



Formando líderes para la construcción  
de un nuevo país en paz

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN DE PARTÍCULAS CON VISIÓN ARTIFICIAL EN UN LEVITADOR DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Autor: EDINAEL SANGUINO OLIVARES

Tutor: M.Sc. OSCAR MANUEL DUQUE SUAREZ

# OBJETIVOS



1

Estudiar el fenómeno que rige la levitación acústica y los criterios de diseño necesarios para la levitación acústica, para diseñar un prototipo capaz de suspender partículas en el aire

2

Seleccionar los componentes eléctricos, mecánicos y demás dispositivos necesarios para el control y levitación de partículas

3

Diseñar un algoritmo de visión artificial capaz de localizar con exactitud la partícula dentro de un plano bidimensional (X, Z).

4

Diseñar el control clásico de la planta de levitación para dos ejes y un sistema de monitoreo y medición de la partícula que permita la gestión de su control a través de una HMI.

5

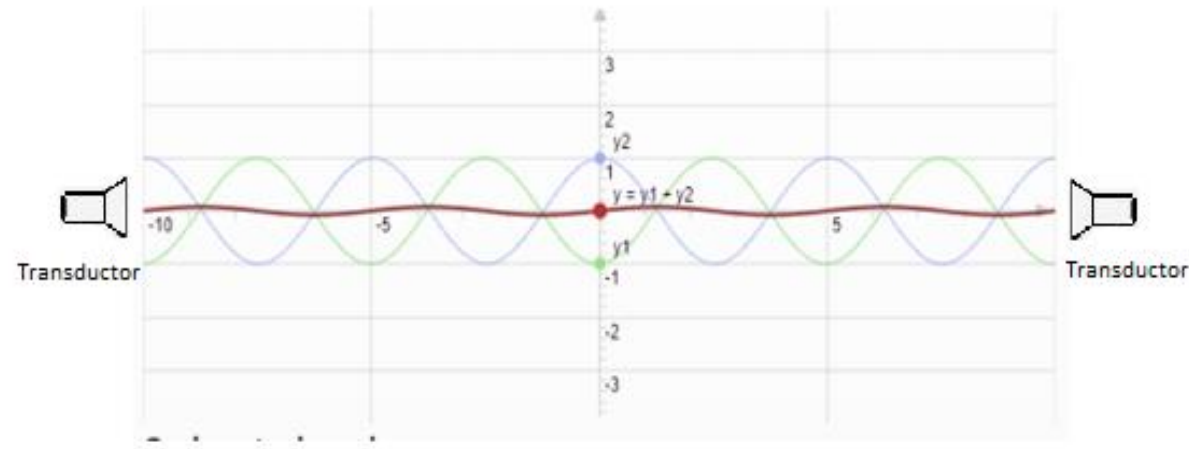
Validar el correcto funcionamiento de la planta y el sistema de control.

Desarrollar un sistema de control de posición de partículas con visión artificial en un levitador de ondas ultrasónicas.



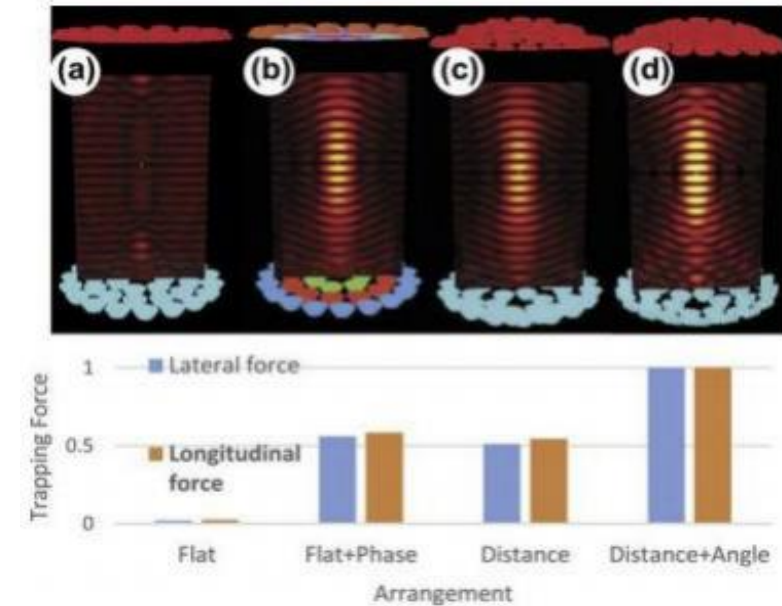
# Objetivo 1. Estudio del fenómeno que rige la levitación acústica para el diseño del prototipo de levitación

Gráfica 2 Onda viajera del resultado de las dos ondas contrapuestas desfasadas  $90^\circ$



Fuente: <https://www.fisicalab.com/apartado/ondas-estacionarias>

Figura 1 Configuración de posición de los transductores

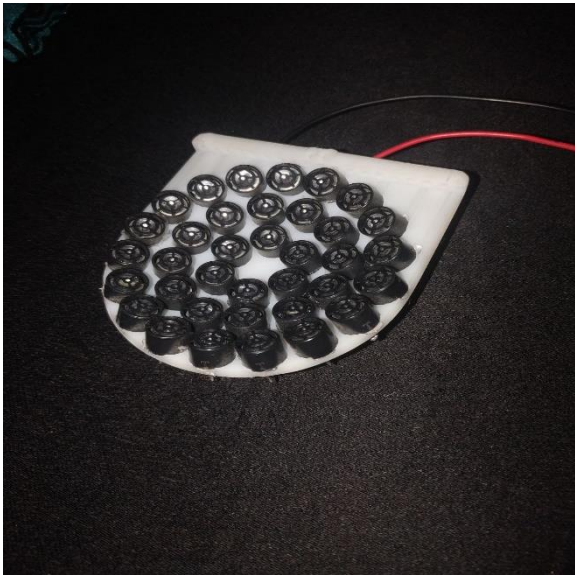


Fuente: (Marzo, Barnes, & Drinkwater, TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator, 2017). Tomado de: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4989995>

# Objetivo 1. Estudio del fenómeno que rige la levitación acústica para el diseño del prototipo de levitación

## Diseño del prototipo

Figura 3 Matriz del Levitador TinyLev



Fuente: Propia

Figura 61 Prototipo final perspectiva



Fuente: Propia.

Figura 62 Prototipo final frontal

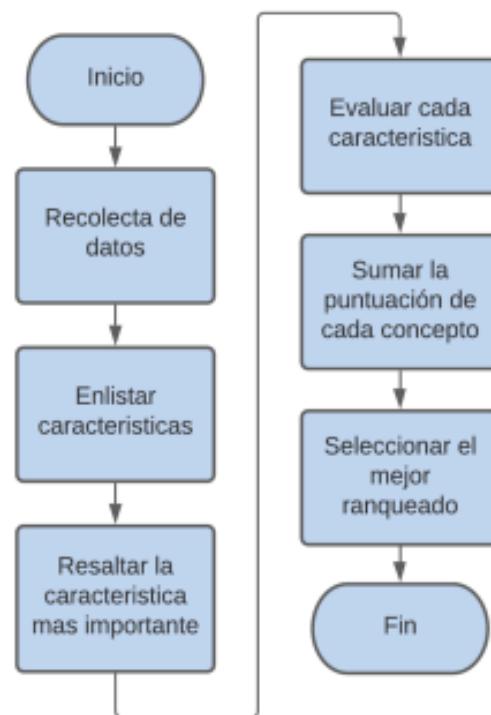


Fuente: Propia

## Objetivo 2. Selección de componentes



### Metodología





## Objetivo 2. Selección de componentes



### Selección del microprocesador

Componente	Lenguaje de programación	Velocidad de procesamiento	Conexión con periféricos (Cámara y pantalla LCD)	Salidas	Comunicación	Costo	Total
Raspberry Pi 3 B+	4	4	5	5	5	5	28
Módulo CMUCAM3	3	2	3	1	3	3	15
Mini computador Intel NUC	5	5	4	1	4	2	21

### Tarjeta de control de los transductores

Tarjeta	Voltaje	Pines PWM	Lenguaje	Reloj	Memoria Flash	SRAM	EEPROM	Ensamble	Costo	Total
Arduino Uno	4	4	5	5	3	4	3	4	3	35
Arduino Mega	4	5	5	5	5	5	4	3	1	37
Arduino Nano	5	4	5	5	3	3	3	5	5	38

### Puente H para la potencia de los transductores

Componente	Voltaje de alimentación	Voltaje de salida	Corriente Máxima	Disipador	Temperatura de trabajo	Costo	Total
Shield Puente H L298P	5	4	5	1	4	3	22
Módulo puente H L298N	5	5	5	5	5	4	29
Puente H Dual L9110S	5	4	2	1	3	5	20
Puente H HG7881	5	4	2	1	3	5	20



## Objetivo 2. Selección de componentes



### Selección de la pantalla LCD

Componente	Alimentación	Compatibilidad	Tamaño	Resolución	Táctil	Precio	Total
Raspberry Pi 7" Touchscreen Display	5	5	5	4	5	4	28
Pantalla táctil LCD 7" Ssd1963	4	5	5	4	5	3	26
Geekpi 7" LCD	3	4	5	5	1	5	23

### Cámara

Componente	Resolución	Video	Resolución del sensor	Tamaño	Compatibilidad	Costo	Total
Raspberry Pi Camera V1	3	5	3	5	5	5	26
Raspberry Pi Camera V2	4	5	5	5	5	4	28
Raspberry Pi HQ Camera	5	5	5	3	5	3	26

### Microcontrolador para el algoritmo de control

Tarjeta	Voltaje	Pines PWM	Lenguaje	Reloj	Memoria Flash	SRAM	EEPROM	Ensamble	Costo	Total
Arduino Uno	4	4	5	5	3	3	3	4	3	34
Arduino Mega	4	5	5	5	5	5	5	3	1	38
Arduino Nano	5	3	5	5	3	3	3	5	5	37

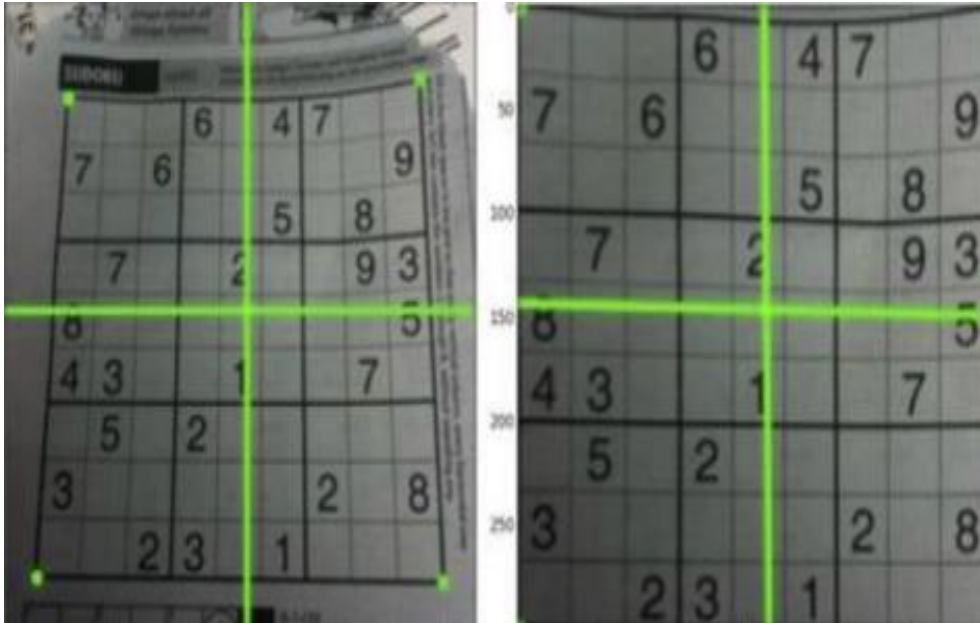


# Objetivo 3. Algoritmo de visión artificial

## Matriz de perspectiva

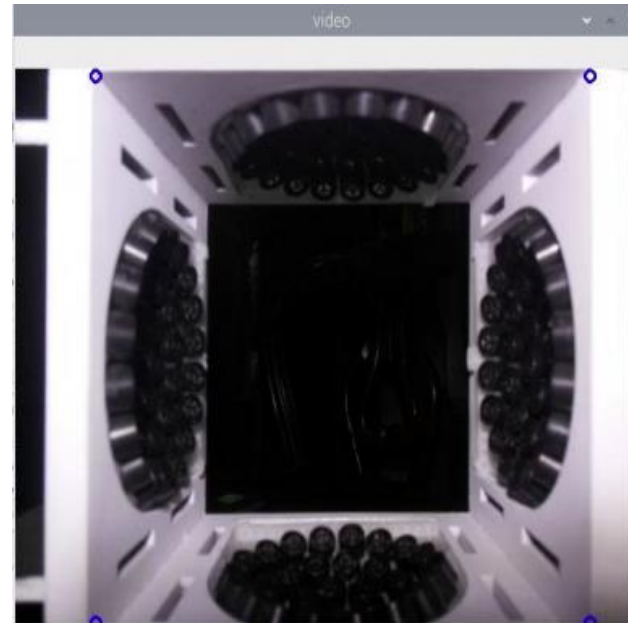
```
M1 = np.float32([[81,6], [581,6], [81,478],[581,478]])  
M2 = np.float32([[0,0], [440,0], [0,420],[440,420]])  
M = cv2.getPerspectiveTransform(M1, M2)
```

Figura 91 Código de matriz de perspectiva de OpenCV de ejemplo



Fuente: [https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_geometric\\_transformations/py\\_geometric\\_transformations.htm](https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_geometric_transformations/py_geometric_transformations.htm)

Figura 90 Esquina identificadas en el video



Fuente: Propia

Figura 92 video centrado



Fuente: Propia

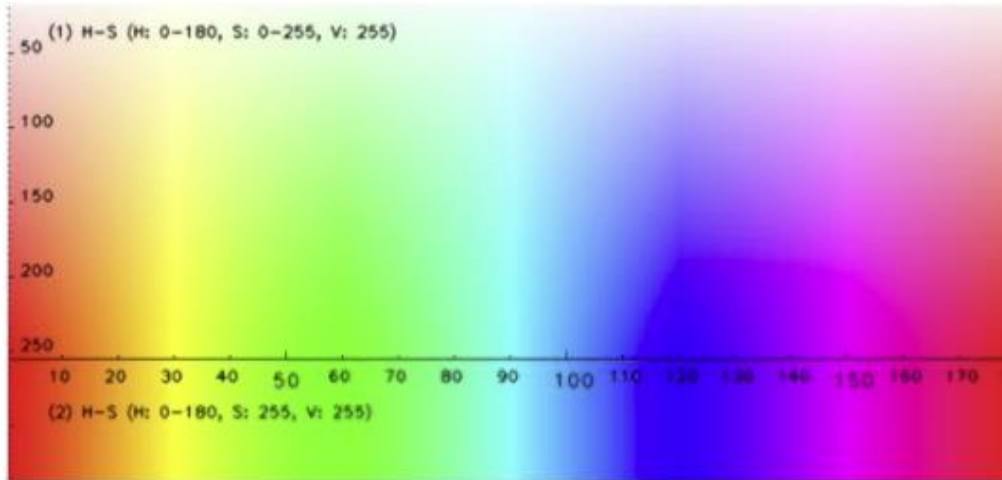


# Objetivo 3. Algoritmo de visión artificial

## Filtro de la partícula por color

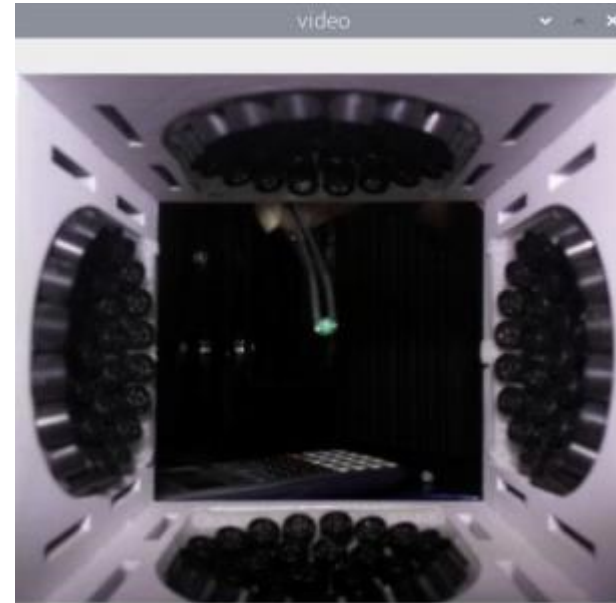
```
rangomax = np.array([94, 250, 250], np.uint8)
rangomin = np.array([61, 23, 35], np.uint8)
```

Figura 100 Matiz y saturación en HSB



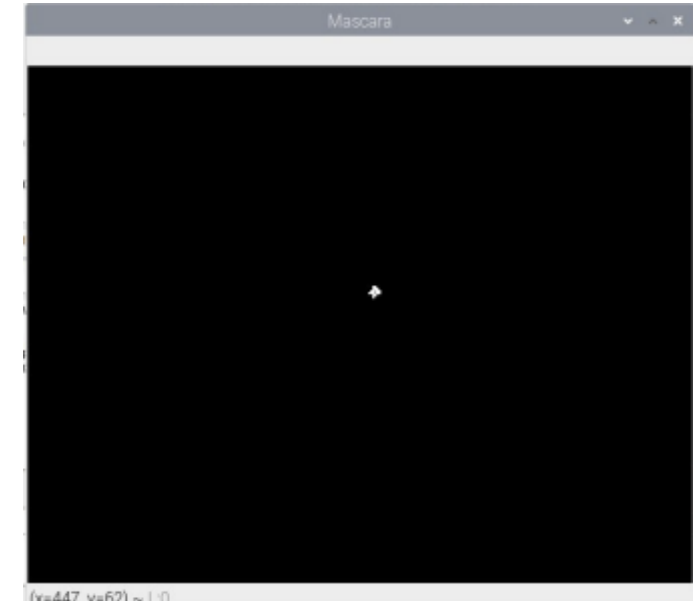
Fuente: <https://omes-va.com/wp-content/uploads/2019/09/gyuw4.png>

Figura 101 Imagen capturada



Fuente: Propia

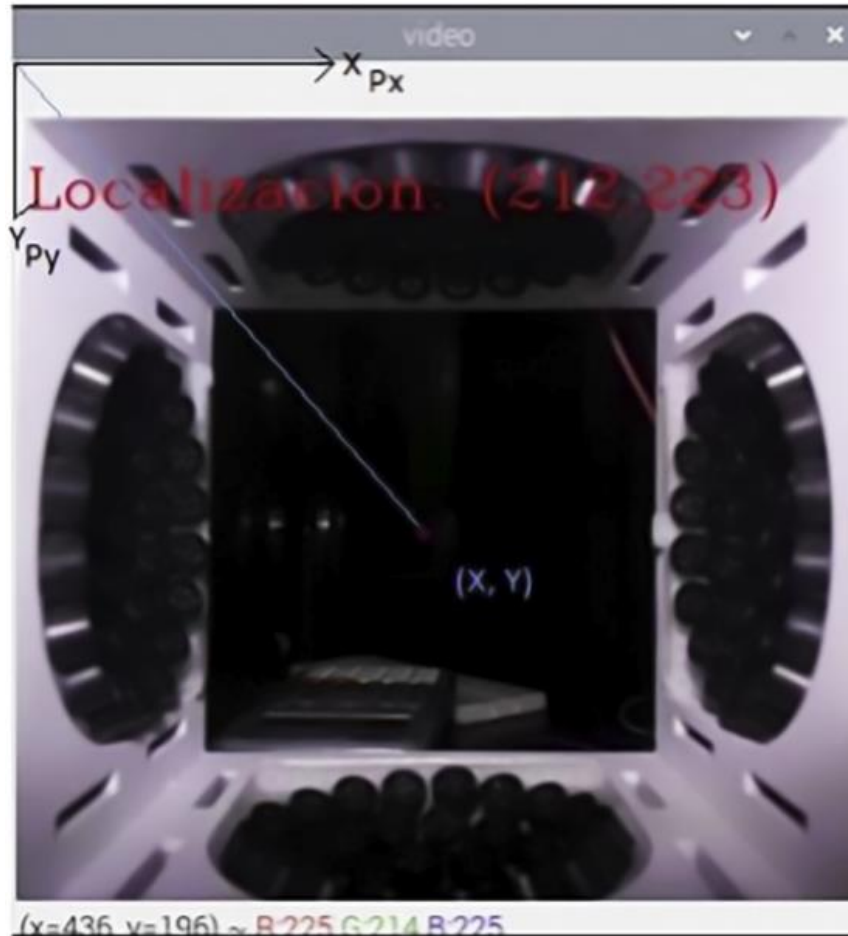
Figura 102 Imagen filtrada



Fuente: Propia

# Objetivo 3. Algoritmo de visión artificial

Figura 103 Ubicación de la partícula en píxeles



Fuente: Propia

$$Vx_{mm} = 110mm / 440px = 0.25mm$$

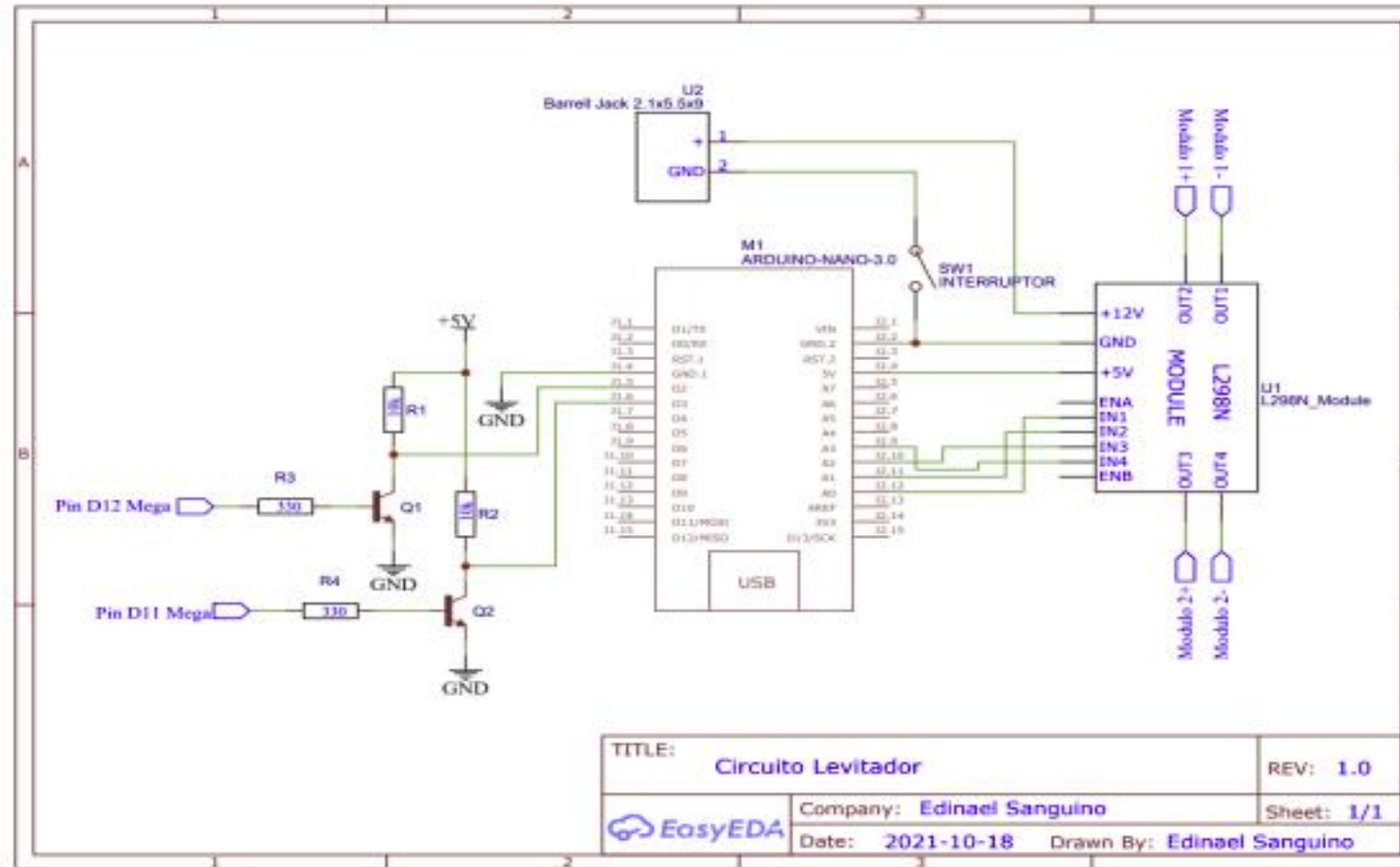
$$Vy_{mm} = 105mm / 420px = 0.25mm$$

## Objetivo 3. Algoritmo de visión artificial



## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Figura 64 Esquemático del sistema eléctrico del levitador en easyEDA



Fuente: Propia.



## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador





# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

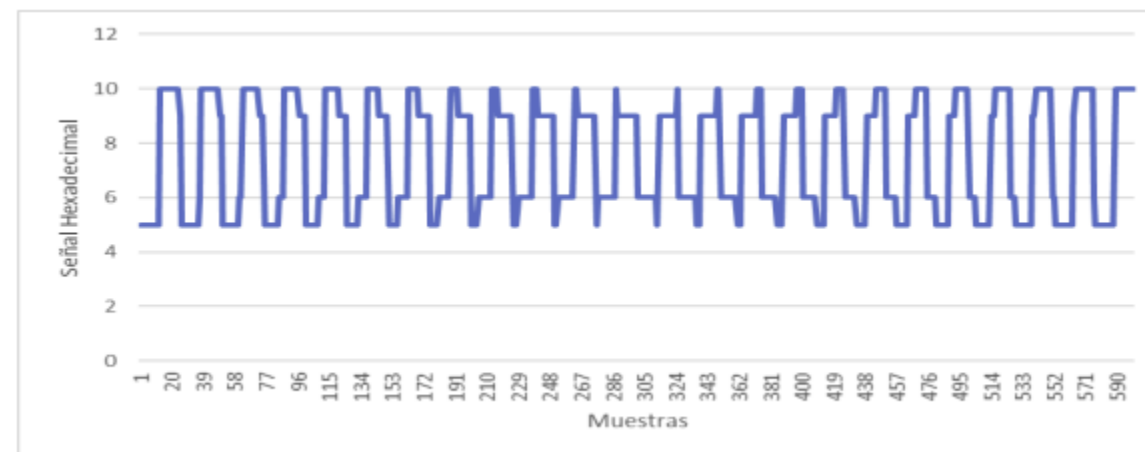
## Generación de la señal de 40 KHZ



```
static byte animation[N_FRAMES][N_DIVS] =  
{  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x5,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa},  
  {0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0xa,0xa,0xa},  
  {0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x9,0x9,0x9,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6,0x6},  
  {0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x5,0x9,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0xa,0x6,0x6}};
```

Fuente: (Marzo, Barnes, & Drinkwater, TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator, 2017). Tomado de: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4989995>

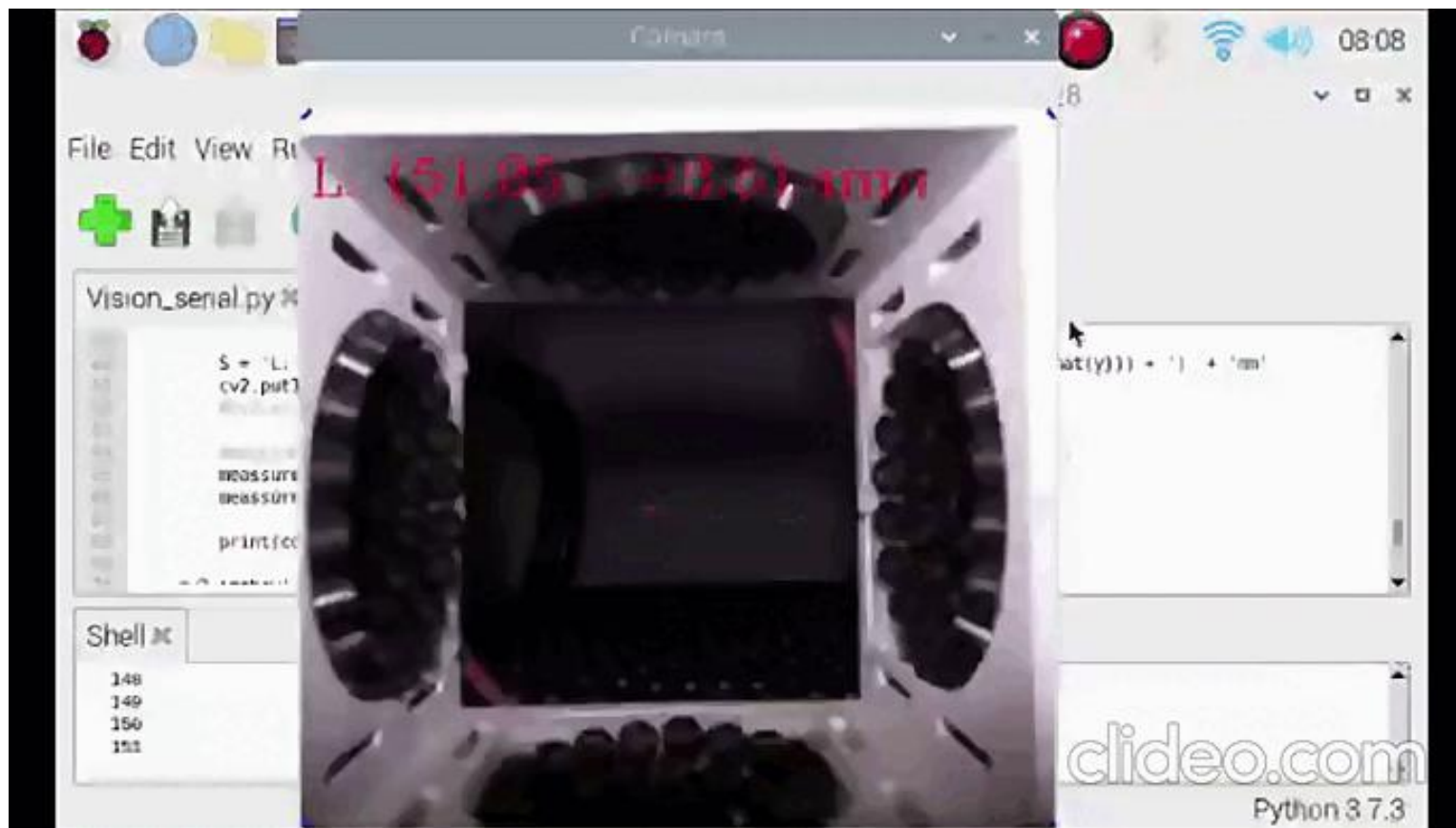
Gráfica 5 Señal de salida de la matriz animation



Fuente: Propia.

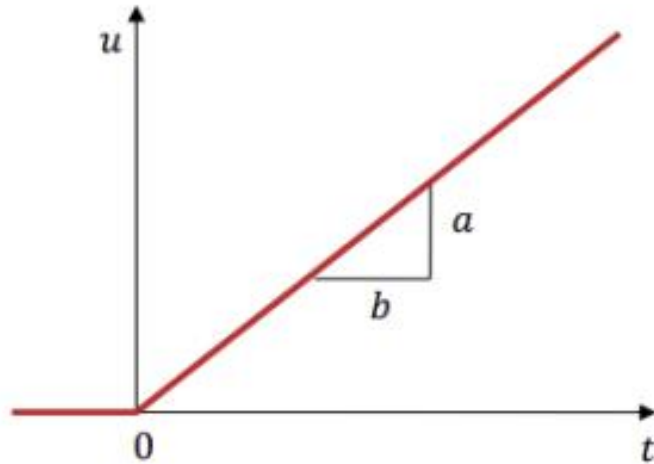


## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador



# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Gráfica 12 Entrada de tipo rampa



Fuente: (Dulhoste, Jean-Francois – Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela)

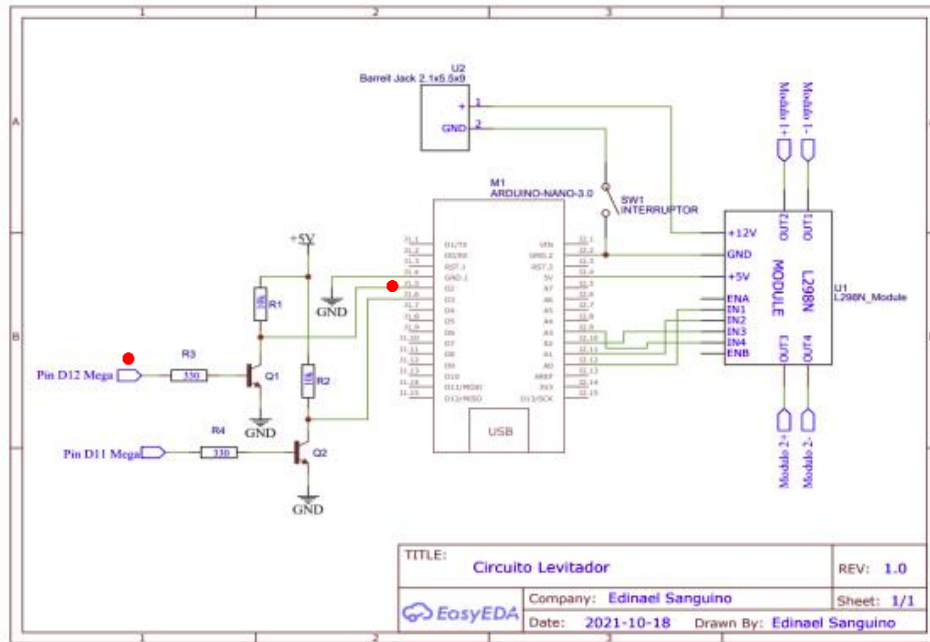
Figura 123 Expresión matemática de la entrada rampa

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \\ Ht & \text{para } t \geq 0 \end{cases}$$

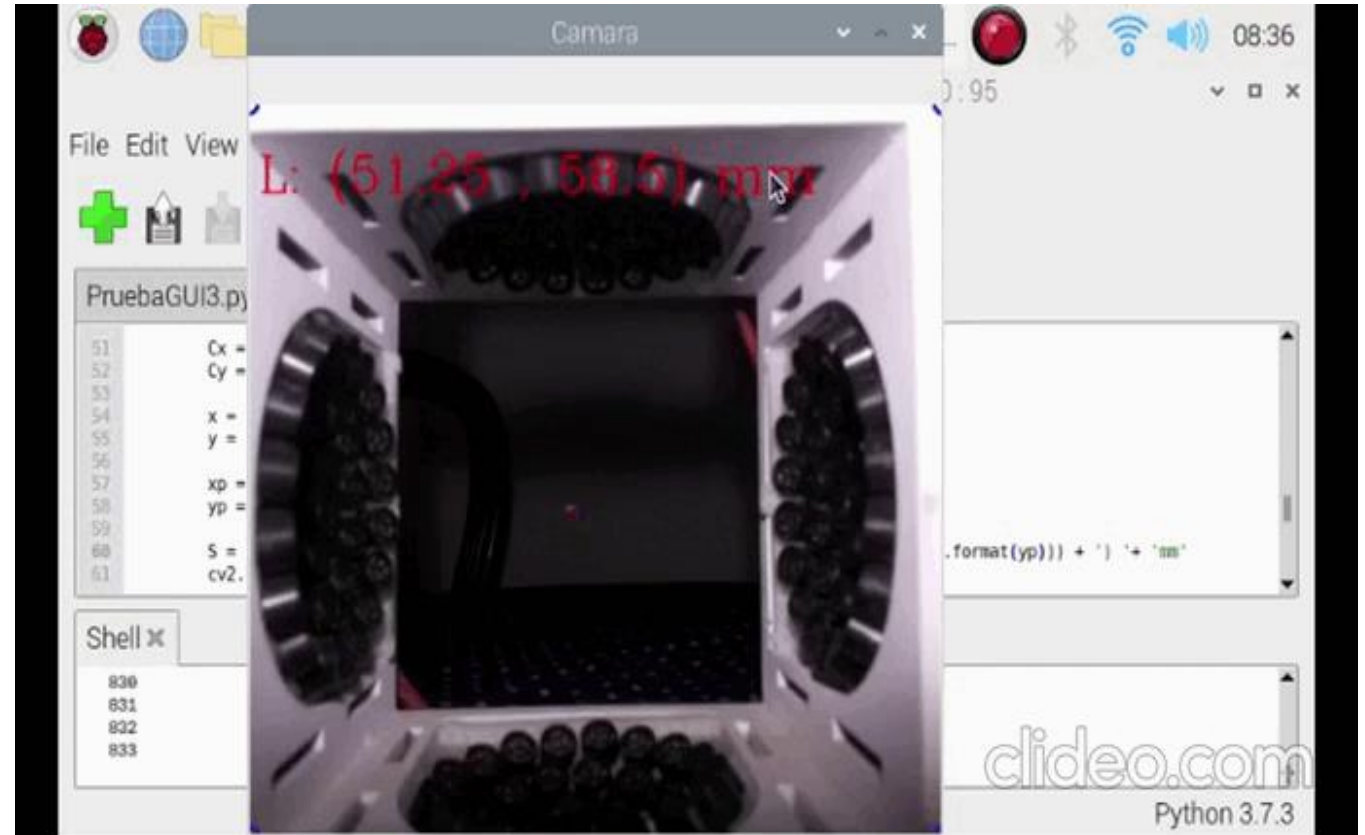
Fuente: (Dulhoste, Jean-Francois – Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela)

# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Figura 64 Esquemático del sistema eléctrico del levitador en easyEDA



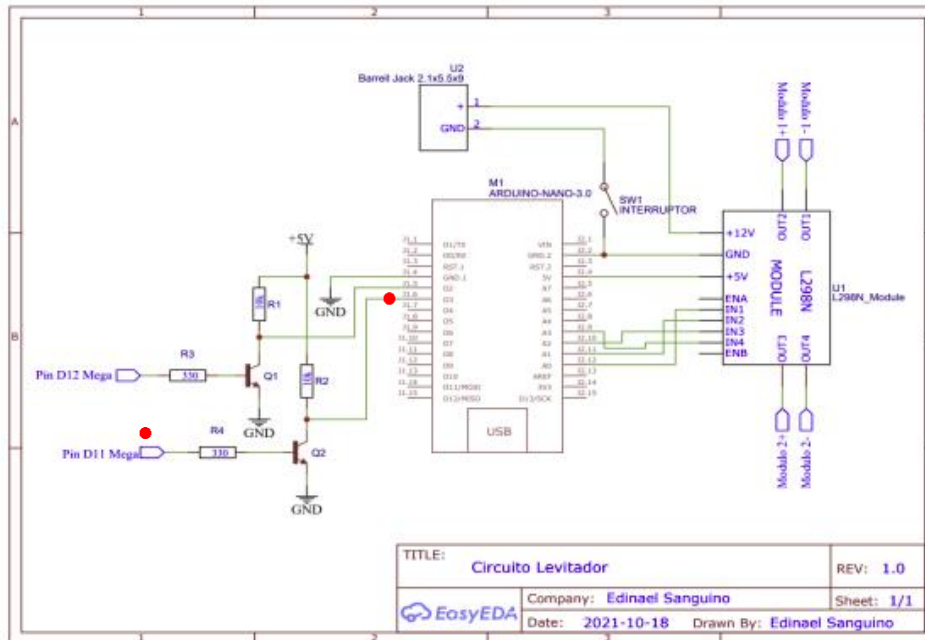
Fuente: Propia.



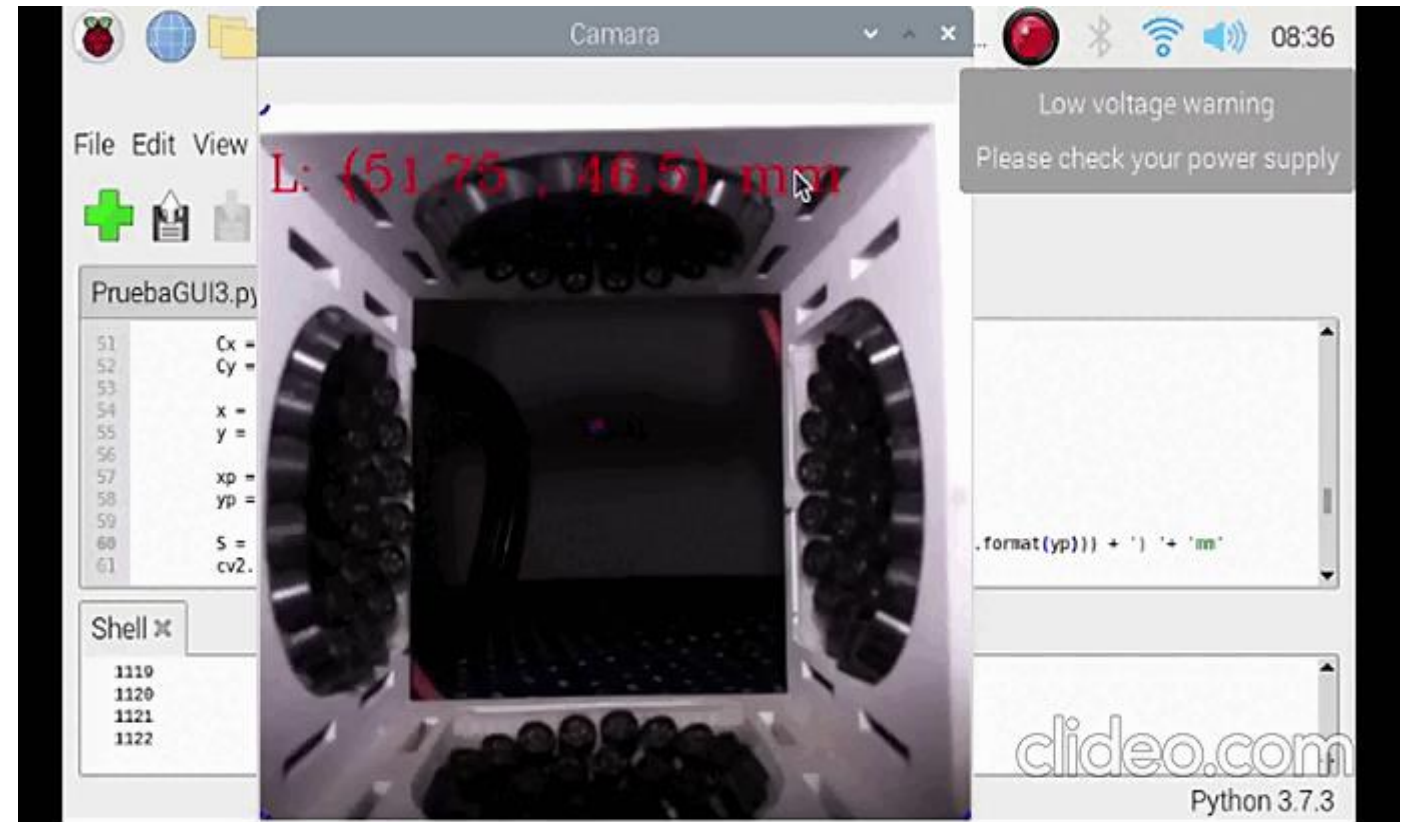


# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Figura 64 Esquemático del sistema eléctrico del levitador en easyEDA



Fuente: Propia.

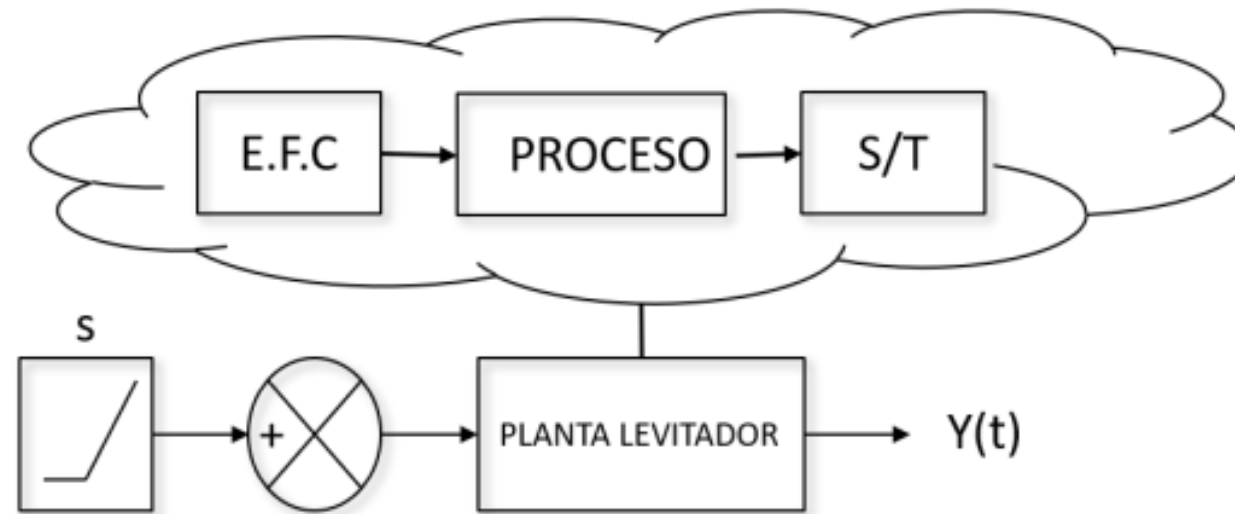




# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

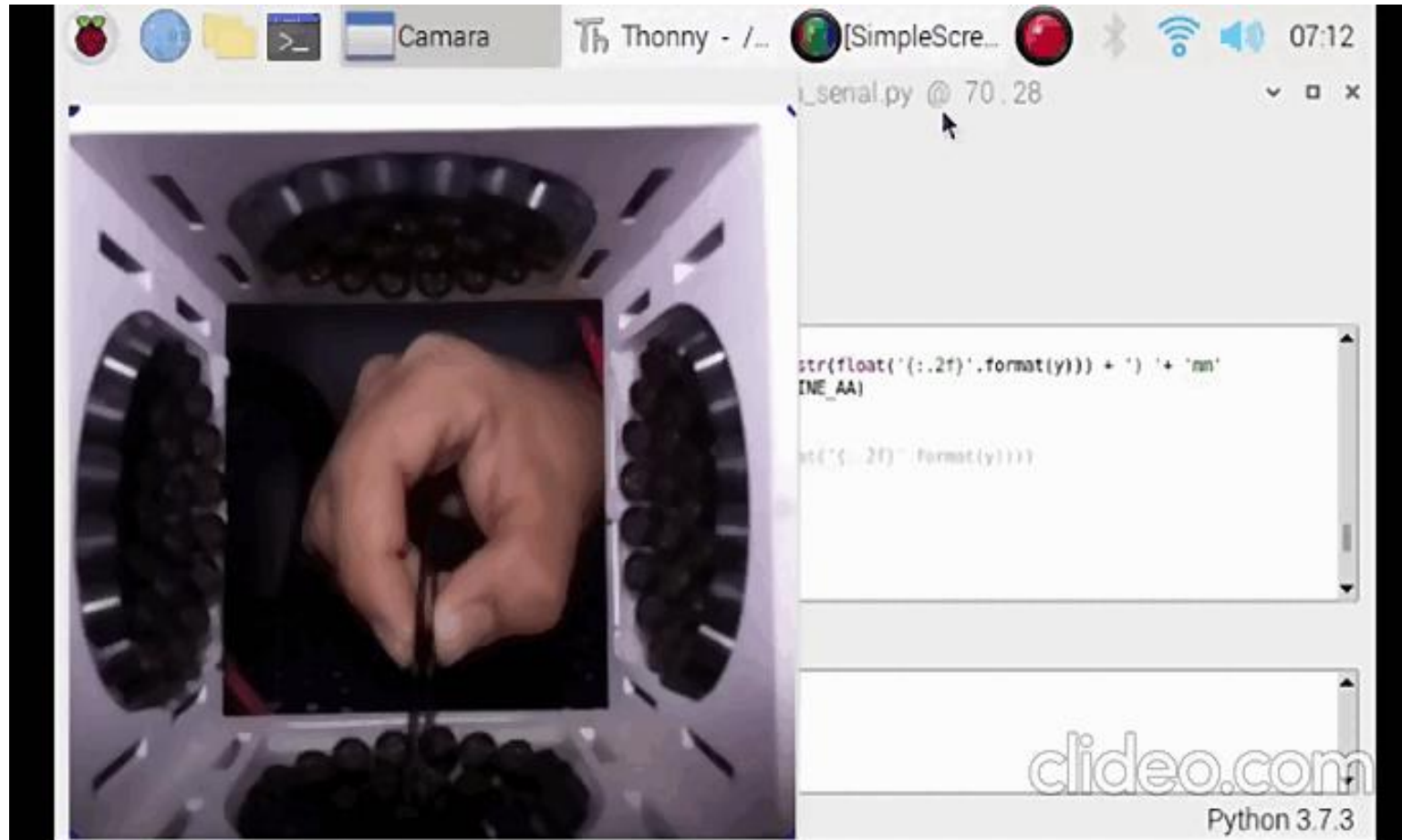
## Identificación del sistema de control

Figura 129 Sistema levitador a lazo abierto detallado



Fuente: Propia.

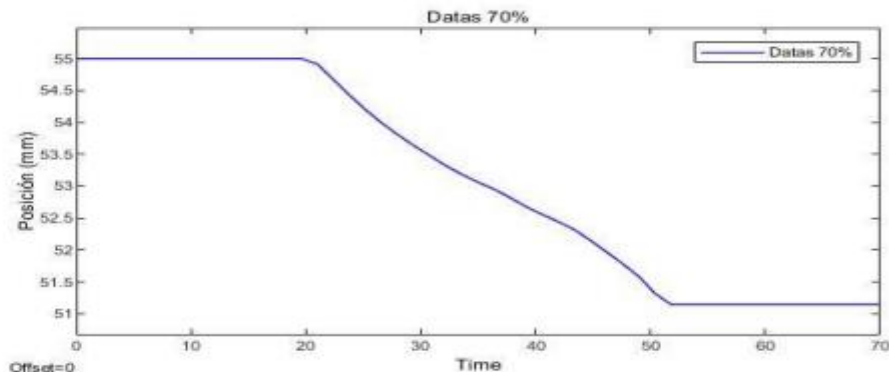
## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador



# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

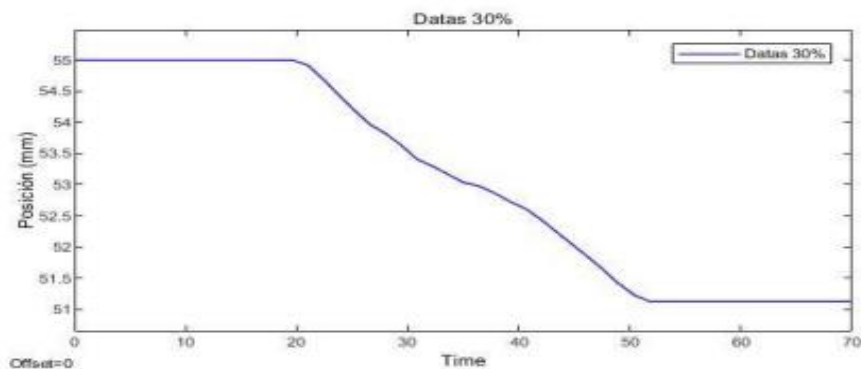
## Identificación del sistema de control

Gráfica 13 Promedio de las datas del 70% para identificación



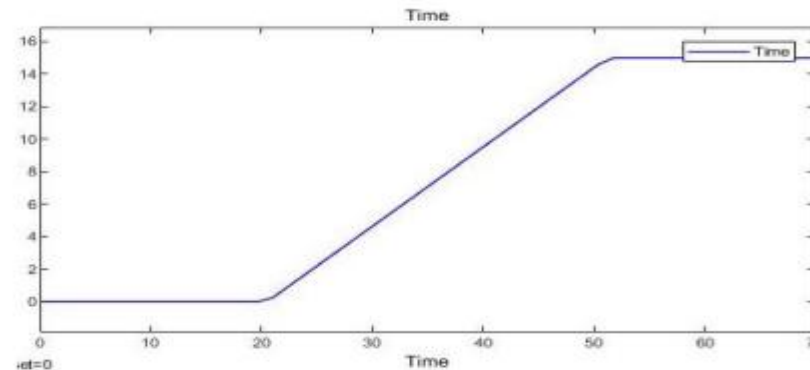
Fuente: Propia.

Gráfica 15 Promedio de las datas del 30% para verificación



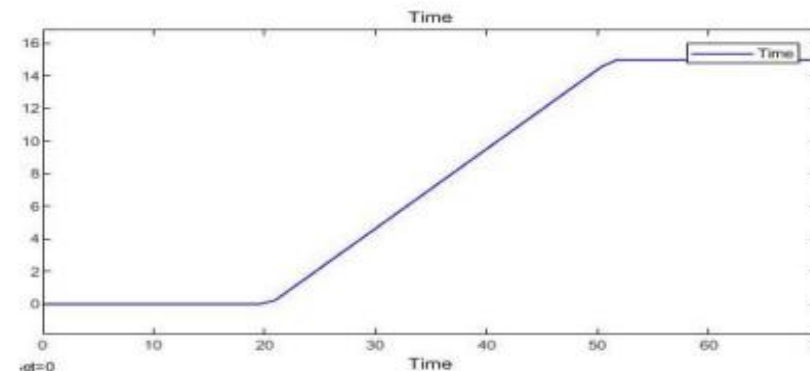
Fuente: Propia.

Gráfica 14 Entrada del sistema de las datas del 70%



Fuente: Propia.

Gráfica 16 Entrada del sistema de las datas del 30%

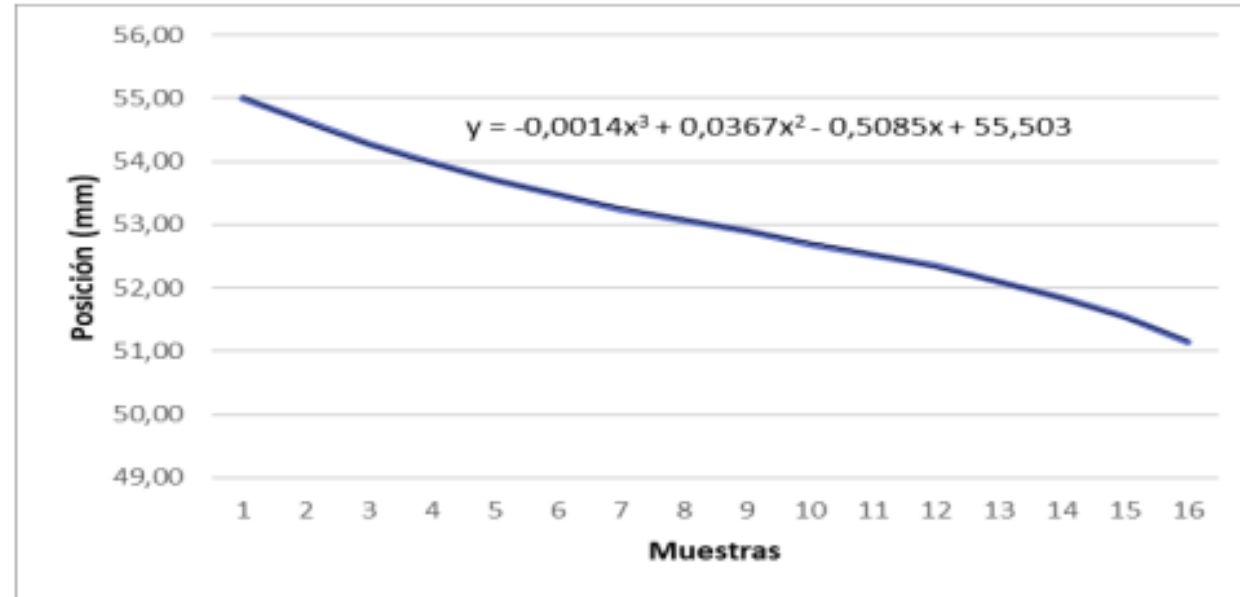


Fuente: Propia.

# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Identificación del sistema de control

Gráfica 22 Ecuación lineal de grado 3 de la salida del sistema



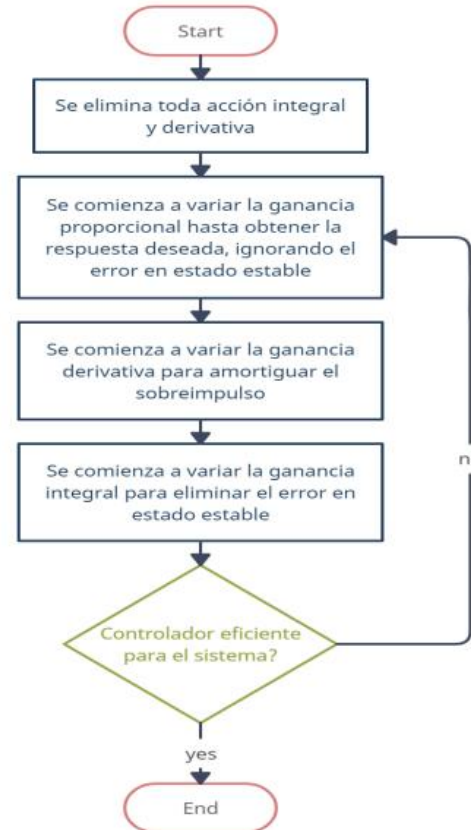
Fuente: Propia.

# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual



Figura 149 Diagrama de flujo de la metodología de sintonización de controladores por ajuste manual



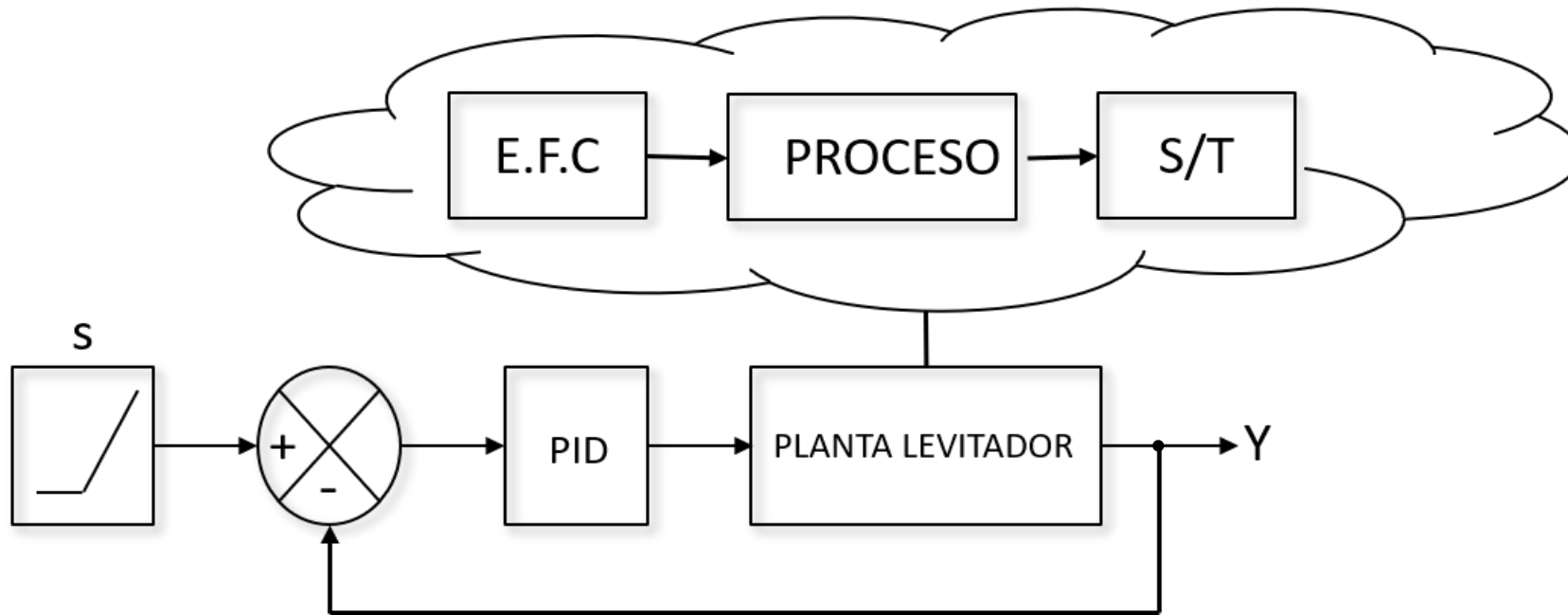
Fuente: Propia.

Evans, W. R. Graphical Analysis of Control Systems. AIEE Trans. Part. II, 1948, 69, pp. 547-551



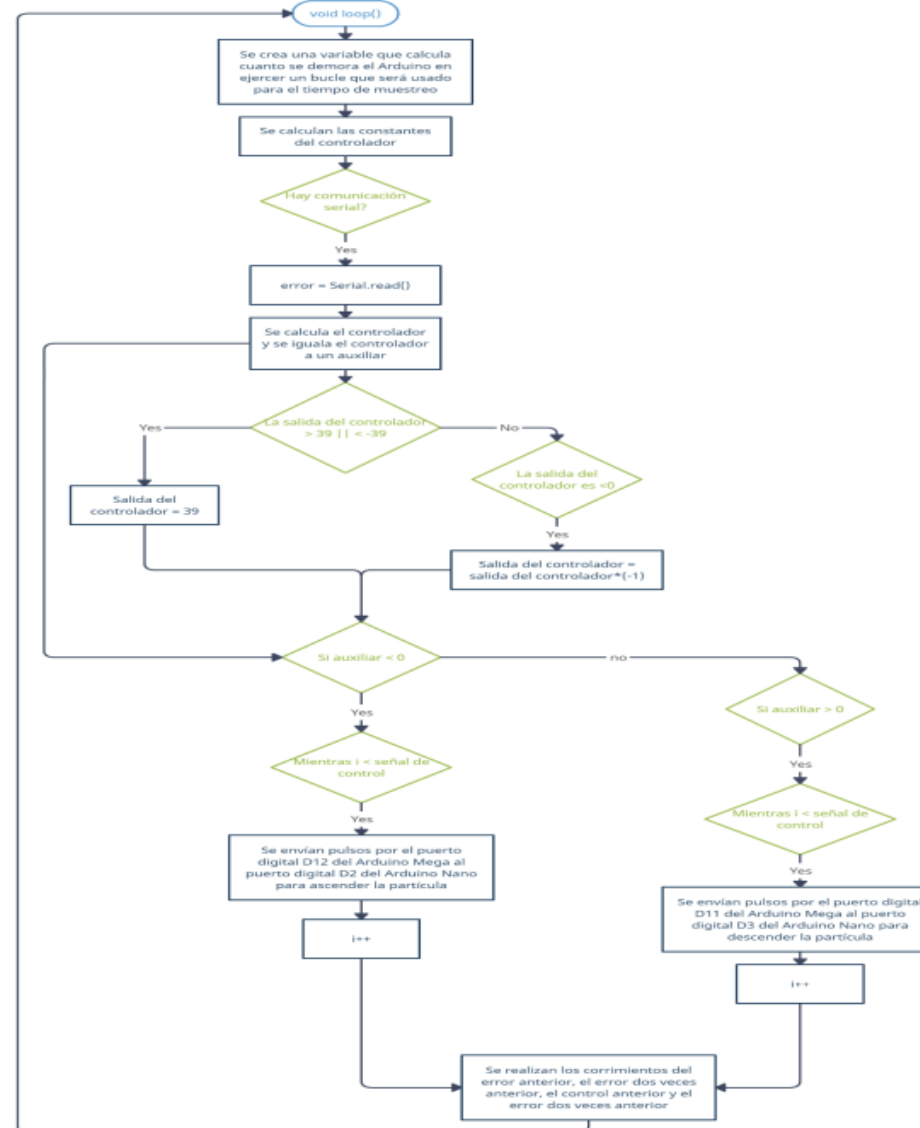


## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador



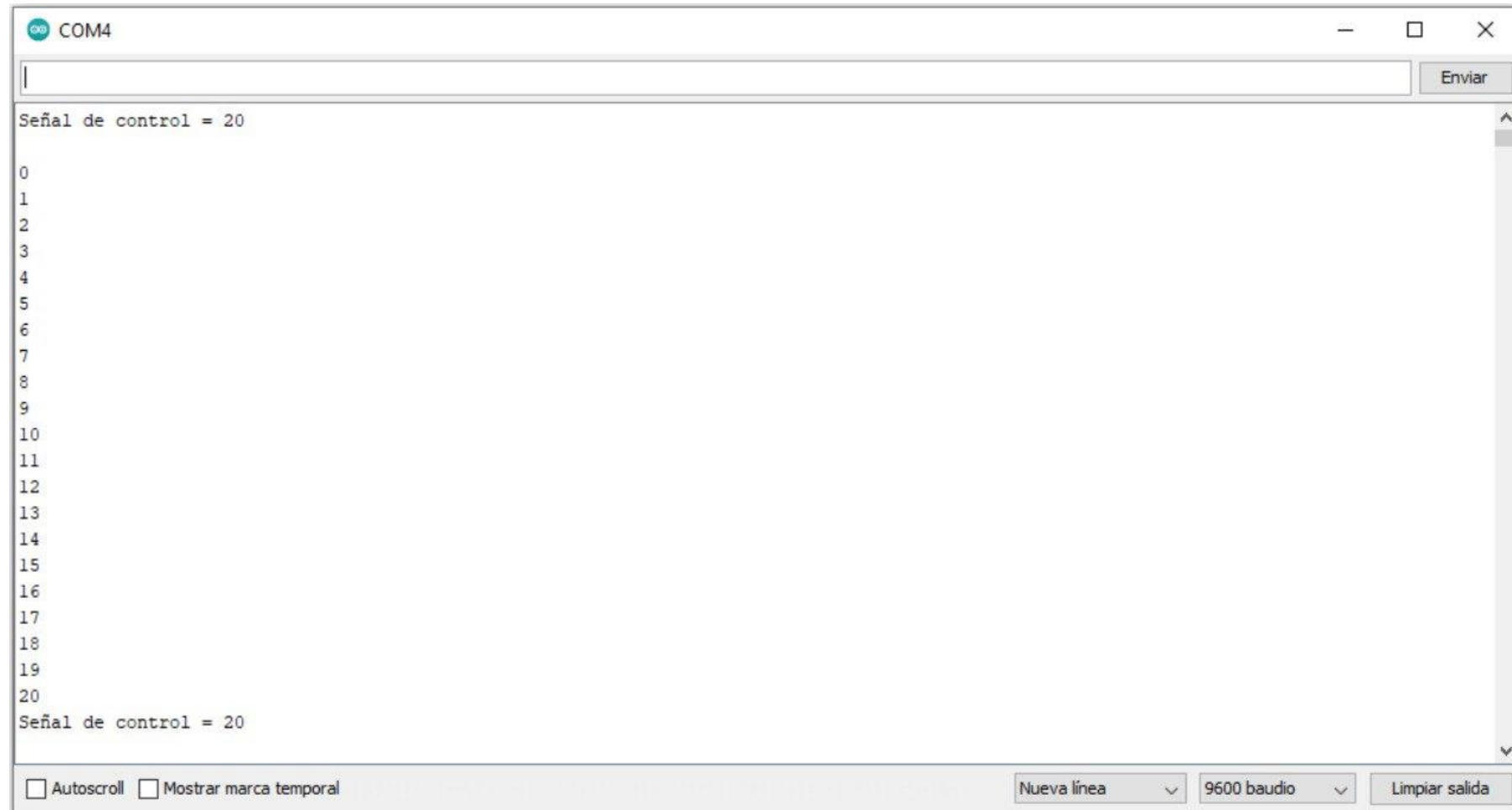
# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Figura 148 void loop del algoritmo de control en el Arduino Mega



Fuente: Propia.

## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador



# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual

### Módulo vertical



Tabla 28 Respuesta de los controladores por el método de discretización aproximado

Sintonia	Inicio (mm)	Regimen transitorio					Regimen estable	
		td (s)	tr (s)	tp (s)	ts (s)	Mp %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
Kp = 1	77,75	62,3	116	No aplica	116	0,11%	55,26	0,47%
Kp = 2	76,26	57,1	117	No aplica	117	0,11%	55,06	0,11%
Kp = 3	70,39	44,6	88,27	93,85	108	1,03%	54,75	0,43%
Kp = 4	77,91	61,2	121,15	140,37	158	6,53%	55,06	0,11%
Kp = 4 y Kd = 1	77,27	84,3	117,7	134,34	153	5,76%	55,06	0,11%
Kp = 4 y Kd = 2	69,89	48,48	90,7	135,46	158	1,58%	54,9	0,18%
Kp = 3 y Kd = 2	76,58	66,6	124,7	144,8	151	0,80%	55,26	0,47%
Kp = 3,5 y Kd = 1,7	74,39	54,08	107,5	111,2	115	1,63%	55,06	0,11%
Kp = 3,5 y Kd = 1,4	74,27	62,9	119,3	127,1	137,3	2,11%	55,06	0,11%
Kp = 3 y Kd = 1,2	73,52	50,3	100,7	106,5	100,7	0,50%	55,26	0,47%
Kp = 2,8 y Kd = 1,5	75,02	51,4	105,1	No aplica	105,1	0,11%	55,06	0,11%
Kp = 2,9 y Kd = 1,5	74,89	44,95	99	No aplica	99	0,11%	54,76	0,11%
Kp = 2,8 y Kd = 1,7	73,77	49,4	101,7	105,04	109,4	0,72%	55,06	0,11%
Kp = 2,9 y Kd = 1,2	78,27	62,3	132,8	125,76	129,4	0,64%	55,06	0,11%
Kp = 3 y Kd = 0,9	73,25	44,4	95,3	97,62	101,8	1,31%	55,26	0,47%
Kp = 2,9, Ki = 1 y Kd = 1,2	74,75	No converge	No converge	No converge	No converge	No converge	inf	inf
Kp = 2,9, Ki = 0,1 y Kd = 1,3	72,25	38,6	157,1	662	No aplica	24,94%	No converge	No converge
Kp = 2,9, Ki = 0,01 y Kd = 1,3	74,64	45,78	99,8	131,99	167,5	10,63%	55,26	0,47%

Fuente: Propia.

$$U(k) = C0. e(k) + C1. e(k - 1) + C2. e(k - 2)$$

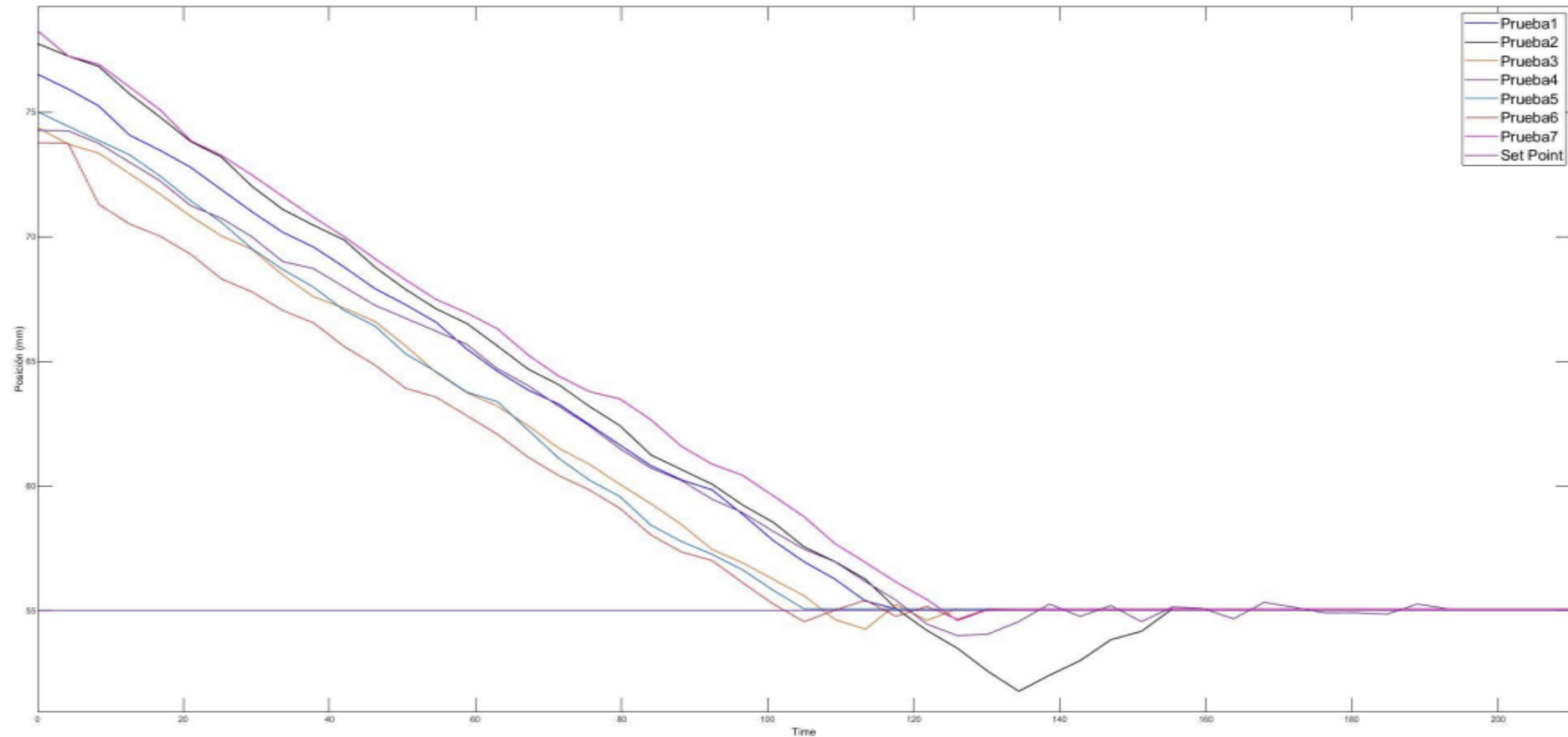


# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual

### Módulo vertical

Gráfica 62 Controladores seleccionados para el módulo de levitación vertical



Fuente: Propia



# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual

### Módulo vertical



Tabla 32 Procedimiento para la selección de los mejores controladores para el módulo vertical

Planta de control de posición en un levitador de ondas ultrasónicas	
Pruebas de controladores	Pruebas de estabilidad para los controladores seleccionados
Numero de muestras	5 muestras
Procedimiento	Set point: 55 mm Respuesta en regimen transitorio: $t_d$ , $t_r$ , $t_p$ , $t_s$ , $M_p$ Respuesta en regimen permanente: Punto de estabilización (mm) Error en estado estable (%)

Fuente: Propia.

Tabla 41 Resultados del controlador  $K_p = 3.6$  y  $K_d = 1.5$

$K_p = 3.6, K_d = 1.5$	Inicio (mm)	Regimen transitorio					Regimen estable	
		$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$t_s$ (s)	$M_p$ %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
Prueba 1	71,4	63,23	82,2	86	82,2	1,32%	55,06	0,11%
Prueba 2	72,64	47,9	95	98,8	98,8	0,98%	55,06	0,11%
Prueba 3	76,41	58,5	124,6	130,7	138	2,23%	55,06	0,11%
Prueba 4	60,76	21,7	37,7	42,5	44,5	0,72%	55,06	0,11%
Prueba 5	68,39	30,2	68	74,35	68	0,27%	55,06	0,11%

Fuente: Propia.

Tabla 35 Resultados del controlador  $K_p = 3.5$  y  $K_d = 1.7$

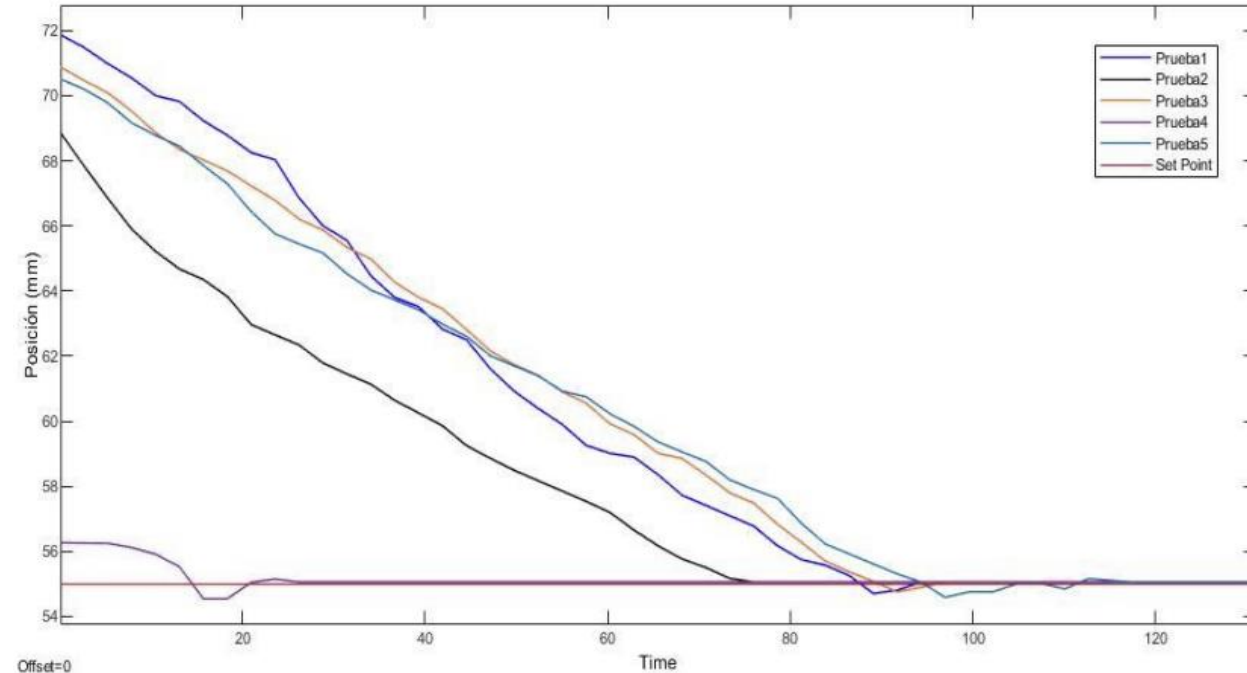
$K_p = 3.5, K_d = 1.7$	Inicio (mm)	Regimen transitorio					Regimen estable	
		$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$t_s$ (s)	$M_p$ %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
Prueba 1	71,88	39,18	87,46	89,9	87,46	0,67%	55,06	0,11%
Prueba 2	68,89	28	74	No aplica	74	No aplica	55,06	0,11%
Prueba 3	70,89	43,8	89,72	91,8	91,8	0,42%	55,06	0,11%
Prueba 4	56,27	12,6	14,3	16,05	21	0,80%	55,06	0,11%
Prueba 5	70,52	43,2	94,3	96,8	94,3	0,71%	55,06	0,11%

Fuente: Propia.

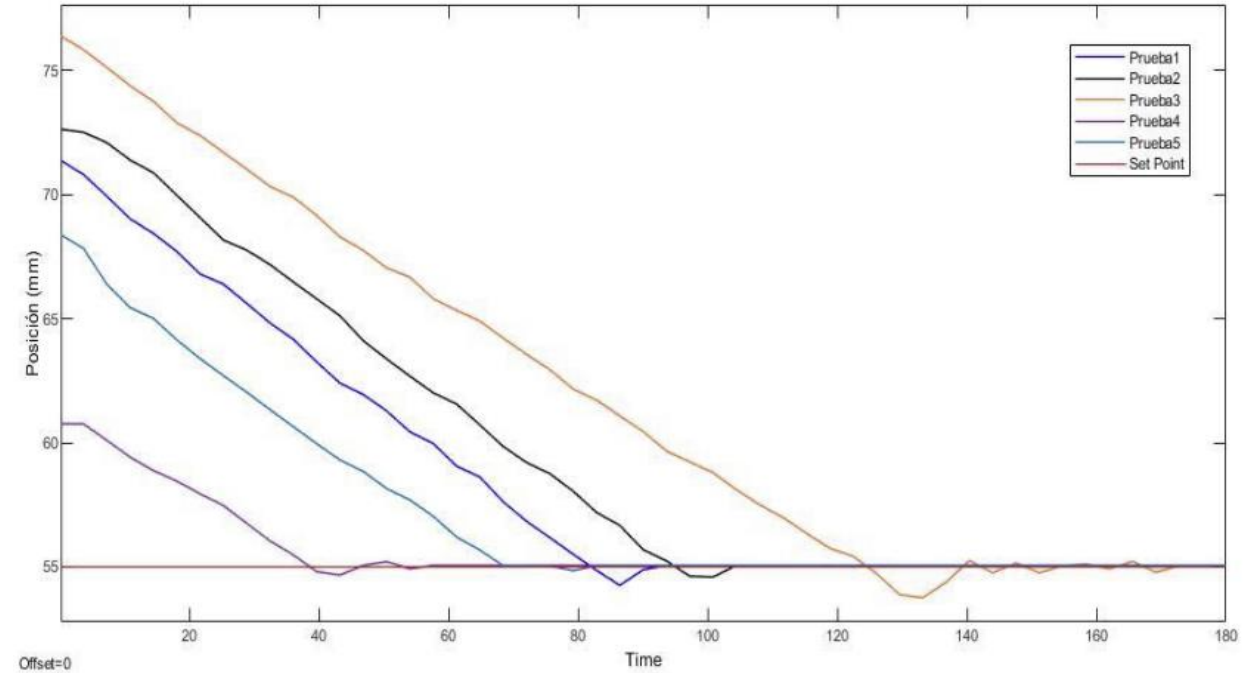


## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Gráfica 80 Respuesta de los controladores  $K_p = 3.5$  y  $K_d = 1.7$



Gráfica 116 Respuesta de los controladores  $K_p = 3.6$  y  $K_d = 1.5$

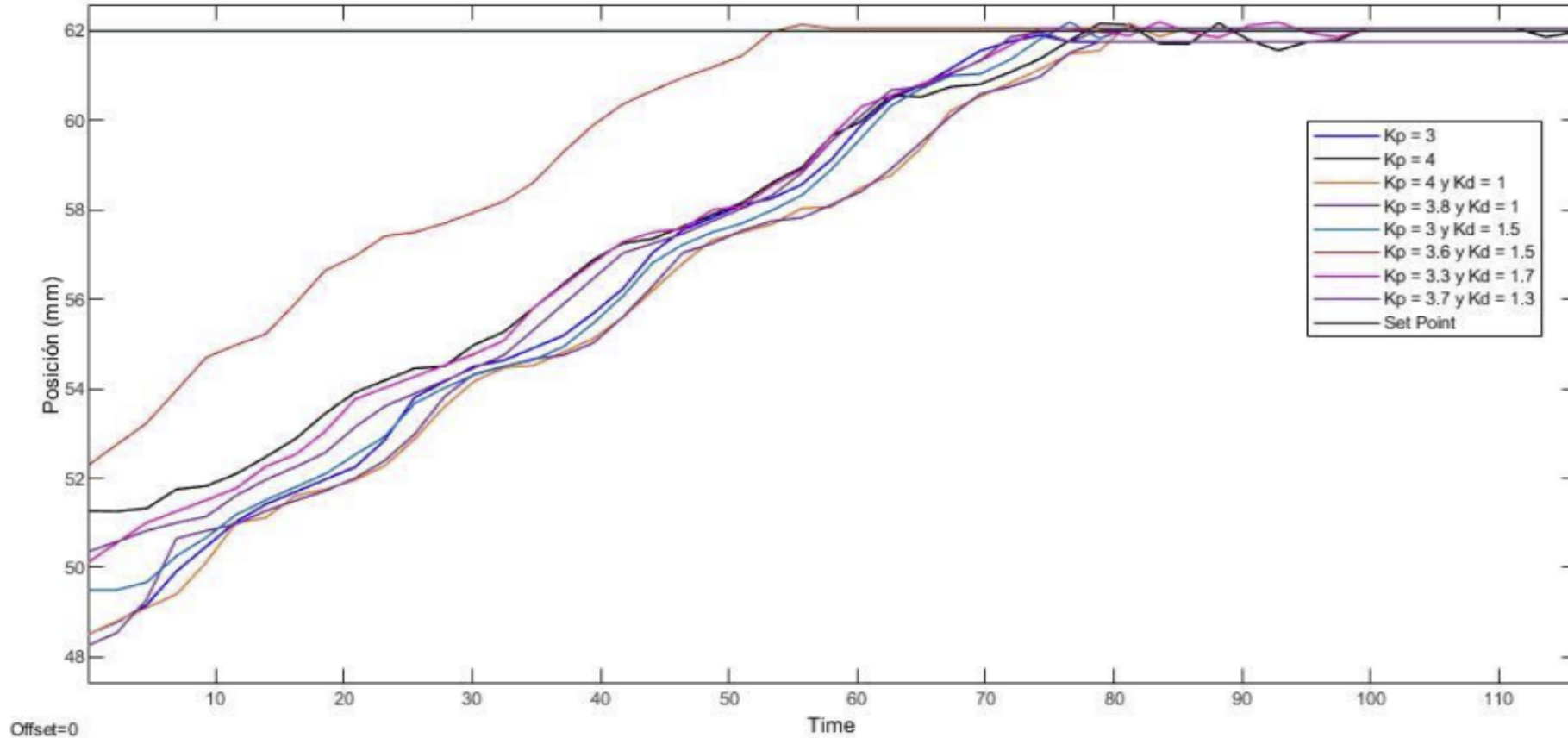


# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual

### Módulo Horizontal

Gráfica 125 Controladores sintonizados para el módulo horizontal



Offset=0

Fuente: Propia.

# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

## Sintonización del controlador método manual

### Módulo Horizontal



Tabla 44 Procedimiento para la selección de los mejores controladores para el módulo horizontal

Planta de control de posición en un levitador de ondas ultrasónicas	
Pruebas de controladores	Pruebas de estabilidad para los controladores seleccionados
Numero de muestras	5 muestras
Procedimiento	Set point: 62 mm Respuesta en regimen transitorio: $t_d$ , $t_r$ , $t_p$ , $t_s$ , $M_p$ Respuesta en regimen permanente: Punto de estabilización (mm) Error en estado estable (%)

Tabla 47 Resultados del controlador  $K_p = 3.3$  y  $K_d = 1.7$

$K_p = 3,3$ y $K_d = 1,7$	Regimen transitorio						Regimen estable	
	Inicio (mm)	$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$t_s$ (s)	$M_p$ %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
Prueba 1	51,02	33	65,7	67,9	69,8	0,42%	62,06	0,10%
Prueba 2	53,25	24	55,6	57,8	68,5	0,69%	62,06	0,10%
Prueba 3	52,02	28	76	No aplica	76	No aplica	62,06	0,10%
Prueba 4	53,35	26,3	55,1	No aplica	55,1	No aplica	62,06	0,10%
Prueba 5	51,35	32,3	70,6	91,73	83,2	0,42%	62,06	0,10%

Fuente: Propia

Tabla 46 Resultados del controlador  $K_p = 3.6$  y  $K_d = 1.5$

$K_p = 3,6$ y $K_d = 1,5$	Regimen transitorio						Regimen estable	
	Inicio (mm)	$t_d$ (s)	$t_r$ (s)	$t_p$ (s)	$t_s$ (s)	$M_p$ %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
Prueba 1	48,1	44,94	92,8	110,1	92,8	0,37%	62,06	0,10%
Prueba 2	51,55	25,1	59,4	No aplica	59,4	No aplica	62,06	0,10%
Prueba 3	47,75	32,23	83,8	82,3	83,9	0,42%	62,06	0,10%
Prueba 4	54,02	34,6	57,9	No aplica	57,9	No aplica	62,06	0,10%
Prueba 5	51,27	32,7	67,25	69,25	72,53	3,35%	62,06	0,10%

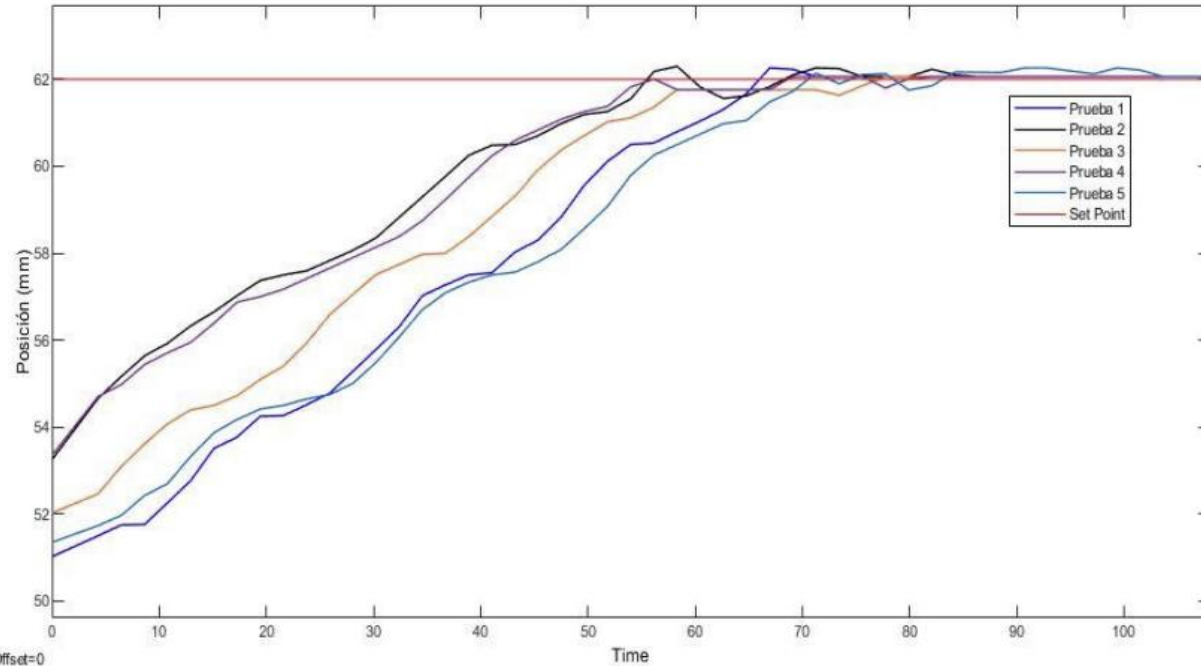
Fuente: Propia





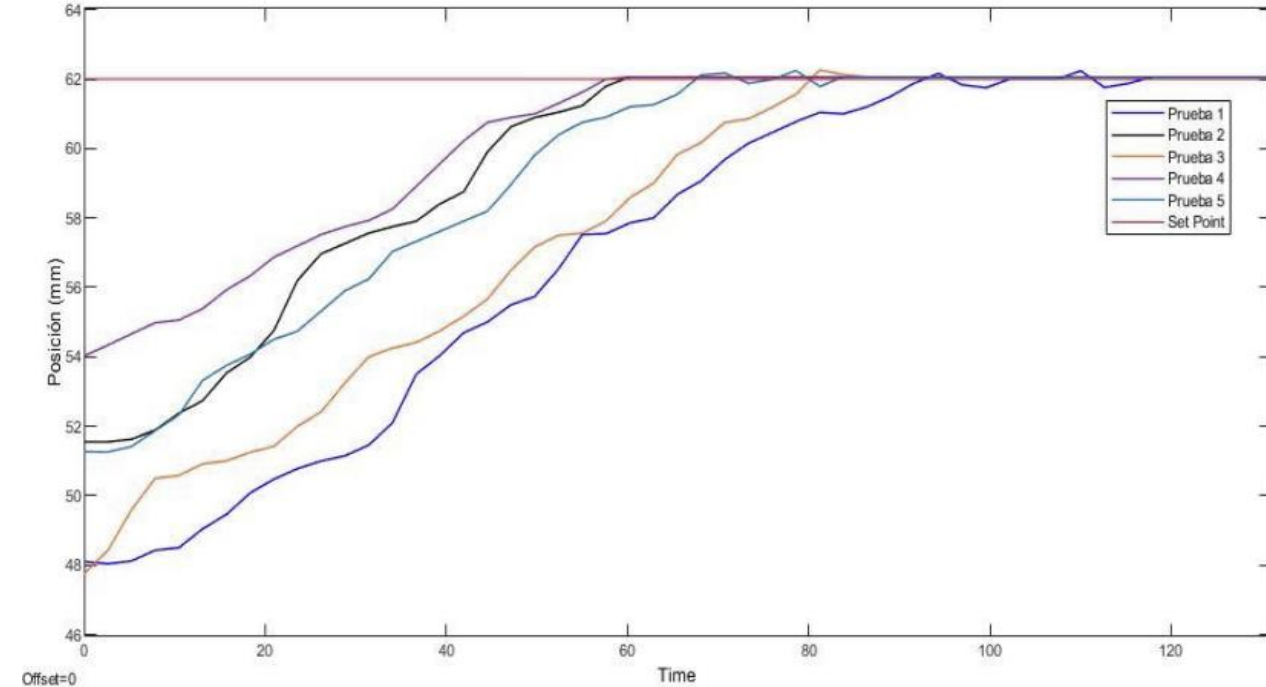
## Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

Gráfica 143 Resultados del controlador  $K_p = 3.3$  y  $K_d = 1.7$



Fuente: Propia

Gráfica 137 Respuesta del controlador  $K_p = 3.6$  y  $K_d = 1.5$



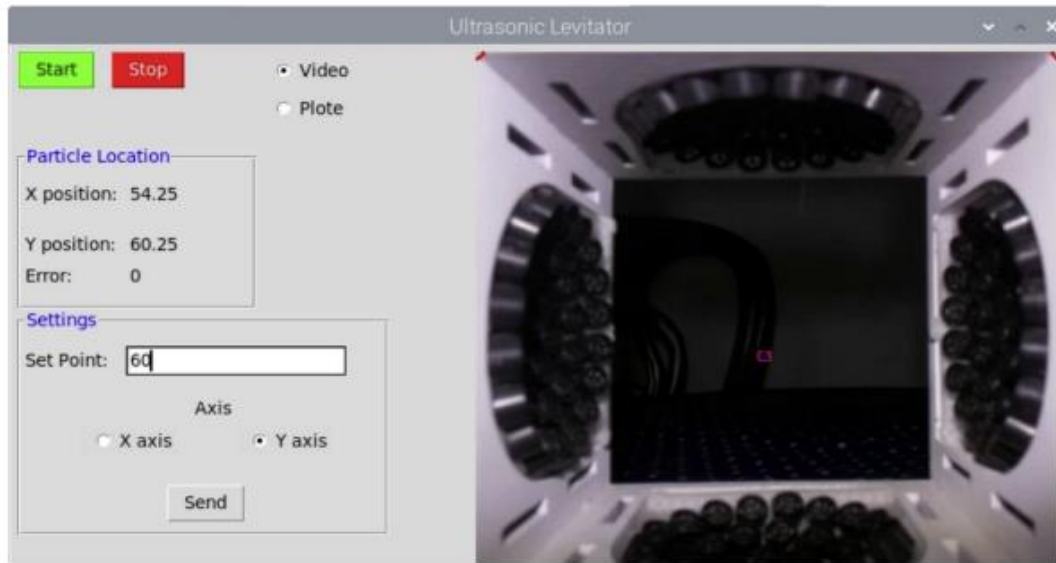
Fuente: Propia



# Objetivo 4. Control de posición de la partícula en el levitador

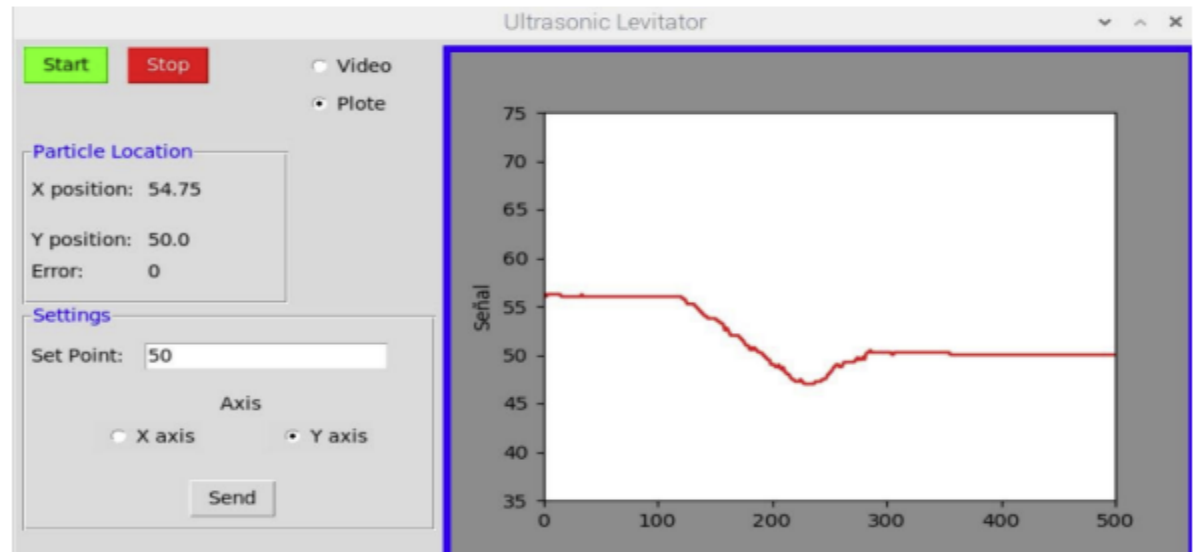
## Pantalla HMI

Figura 155 Partícula capturada por el sensor y mostrada por la cámara en tiempo real



Fuente: Propia.

Figura 156 Respuesta del sistema en la pantalla MHI graficada en tiempo real



Fuente: Propia.

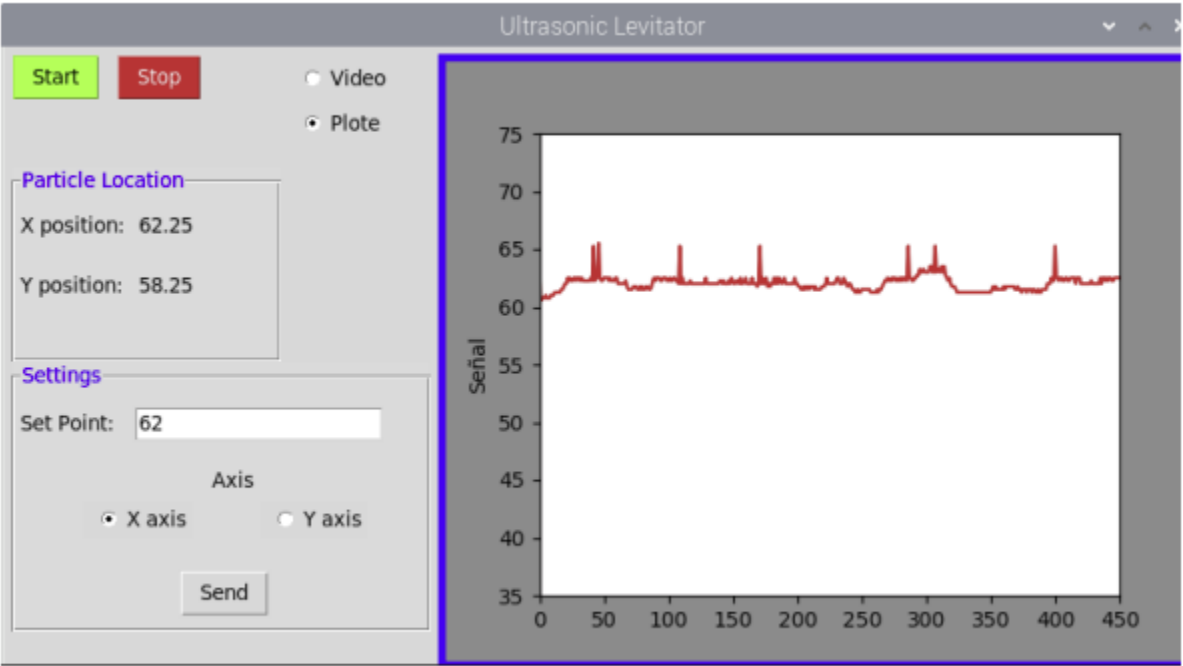
# Objetivo 5. Validación del funcionamiento del sistema de control y robustez del controlador

## Análisis de robustez del controlador horizontal



$K_p = 4.1$  y  $K_d = 0.4$

Figura 169 Mejor controlador del módulo horizontal sometido a ruido y perturbaciones



Fuente: Propia.

Tabla 51 Comparación de los controladores del módulo horizontal

Sintonia	Inicio (mm)	Regimen transitorio					Regimen estable	
		td (s)	tr (s)	tp (s)	ts (s)	Mp %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado estable
$K_p = 3,6$ y $K_d = 1,5$	48	8,62	15,08	16,6	17,3	0,40%	62,942	0,092%
$K_p = 3,3$ y $K_d = 1,7$	48	9,1	16,43	26,25	oscilante	0,80%	62,93	0,110%
$K_p = 3,8$ y $K_d = 1$	48	8,5	14,1	26,11	14,1	0,40%	62,89	0,170%
$K_p = 4,1$ y $K_d = 0,4$	48	6,93	11,46	12,35	13,6	2,70%	62,944	0,088%

Fuente: Propia.

# Objetivo 5. Validación del funcionamiento del sistema de control y robustez del controlador



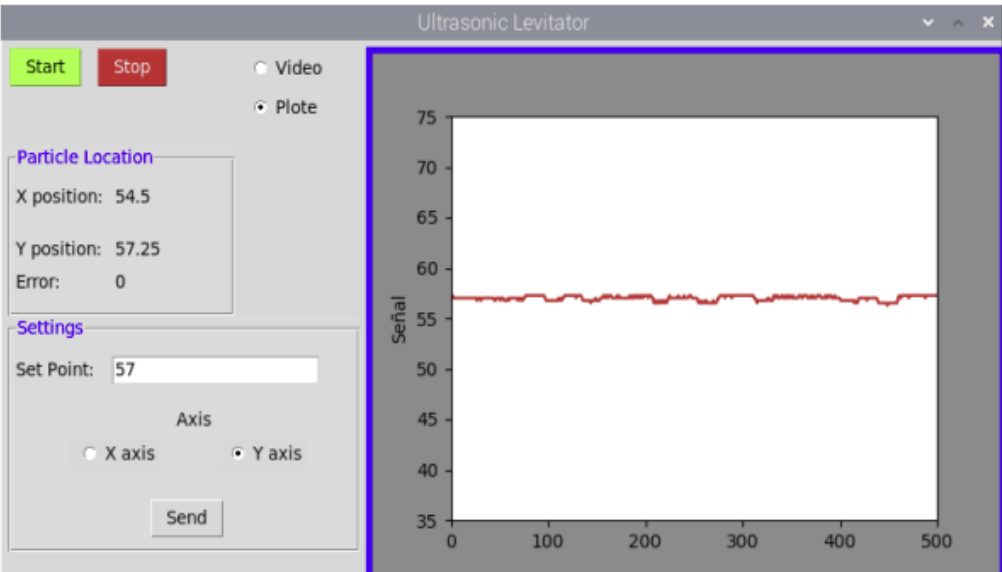
## Análisis de robustez del controlador vertical

Tabla 52 Comparación de los controladores del módulo vertical

Sintonia	Inicio (mm)	Regimen transitorio					Regimen estable	
		td (s)	tr (s)	tp (s)	ts (s)	Mp %	Punto de estabilización (mm)	% error en estado
Kp = 3,6 y Kd = 1,5	66	9,2	13,17	14,15	16,9	1,10%	49,02	0,041%
Kp = 3,5 y Kd = 1,7	66	8,4	15,6	18,25	15,6	0,90%	49	0,000%

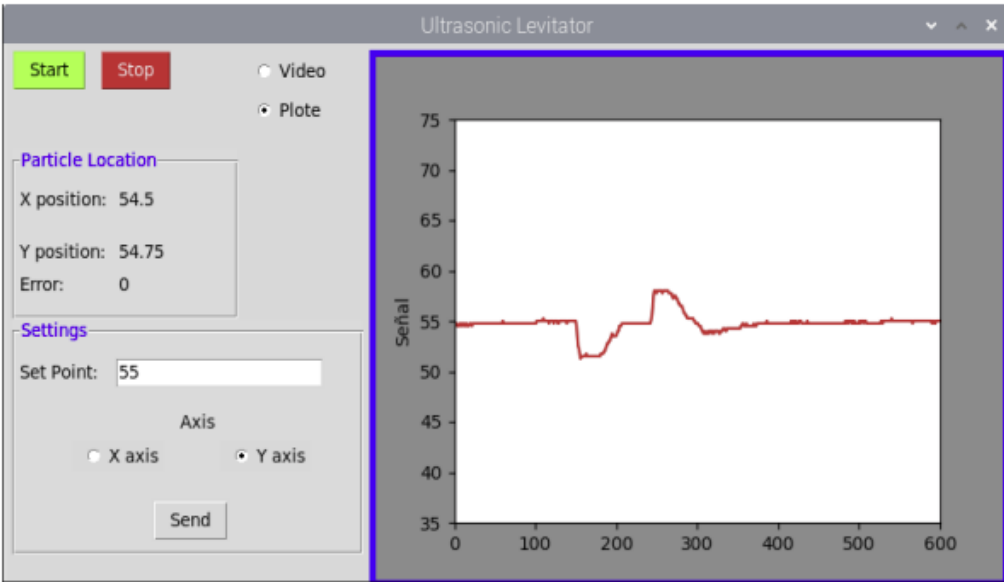
Fuente: Propia.

Figura 175 Respuesta del controlador del módulo vertical ante ruido



Fuente: Propia.

Figura 176 Respuesta del controlador del módulo vertical ante perturbación



Fuente: Propia



# Conclusiones



- Como puede apreciarse en la figura 119, es evidente la complejidad descrita en el diagrama de flujo de esta figura en la que puede observarse que se requiere la comunicación entre 5 tarjetas microcontroladoras para el funcionamiento de los dos módulos de la planta de levitación ultrasónica (X, Y), más sin embargo, no solo existen la comunicación serial, la comunicación I2C, entre otros protocolos, sino que simplemente con enviar pulsos de la salida de un controlador a la entrada de otro controlador, también puede realizarse comunicación no solo de forma asertiva sino que además, representa un altísimo ahorro de tiempo en donde leer un puerto físico le representa a un Arduino con un cristal de 16 MHz la inversión de tiempo de 62.5  $\mu$ s. Gracias a este método de comunicación no convencional, se logró generar una señal PWM de 40 KHz y modificar el ciclo útil de esta señal en un Arduino como se puede observar en la figura 112. Esto no hubiera sido posible implementando un protocolo de comunicación estandarizado.
- Además de la necesidad de generar una señal PWM de 40 KHz para el funcionamiento de la partícula, es necesario variar el ciclo útil del PWM generado para lograr desplazar la partícula dentro del levitador, conforme se vaya variando el PWM, esta tarea es imposible realizarla implementando la instrucción analogWrite de Arduino para modificar el PWM, ya que se requerirían de muchas líneas de código de esta instrucción para variar al PWM necesario y múltiples condicionales para seleccionar cada uno. En la gráfica 5, se observa una señal generada por medio de una matriz, esta matriz es la encargada de variar el ciclo útil de la señal PWM sin perder su frecuencia. Con esto se puede concluir que existen métodos de generación de señales PWM y variar su ciclo útil mucho más eficientes y de mayor frecuencia que las ofrecidas por el foro oficial de Arduino.
- En la grafica 22 se puede apreciar la salida del sistema en lazo abierto al ser sometido a una entrada de tipo rampa, en donde su salida de respuesta demuestra que se trata de un sistema no lineal que no puede ser descrito por una función de transferencia, aun con esta característica se sintoniza un controlador PID clásico lineal y como se observa en la grafica 80, la grafica 116, la grafica 137 y la grafica 143, se logra converger el sistema en el valor del set point ingresado con buenas respuestas en régimen transitorio y permanente, lo que permite concluir que el controlador PID aunque es lineal, puede controlar sistemas que no sean fuertemente no lineales. Esto es debido a que el objetivo principal del controlador clásico PID es mantener el sistema en una posición de referencia indicada y ser capaz de aceptar nuevos valores de referencia. Ya si la referencia es una trayectoria, el controlador PID por si solo seria incapaz de seguir la trayectoria.



# Recomendaciones



- No fue posible obtener la función de transferencia de la planta de levitación ultrasónica, pero si fue sencillo encontrar la ecuación que define la posición de la partícula respecto a la entrada del sistema, por lo que se recomienda en estudios futuros, realizar métodos de control avanzado para el control de la posición de la partícula en los levitadores ultrasónicos.
- Actualmente se han realizado nuevas investigaciones sobre la levitación de objetos con la acústica, en donde se ha logrado levitar objetos de diámetros grandes que se consideraban imposibles de suspender con las ondas de sonido. Se sugiere indagar sobre estas investigaciones (son citadas en el libro de la tesis) para realizar la construcción de un prototipo que permita la levitación de objetos de tamaño mayor a la longitud de onda de sonido generada y realizar el control de posición de objetos siguiendo la metodología de esta investigación.
- Si se desea aumentar la resolución del sensor, se sugiere usar una pantalla con mayor resolución en pixeles a la utilizada en esta investigación.







**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*

**Formando líderes** para la **construcción**  
de un nuevo **país en paz**