

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Automação e Sistemas

# **Tutorial**

## LEVITADOR ELETROMAGNÉTICO

### *Alunos*

Denise Albertazzi Gonçalves 11101065

Ígor Assis Rocha Yamamoto 14101045

Luis Felipe Pelison 14101053

### *Professores*

Ricardo Spyrides Boabaid Pimentel Gonçalves

Rodolfo Cesar Costa Flesch

Dezembro de 2016

# Sumário

<b>1</b>	<b>Projeto</b>	<b>2</b>
1.1	Descrição . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Modelo Teórico</b>	<b>2</b>
2.1	Princípio de Funcionamento . . . . .	2
2.2	Equacionamento . . . . .	3
2.2.1	Equacionamento da corrente na bobina . . . . .	3
2.2.2	Equacionamento das forças . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Parte Mecânica</b>	<b>4</b>
3.1	Montagem física . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Parte Elétrica</b>	<b>5</b>
4.1	Esquema Elétrico do Projeto . . . . .	5
4.1.1	Descrição dos Elementos . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Controle</b>	<b>7</b>
5.1	Estudo da Dinâmica do Sistema . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Software</b>	<b>8</b>
6.1	LabView . . . . .	8
6.2	Arduíno . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Imagens da Confecção do Projeto</b>	<b>13</b>

# 1 Projeto

## 1.1 Descrição

Este projeto tem como objetivo implementar um sistema que permita a levitação de ímãs cilíndricos de neodímio através de um eletroímã para fins didáticos. O projeto é composto por um sistema de medição da posição do ímã através de uma câmera, controle digital implementado em um microcontrolador e acionamento do eletroímã por um transistor.

Existem diversos trabalhos publicados com o tema levitação magnética. Estes trabalhos utilizam diversas abordagens para o levantamento de modelos matemáticos (Hajjaji and Ouladsine, 2001), medição de posição (sensor infravermelho, sensor de efeito hall) e estratégias de controle (Hurley-Wölflé, 1997; Rech, 2013). Todos eles têm como objetivo principal a levitação do objeto magnético dentro de uma faixa de operação. Além do estudo unicamente sobre a teoria magnética ou sobre o controle utilizado, atualmente a levitação magnética vem ganhando força. Isso vem acontecendo pois utilidades para as forças eletromagnéticas estão sendo descobertas, como trens balas - chamados *MagLev* - que podem chegar a velocidades superiores a 600km/h e mancais flutuantes.

Nesse projeto, pretendemos verificar as leis eletromagnéticas na prática, além do controle e da instrumentação eletrônica desenvolvida durante o curso de Instrumentação realizado dentro do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina.

## 2 Modelo Teórico

### 2.1 Princípio de Funcionamento

O objeto é capaz de levitar devido a compensação da força peso com a força eletromagnética exercida pelo eletroímã. Essa força eletromagnética surge a partir do campo magnético gerado pela corrente elétrica que circula pela bobina do eletroímã e é representada na Figura 1. A intensidade do campo magnético e, conseqüentemente, a força eletromagnética sobre o objeto podem ser controladas pela quantidade de corrente que passa pela bobina.

O objeto levita de maneira estável se existir um controle de sua posição. Sua posição é medida através da imagem de uma câmera, onde um processamento da imagem é feito por um computador. O computador envia a informação da posição do objeto a um microcontrolador, responsável por controlar a posição do objeto levantado.

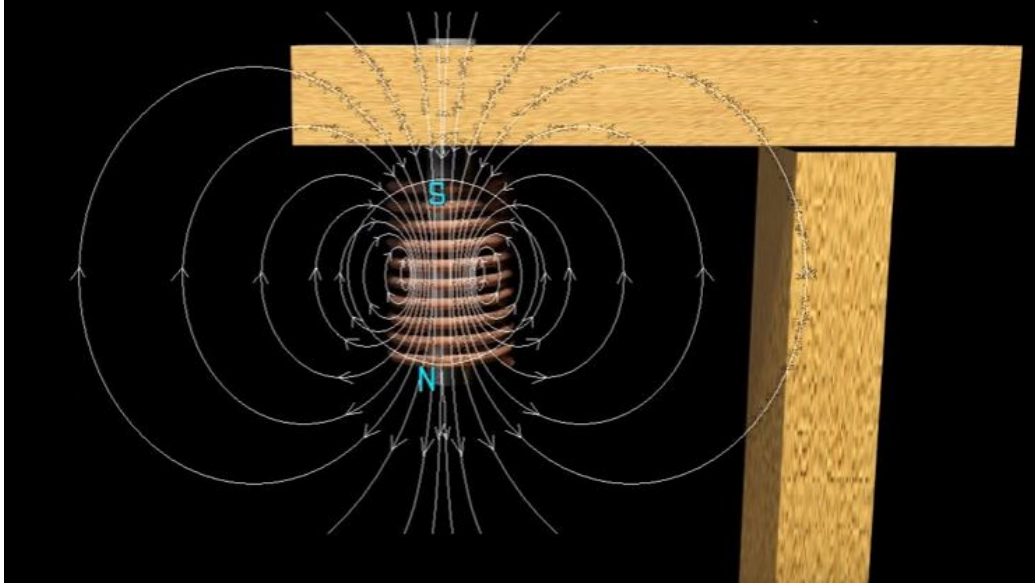


Figura 1: Campo magnético gerado pelo eletroímã

## 2.2 Equacionamento

Desenvolveremos as equações abaixo para demonstrar que a compensação das forças peso e eletromagnética deve ser realizada. Assim, trabalharemos em cima da ideia de sempre seguir em rumo ao equilíbrio, sabendo que o processo é altamente não-linear.

### 2.2.1 Equacionamento da corrente na bobina

Ao aplicar-se uma tensão nos terminais do eletroímã, esta se divide entre a parte resistiva e a parte indutiva do eletroímã, como equacionado abaixo.

$$v(t) = V_R + V_L = R.i(t) + L(h).\frac{di}{dt} \quad (1)$$

### 2.2.2 Equacionamento das forças

De acordo com a segunda lei de Newton, a soma das forças resulta na aceleração do corpo multiplicada pela sua massa (Rech, 2013).

$$\boxed{F_{peso} - |F_{mag}(i, h)| = m.\frac{d^2h}{dt^2}} \quad (2)$$

A força magnética pode ser detalhada como demonstrado abaixo (Hurley-Wölfle, 1997):

$$|F_{mag}(i, h)| = \frac{i^2(t)}{2} \cdot \frac{dL(h)}{dt} \quad (3)$$

$$|F_{mag}(i, h)| = \frac{i^2(t)}{2} \cdot \frac{d}{dt} (L_1 + L_0 \cdot e^{-\frac{h}{a}}) = \frac{i^2(t)}{2 \cdot a} \cdot L \cdot e^{-\frac{h}{a}} \quad (4)$$

### 3 Parte Mecânica

#### 3.1 Montagem física

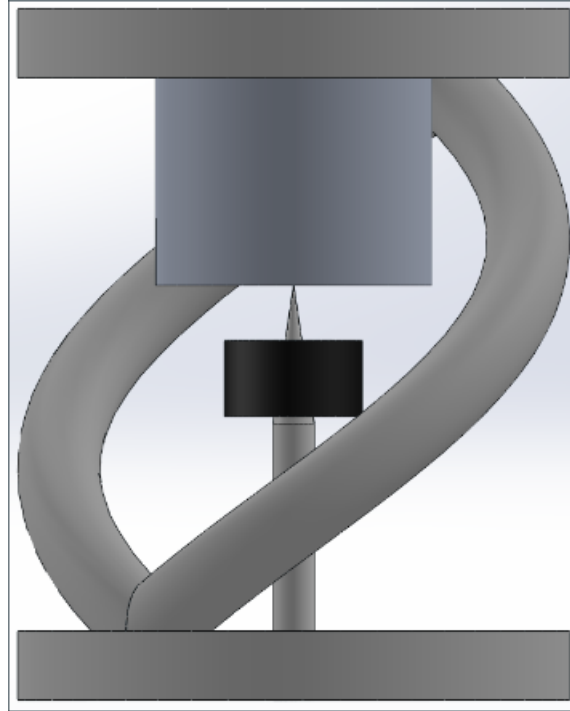


Figura 2: Esquema de montagem física

O projeto do sistema físico consiste em um par de ímãs cilíndricos de neodímio que levitam através de um eletroímã, situado acima destes. O sistema também conta com um eixo central com a função de bloquear os movimentos transversais do objeto levitado.

Uma câmera (webcam), um microcontrolador arduíno e uma chave liga-desliga também fazem parte da estrutura. Esses, juntamente com uma placa

PCB foram dispostos sobre uma estrutura de acrílico com MDF, como ilustram as Figuras 8, 9, 10 e 11 dispostas na Seção 7.

## 4 Parte Elétrica

## 4.1 Esquema Elétrico do Projeto

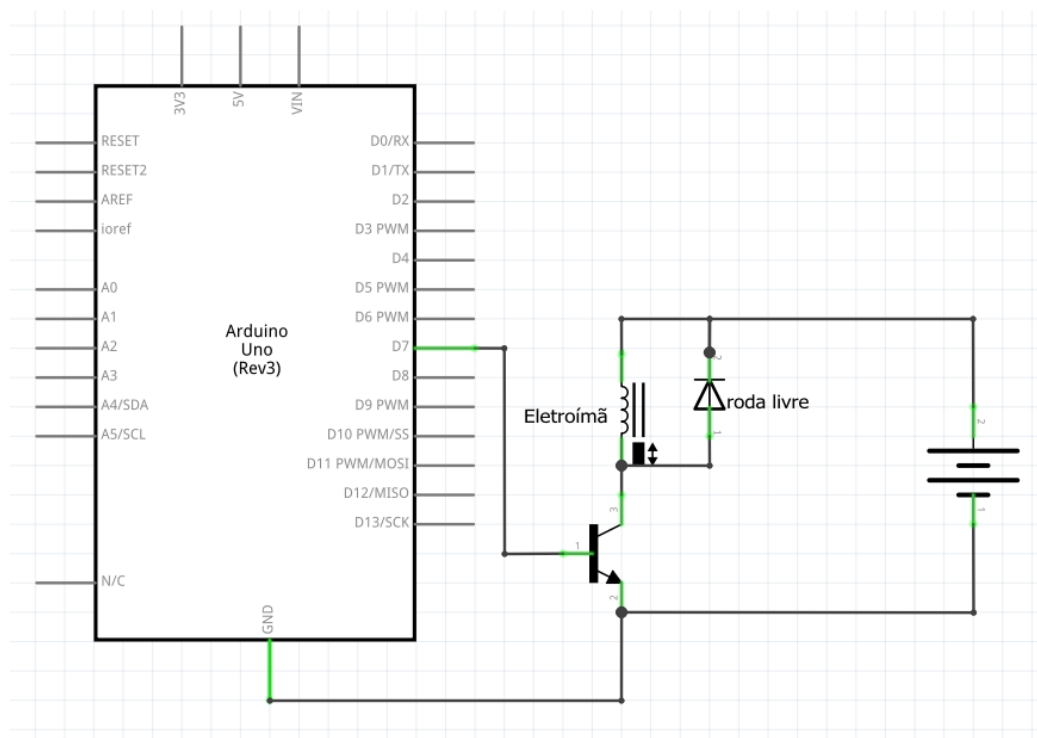


Figura 3: Esquema Elétrico do Projeto

### 4.1.1 Descrição dos Elementos

A descrição dos elementos representados na figura 3 é detalhada a seguir:

- **Arduino:** a plataforma Arduino é utilizada para realizar as funções de controle do sistema, enviando sinais para o eletroímã.
- **Eletroímã:** eletroímã comercial de diâmetro  $20mm$  ( $3W, 12V$ ), capaz de gerar uma força eletromagnética de  $25N$ .
- **Transistor:** o transistor é escolhido de forma a atender a demanda de corrente do eletroímã ( $I = P/V = 3/12 = 250mA$ ), capaz de desempe-

nhar um funcionamento como chave para que o sinal de controle possa ser enviado via PWM.

- **Diodo de roda livre:** como o eletroímã é composto por uma bobina com vários enrolamentos, faz-se necessário o uso de um diodo de roda livre devido ao alto fator indutivo da carga. Quando o transistor entra em corte, o diodo de roda livre garante um caminho para a corrente proveniente do indutor, evitando que esta danifique as portas do Arduino.
- **Fonte de 12V:** Fonte de alimentação de 12V conectada ao eletroímã, conforme a especificação nominal da carga.

Além destes itens, mais alguns componentes também participam do sistema em questão:

- **Webcam:** uma câmera é utilizada para captar imagens momentâneas do objeto em levitação, a uma taxa de 30 quadros por segundo.
- **PC:** um computador pessoal é utilizado como plataforma para realizar o processamento de imagens captadas pela câmera a fim de determinar a posição momentânea do objeto.

## 5 Controle

### 5.1 Estudo da Dinâmica do Sistema

A câmera disponível possui uma taxa de  $30fps$  (30 *frames per second* ou quadros por segundo), o que é um valor comercialmente comum. Com essa taxa, obtemos uma amostra (uma imagem) a cada  $33.33ms$ .

Segundo as equações da cinemática, a altura do ímã (considerando um referencial  $h = 0$  na altura do eletroímã, crescendo de cima para baixo) é dada por:

$$h(t) = h_0 + v_0 t + \frac{g t^2}{2} \quad (5)$$

Sendo a altura entre a base e o eletroímã aproximadamente igual a  $25mm$ . O tempo de queda livre do ímã da altura do eletroímã até a base, considerando velocidade inicial nula, é calculada por:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,025m/s}{9,81m/s^2}} = 0.07s \quad (6)$$

A cada  $0.07s$ , 20 amostras representariam uma amostragem ideal, resultando em um tempo de amostragem de  $3.55ms$ , muito inferior à taxa de quadros por segundos da câmera.

Devido a este resultado, a técnica de controle escolhida foi *on-off*.

O software em LabView obtém a posição do eletroímã, enquanto que o software no arduíno a compara com um referencial pré estabelecido. Se a posição atual do ímã for inferior à deste referencial, o eletroímã é acionado. Caso contrário, o eletroímã é desligado.

O controle realizado no arduíno está melhor detalhado na Seção 6, que trata do software.



## 6 Software

O software do projeto é dividido em duas partes: uma implementada no computador (Labview), responsável por processar as imagens captadas pela webcam de forma a identificar a posição do objeto levitado; enquanto a outra, desenvolvida no Arduíno, é responsável por calcular o sinal de controle e enviá-lo para o circuito de acionamento.

O computador e o arduino trocam dados a partir de uma comunicação serial: identificada a posição do objeto no programa do Labview, esta é enviada para o arduino, que utiliza a informação como parâmetro de entrada para o controle.

### 6.1 LabView

Primeiramente, a webcam é inicializada. Como esta possui um período inicial de transição com aquisição imperfeita da imagem, uma pequena correção é feita para ignorar este período. Uma vez que a imagem esteja normalizada, *features* na imagem são lidas. A primeira *feature* é o ponto da origem para o cálculo da distância entre o objeto e o eletroímã, localizada na superfície inferior do eletroímã. Em seguida, o objeto é representado por um retângulo.

Neste momento, o software entra em um *loop*, onde adquire a imagem, identifica o objeto, calcula sua altura diminuindo sua posição da origem e envia este valor para o Arduíno no formato *char* em ASCII, lido rapidamente pelo arduino.

### 6.2 Arduíno

O software do Arduíno recebe do software em LabView a posição do ímã. Esta é comparada com um valor de referência pré-estabelecido. Se for superior a este valor, o eletroímã é desligado. Se for inferior, o eletroímã é acionado. No código do software abaixo, é visível a utilização de um LED RGB para melhor visualização do estado atual.

```

const int redPin = 9;
const int greenPin = 10;
const int bluePin = 11;
const int sensorPin = A5;
const int pwmPin = 5;
const int sw = 2;
const int posRef = 100;
const int posMax = 92;
int pos = 1000;
int ini = 1;

void setup(){
  pinMode(redPin, OUTPUT);
  pinMode(greenPin, OUTPUT);
  pinMode(bluePin, OUTPUT);
  pinMode(sensorPin, INPUT);
  pinMode(sw, INPUT);
  Serial.begin(115200);
  analogWrite(pwmPin, 0);
  setColor(0,0,255);
}

void loop(){
  if(digitalRead(sw)){
    if(Serial.available()>0){
      pos = Serial.read();
    }
    control(pos);
  }
  else{
    analogWrite(pwmPin, 0);
    setColor(0,0,255);
  }
}

void control(int pos){
  int u;
  if (pos <= posRef) ini = 0;
  if (pos < posMax) {
    setColor(255,0,0);
    analogWrite(pwmPin, 0);
    //Detectou
  }
}

```

```

    }
    else {
        if(ini){
            analogWrite(pwmPin,255);
            setColor(255,50,0);
        }
        else{
            u = map(pos,posMax,105,0,255);
            setColor(0,255,0);
            analogWrite(pwmPin, u);
        }
    }
}

void setColor(int red, int green, int blue)
{
    analogWrite(redPin, red);
    analogWrite(greenPin, green);
    analogWrite(bluePin, blue);
}

```

O código do Labview comentado está abaixo:

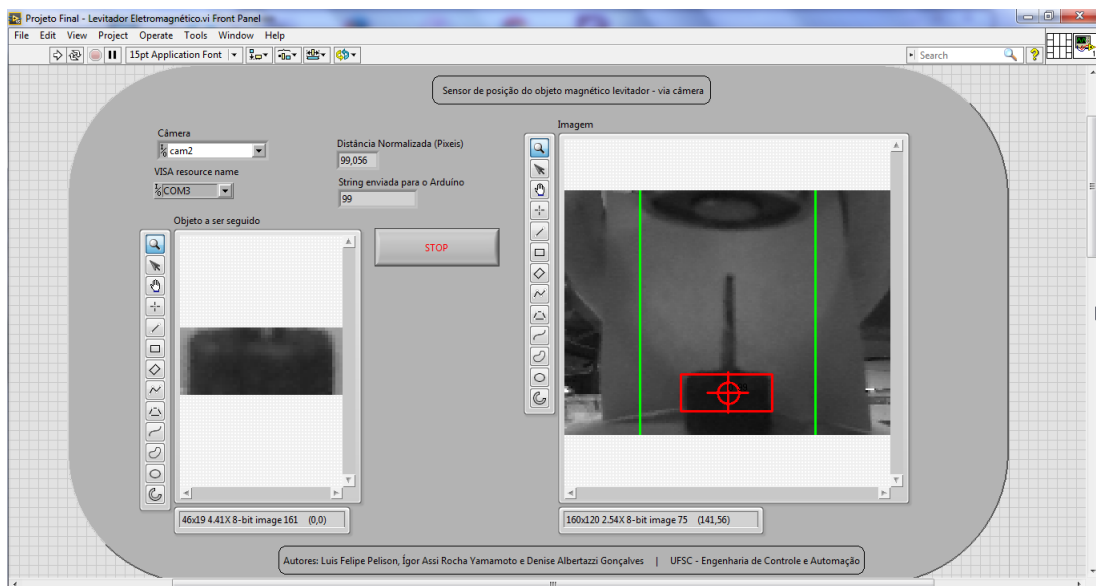


Figura 4: Interface do programa em LabView.

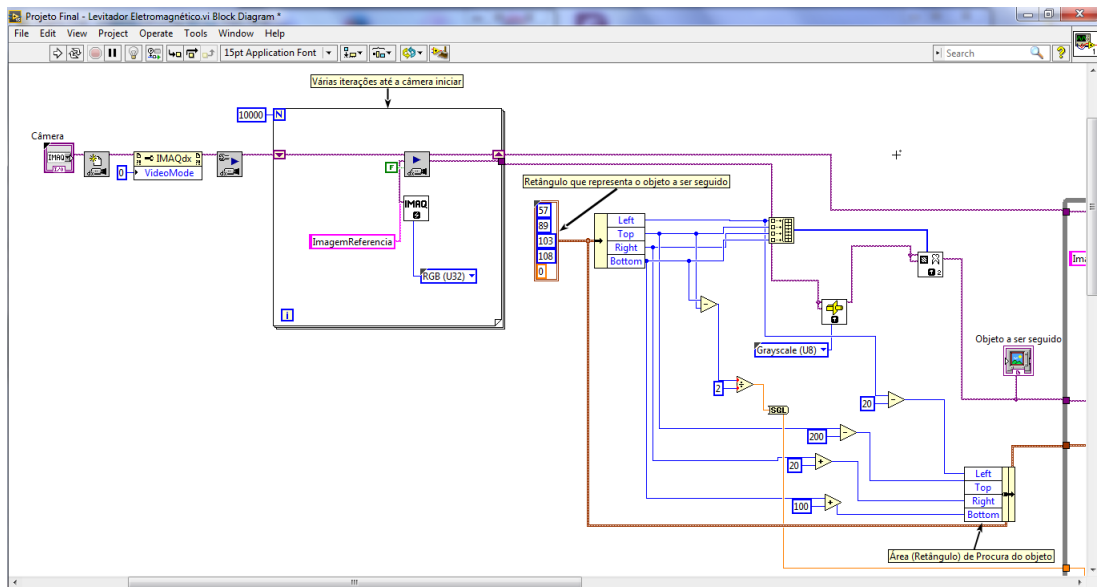


Figura 5: Parte 1 do código implementado em Labview.

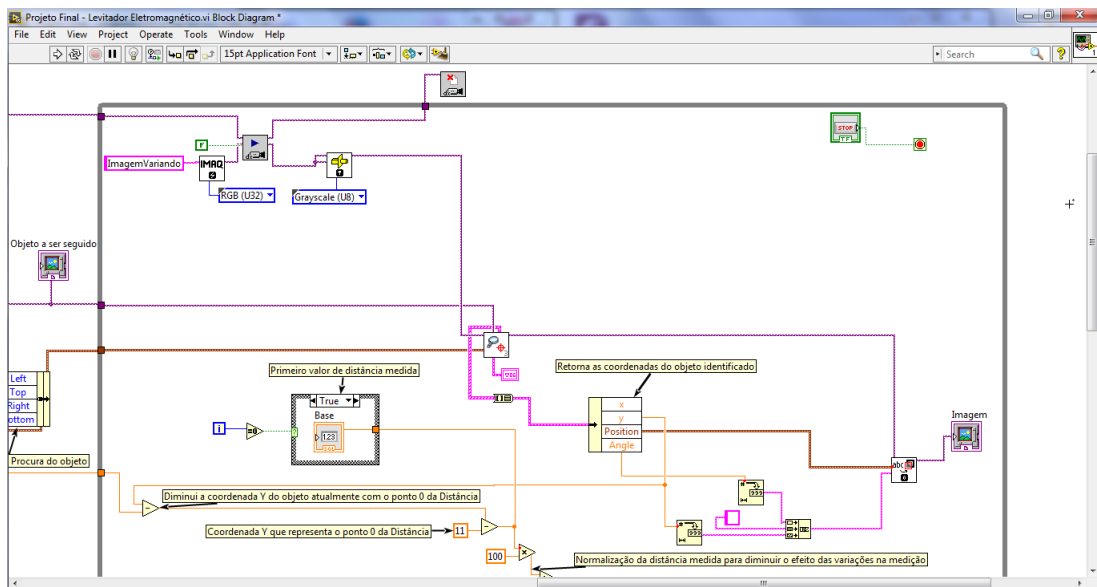


Figura 6: Parte 2 do código implementado em Labview.

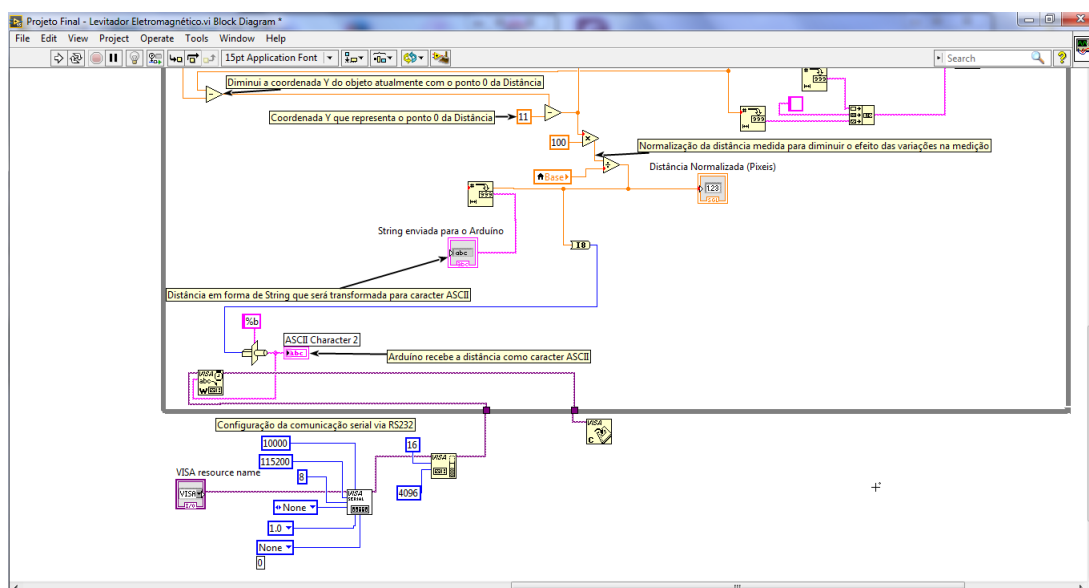


Figura 7: Parte 3 do código implementado em Labview.

## 7 Imagens da Confecção do Projeto

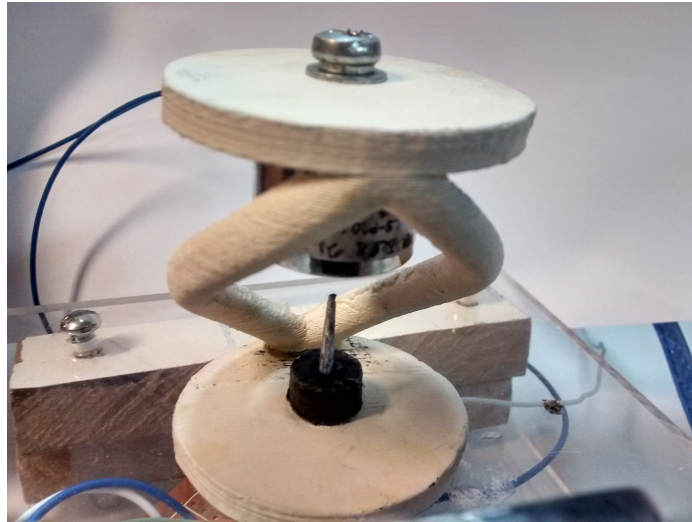


Figura 8: Eletroímã fixado no topo da estrutura confeccionada em impressora 3D

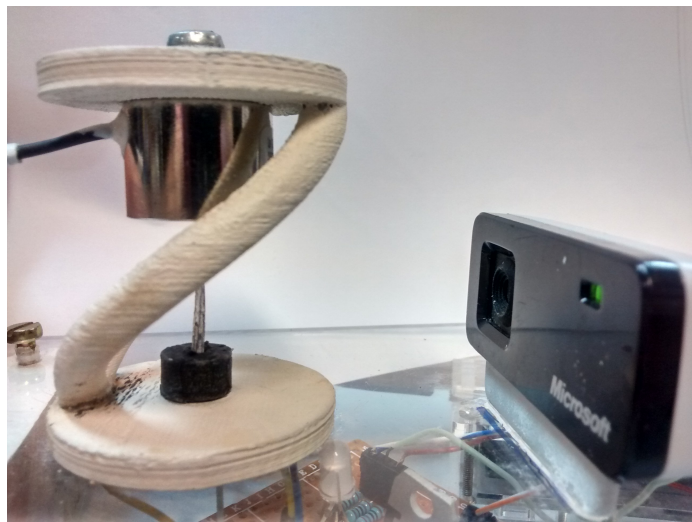


Figura 9: Câmera captando a posição do objeto preto (ímã de neodímio)

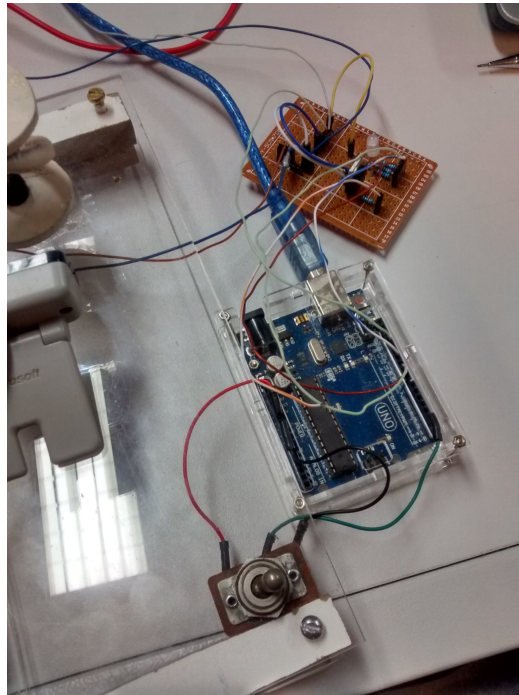


Figura 10: Placa de circuito impresso, arduino e switch (usado para ligar/desligar o sistema)

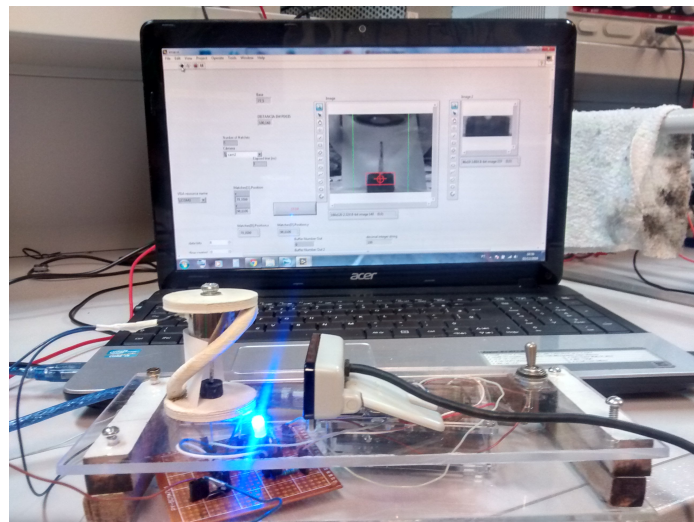


Figura 11: Sistema encapsulado em placas paralelas de acrílico: arduino e placa de circuito impresso no meio; eletroímã e câmera em cima; programa em LabVIEW no computador ao fundo

## Referências

- Hajjaji, A. E. and Ouladsine, M. (2001). Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4):831–838.
- Hurley-Wölflé (1997). Electromagnetic design of a magnetic suspension system. 40.
- Rech, E. (2013). Simulação e controle de um levmag numa plataforma gráfica de desenvolvimento (labview).