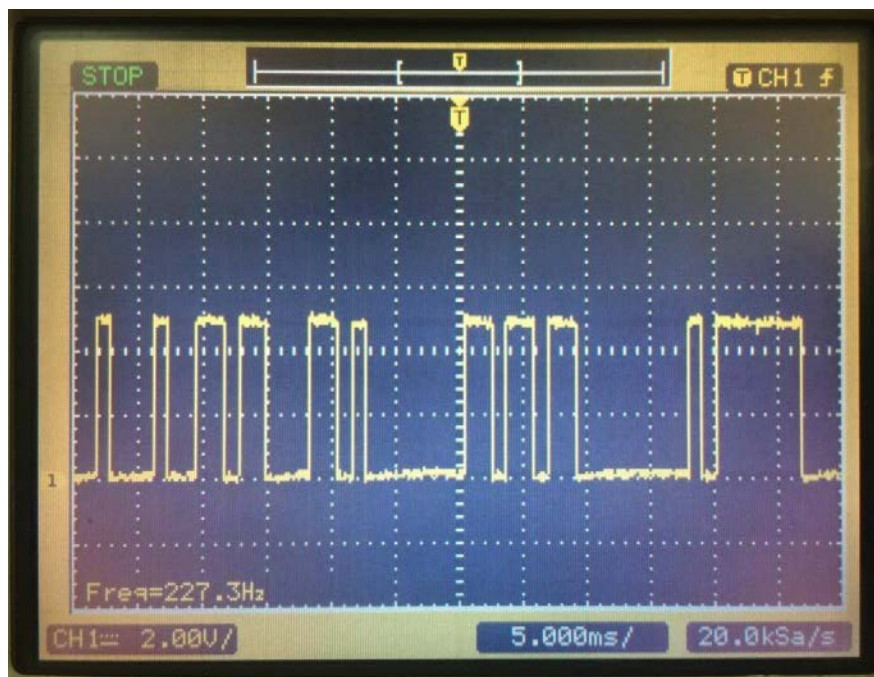
Figura 7 – Levitação magnética da esfera.



Fonte: (Produção do próprio autor)

Enquanto ocorria a levitação, foi observada a saída do pino de PWM, e o sinal obtido é mostrado na Figura 8:

Figura 8 – Sinal da saída PWM.



Fonte: (Produção do próprio autor)

## 6 CONCLUSÃO

Após a levitação magnética ocorrer com sucesso, foi possível notar a adequação do controlador PID para o ajuste e manutenção da esfera em torno de um ponto de referência (*setpoint*). Com o correto ajuste dos ganhos ( $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ) da malha de controle, a correção do erro gerado com a variação de posição da esfera foi efetivo para que o sinal de PWM resultante controlasse o valor necessário de corrente no eletroímã, a fim de que a esfera se mantivesse na posição de equilíbrio desejada.

A plataforma Arduino também se mostrou eficaz para a aquisição dos dados analógicos de entrada e implementação do algoritmo de controle da planta.

O principal resultado obtido foi a validação da técnica de *Hardware-in-the-loop* e a programação da plataforma em diagrama de blocos. O Simulink e seu pacote para o Arduino possibilitaram a implementação iconográfica do controlador PID, sem a necessidade de escrever nenhuma linha de programação, assim como o ajuste dos parâmetros na malha de controle em tempo real, sem que a execução do programa precisasse ser interrompida. Essa técnica foi essencial para o bom resultado do sistema já que os ganhos eram modificados durante o seu funcionamento e, dessa forma, foi possível escolher os valores que proporcionaram uma levitação magnética mais estável.

Durante a realização do projeto houve dificuldade inicial em realizar a primeira integração entre Matlab/Simulink e Arduino, devido à falta de conhecimento do pacote, o que logo foi sanado seguindo as recomendações do fabricante. Outro desafio foi quanto ao posicionamento dos sensores (fotoemissor e fototransistor) até o ponto que permitiu a variação dos níveis de tensão de saída do fototransistor conforme a movimentação da esfera de modo sensível. Por fim, o ajuste do PID apresentou certa complexidade, mostrando-se necessário o domínio do propósito exercido por cada ganho no funcionamento da malha, visando obter o ajuste conforme a resposta que o sistema esfera/eletroímã oferecia.

Futuramente, pretende-se aprimorar o circuito receptor, adaptando um sensor que possibilite a flutuação da esfera por um espaço vertical mais amplo. O aprimoramento do algoritmo PID também é algo a ser feito, para tornar o controlador mais tolerante à perturbações.

## REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **Arduino board Mega2560**. Itália, 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560ml>>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- ARDUINO. **Interfacing/Matlab**. Itália, 2016. Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/Interfacing/Matlab>>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- BERRY, M. V.; GEIM, A. K. Of flying frogs and levitrons. **Eur. J. Phys.**, v. 18, p. 307-311, 1997.
- GALVÃO, R. K. H. et al. A simple technique for identifying a linearized model for a didatic levitation system. **IEEE Transactions on Education**, v. 46, n. 1, p. 22-25, fev. 2003.
- GEIM, A. K. et al. Magnet levitation at your fingertips. **Scientific Correspondence**, v. 400, p. 323-324, 22 jul. 1999.
- HURLEY, W. G.; HYNES, M.; WÖFLE, W. H. PWM control of a magnetic suspension system. **IEEE Transactions on Education**, v. 47, n. 2, p. 165-173, mai. 2004.
- HURLEY, W. G.; WÖFLE, W. H. Electromagnetic design of a magnetic suspension system. **IEEE Transactions on Education**, v. 40, n. 2, p. 124-130, mai. 1997.
- LIN, C.M.; LIN, M. H.; CHEN, C. W. SoPC-based adaptive PID control system design for magnetic levitation system. **IEEE Systems Journal**, v. 5, n. 2, p. 278-287, jun. 2011.
- MORKEN, M. O.; HAFFNER, B. R. **Achieving stable magnetic levitation on the Arduino platform**. Wheaton, IL: Department of Physics, Wheaton College, 5 de fev. 2015. Disponível em: <<http://www.experiencingphysics.com/wp-content/uploads/2015/04/arduinoMagLev.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- NAUMOVIC, M. B. Modeling of a didatic magnetic levitation system for control education. In: TELSIS, 2003, Nis, Servia e Montenegro. **Anais do IEEE**, 2003. p. 783-786.
- THE MATHWORKS INC. **Arduino support from Simulink**. Estados Unidos, 1994-2016. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>>. Acesso em: 03 mar. 2016.
- THE MATHWORKS INC. **Simulation and model-based design**. Estados Unidos, 1994-2016. Disponível em: <[https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s\\_tid=hp\\_fp\\_sl](https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_fp_sl)>. Acesso em: 03 mar. 2016.
- THE MATHWORKS INC. **The language of technical computing**. Estados Unidos, 1994-2016. Disponível em: <[https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_fp\\_ml](https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_fp_ml)>. Acesso em: 03 mar. 2016.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CRAIG, K. **Magnetic levitation system:** Dynamic System Investigation. Rensselaer Polytechnic Institute. Disponível em: <[http://facultad.bayamon.inter.edu/arincon/Magnetic\\_Levitation\\_System.pdf](http://facultad.bayamon.inter.edu/arincon/Magnetic_Levitation_System.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2016.