

*¡Soy Autónomo,  
soy calidad!*



Institución vigilada por MinEducación

# **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA LOS MOVIMIENTOS DEL EXTRUSOR Y LA PLATAFORMA DEL SISTEMA DE IMPRESIÓN UAO 3DP**

**Manuela Fernanda Cerón Viveros**

Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniera Mecatrónica

Dirigido por: Álvaro José Rojas. PhD.

# MARCO TEORICO

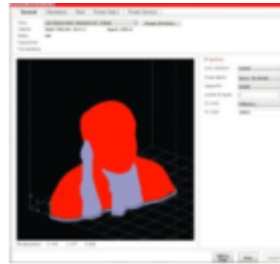
## › IMPRESI3N 3D



**3D CAD  
Model**



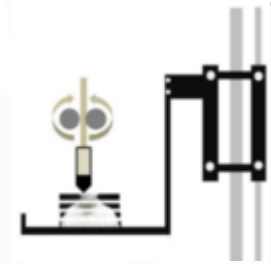
**Archivo  
Imprimible**



**Slicing  
Software**



**Layer Slices  
and Tool Path**



**AM  
Process**



**Physical 3D  
Object**

## › TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

**Fotopolimerización**



**Extrusión de  
material**



**Fusión de cama de  
polvo**



**Inyección de material**



**Inyección de  
aglutinante**



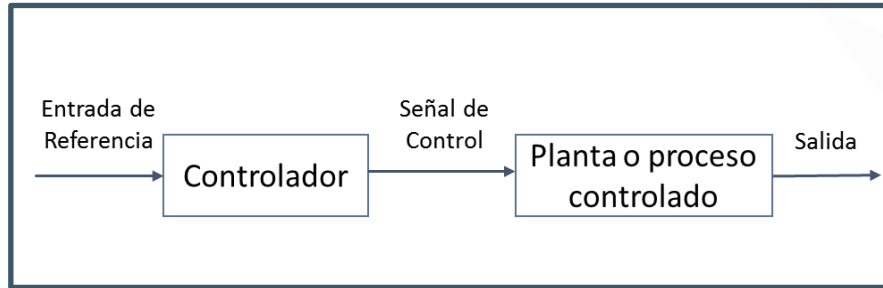
**Deposición de  
energía directa**



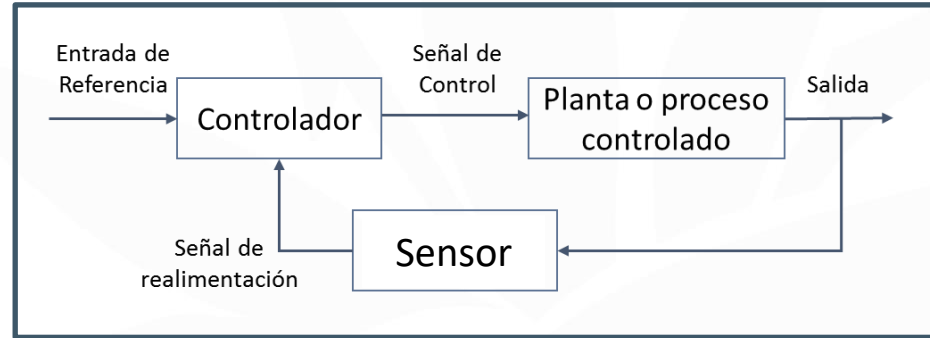
**Laminado**



## › SISTEMA DE CONTROL



**Lazo de Control  
Abierto**



**Lazo de Control  
Cerrado**

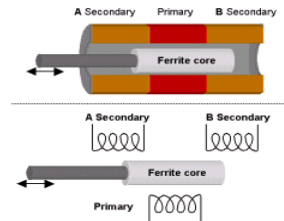
## › SENSORES DE POSICIÓN

### Resistivos

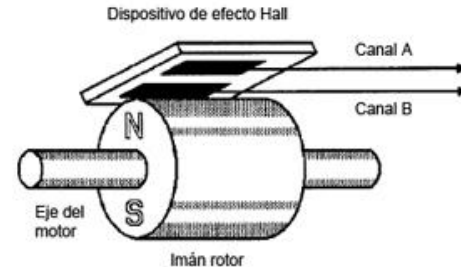
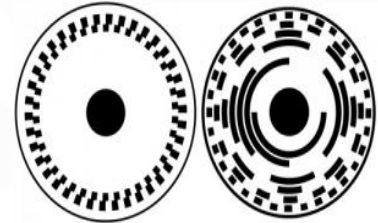
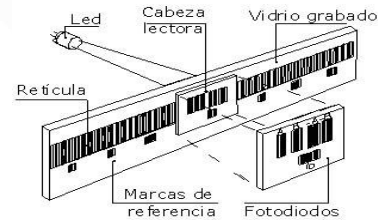


### Inductivos

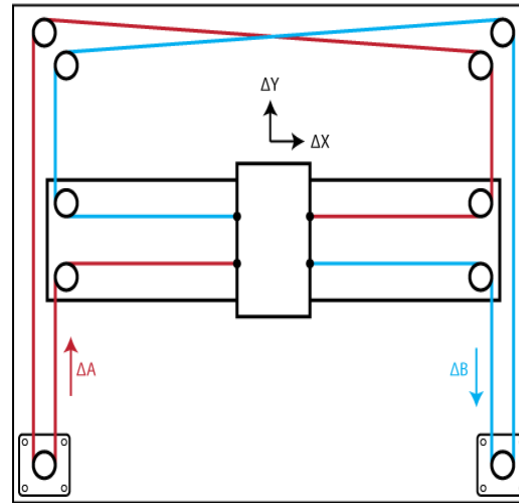
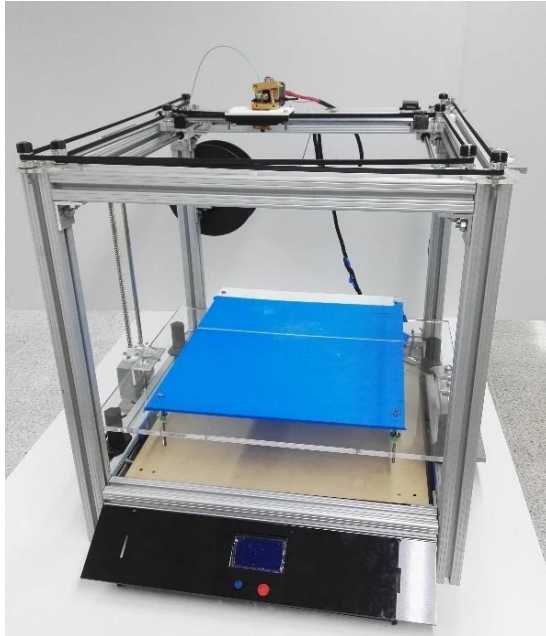
- › Resolver
- › LVDT
- › RVDT



### Encoders

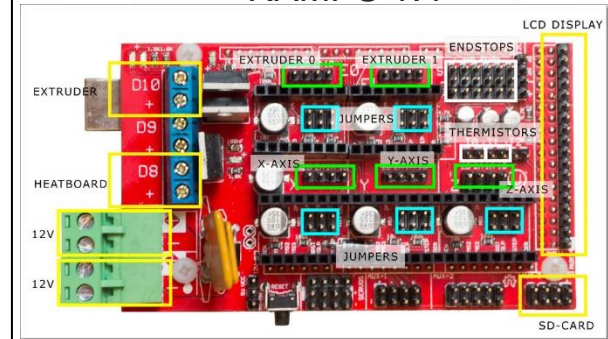


## › IMPRESORA UAO 3DP



CORE XY

RAMPS 1.4

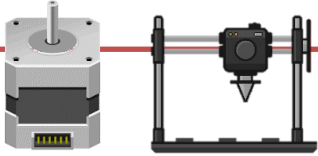


Repetier



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Motores de paso en  
lazo abierto



Susceptibles a  
fallas



Desviaciones de  
las trayectorias  
deseadas

Piezas defectuosas,  
pérdida de dinero,  
tiempo y material



## OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control de lazo cerrado para los movimientos del extrusor y plataforma de la impresora UAO 3DP, que permita asegurar el correcto posicionamiento de dichos elementos ante posibles perturbaciones.

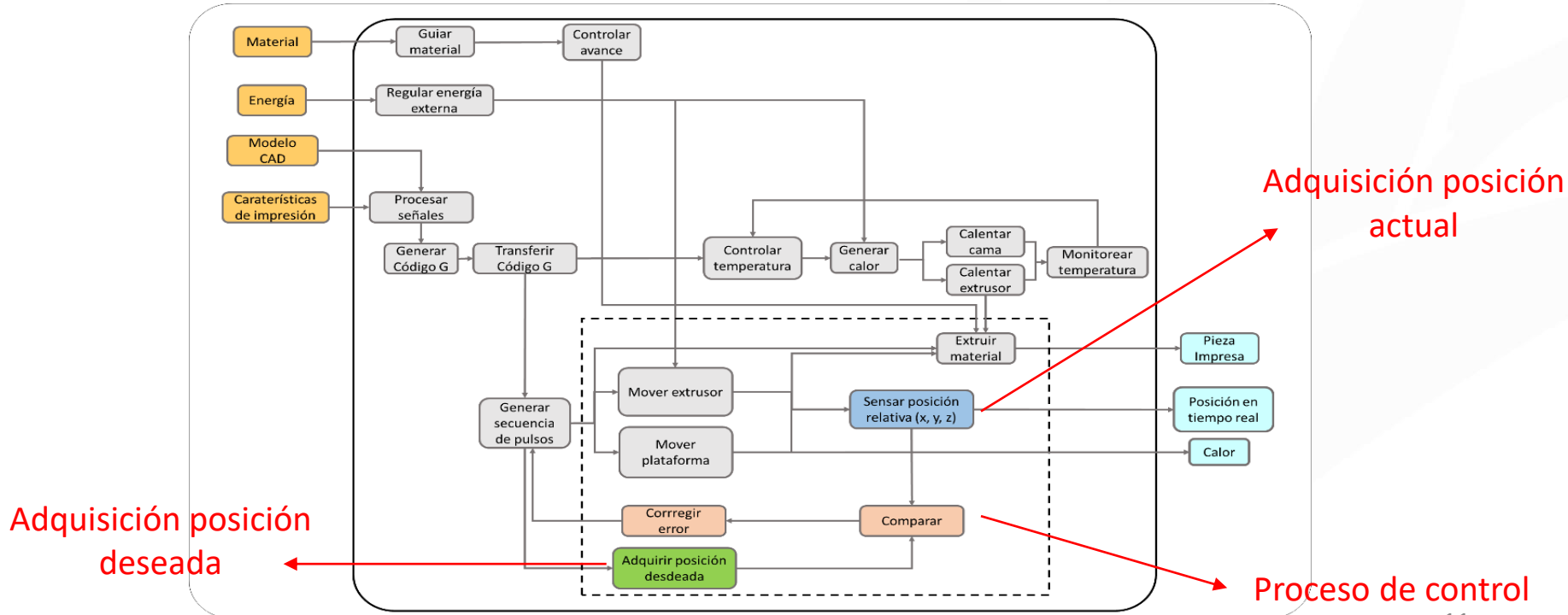
## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Instrumentar la impresora UAO 3DP para posibilitar la realimentación de la posición relativa del cabezal y plataforma de construcción durante el proceso de impresión.
- Desarrollar un software para el proceso de supervisión de movimiento y detección de fallos.
- Integrar el sistema de supervisión de movimiento con el control del proceso de impresión.
- Documentar el proceso de diseño del sistema de lazo cerrado para impresoras 3D y valorar su aplicabilidad en otras técnicas de impresión.



# DESARROLLO

## › DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL



# DESARROLLO

## › SELECCIÓN DEL SENSOR DE POSICIÓN

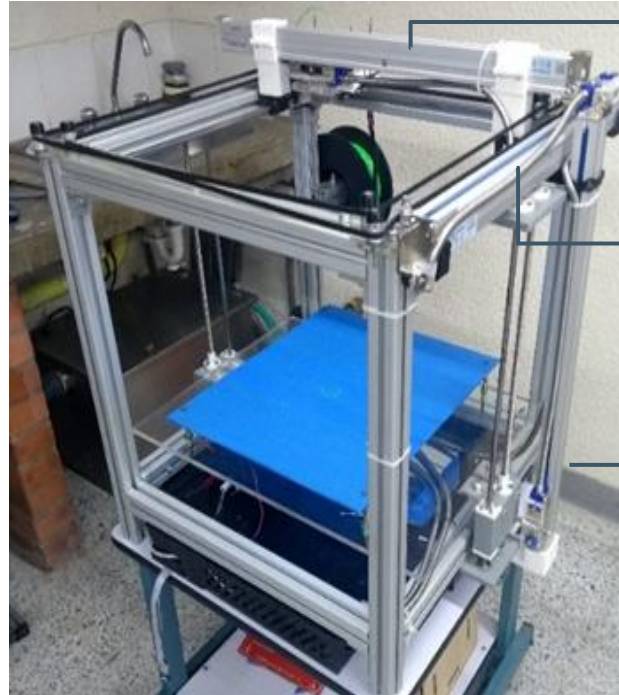


Resolución	0.005mm (5um/ 5micron)
Precisión	$\pm 7.5 \mu\text{m}$
Señal de Salida	5V, TTL, conector DB9
Tipo de onda de salida	2 señales de cuadratura
Velocidad	1.2m/s
Temperatura de operación	0 – 40°C
Voltaje de trabajo	5V $\pm$ 20%
Longitud de medida disponible	500mm
Máximo rango de medida	530mm
Longitud total de la escala	654mm
Cable de señal	3.5m

Encoder incremental Lineal Óptico WTB 500

# DESARROLLO

## › UBICACIÓN DE LOS SENSORES



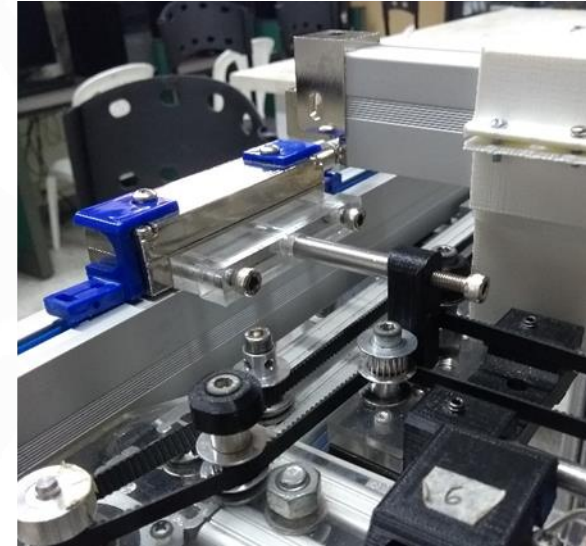
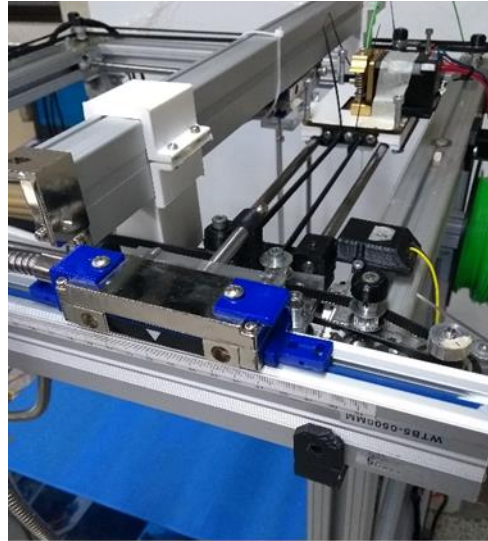
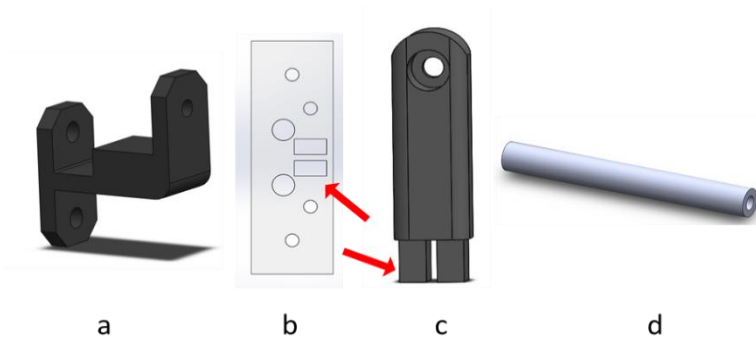
Eje Y

Eje X

Eje Z

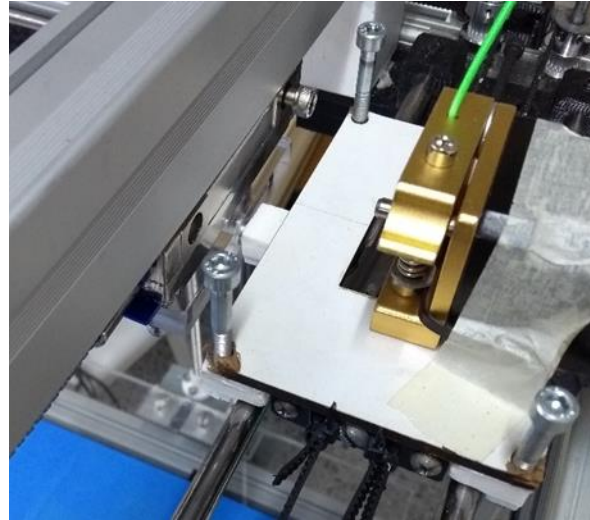
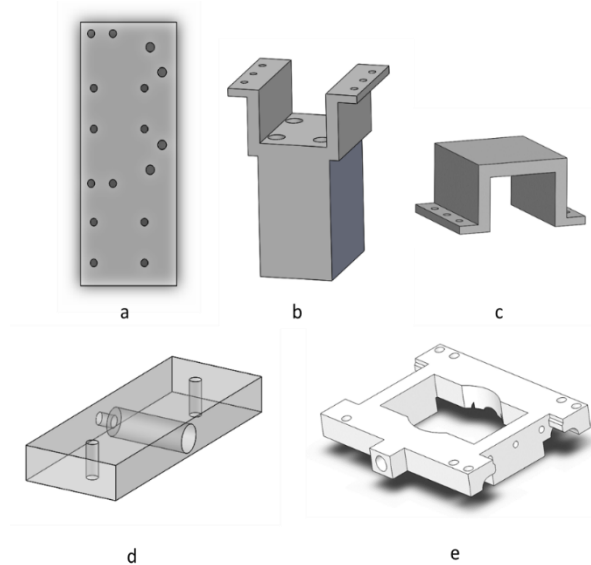
# DESARROLLO

## › Ubicacación Eje X



# DESARROLLO

## › Ubicación Eje Y





# DESARROLLO

## › Ubicación Eje Z





# DESARROLLO

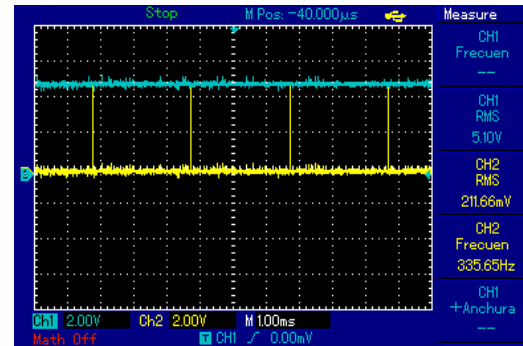
## › ADQUISICIÓN POSICIÓN ACTUAL

	Movimiento positivo				Movimiento negativo		
	A	B	Dec		A	B	Dec
t1	0	1	1	t1	1	0	2
t2	0	0	0	t2	0	0	0
t3	1	0	2	t3	0	1	1
t4	1	1	3	t4	1	1	3

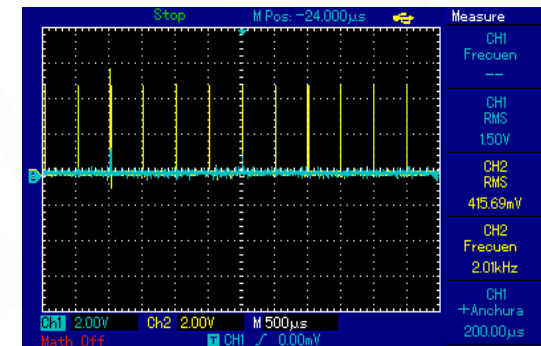
		Valor Actual			
Valor Anterior		0	1	2	3
	0	0	-1	+1	X
	1	+1	0	X	-1
	2	-1	X	0	+1
	3	X	+1	-1	0

Codificación X4 para Encoder incremental de cuadratura

## › ADQUISICIÓN POSICIÓN DESEADA



Señales **STEP** y **DIR**  
desplazamiento positivo



Señales **STEP** y **DIR**  
desplazamiento negativo

Velocidad (mm/min)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia calculada (Hz)	Frecuencia medida (Hz)
250	4.17	333.33	335.65
1500	25	2000	2010
3000	50	4000	4030

# DESARROLLO

Configuración motores NEMA 17

$$\text{RAMPS (x,y)} = 200 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}}$$

$$1\text{pulso} = 1.8^\circ$$

Resolución RAMPS  $\frac{1}{16}$

$$\text{RAMPS (x,y)} = 3200 \frac{\mu\text{pulsos}}{\text{rev}}$$

$$1\mu\text{pulso} = 0.1125^\circ$$

Elementos mecánicos UAO 3DP

$$\text{FR(x,y)} = 80 \frac{\mu\text{pulsos}}{\text{mm}}$$

$$\text{FR(z)} = 252 \frac{\mu\text{pulsos}}{\text{mm}}$$

$$80 \mu\text{pulsos} \longrightarrow 1\text{mm}$$

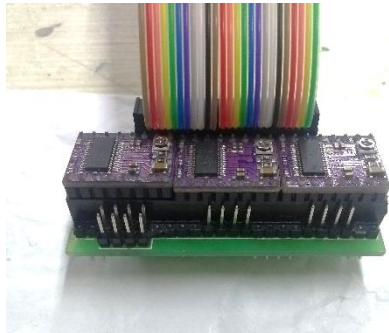
$$3200 \mu\text{pulsos} \longrightarrow 40\text{mm}$$

$$\text{Encoder (x,y)} = 8000 \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}}$$

Movimiento lineal

# DESARROLLO

## › Circuito de adquisición posición deseada



## › Ecuaciones del Sistema UAO 3DP

$$D1 = (\Delta X - \Delta Y) * Fr \quad (1)$$

$$D2 = (-\Delta X - \Delta Y) * Fr \quad (2)$$

$$D3 = \Delta Z * Fr \quad (3)$$

$$PosX = \frac{D1 - D2}{2Fr} \quad (4)$$

$$PosY = \frac{-D1 - D2}{2Fr} \quad (5)$$

$$PosZ = \frac{D3}{Frz} \quad (6)$$

D1= Pulsos driver 1

D2 Pulsos driver 2

D3= Pulsos driver 3

Fr= Factor de resolución x y y

Frz= Factor de resolución z

# DESARROLLO

Posición Manual		Adquisición de pulsos				Pulsos deseados Fr = 80 pasos/mm		Posición calculada Fr= 80 steps/mm		Pulsos deseados Fr = 80.5 pulsos/mm		Posición calculada Fr= 80.5 steps/mm	
X	Y	Contador de pulsos		Pulsos por movimiento				X	Y			X	Y
		D1	D2	D1	D2	D1= Fr(x-y)	D2= Fr(-x-y)			D1= Fr(x-y)	D2= Fr(-x-y)		
0	0	805	-805	805	-805	800	-800	0	0	805	-805	0	0
10	0	805	-805	805	-805	800	-800	10,083	0	805	-805	10	0
4	8	-181	-805	-986	0	-980	0	4,025	6,04	-986	0	4	8
4	10	-483	-1127	-322	-322	-320	-320	4,025	10,06	-322	-322	4	10
8	14	-483	-1771	0	-644	0	-640	8,05	14,09	0	-644	8	14
14	8	483	-1771	986	0	980	0	14,088	8,05	986	0	14	8
14	6	644	-1610	161	161	160	160	14,088	6,04	161	161	14	6
10	0	805	-805	161	805	160	800	10,083	0	161	805	10	0
0	0	0	0	-805	805	-800	800	0	0	-805	805	0	0



Velocidad (mm/min)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia calculada (Hz)	Frecuencia medida (Hz)
250	4.17	333.33	335.65
1500	25	2000	2010
3000	50	4000	4030

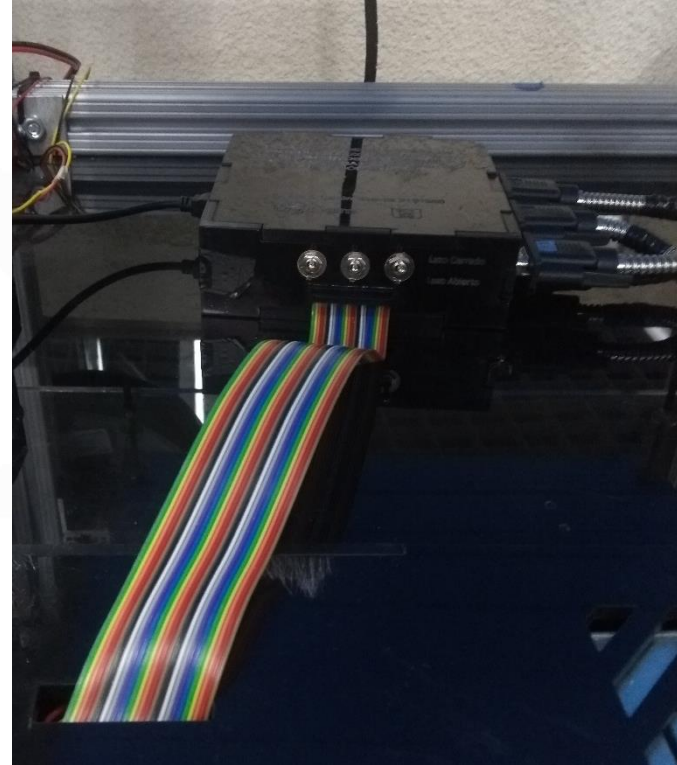
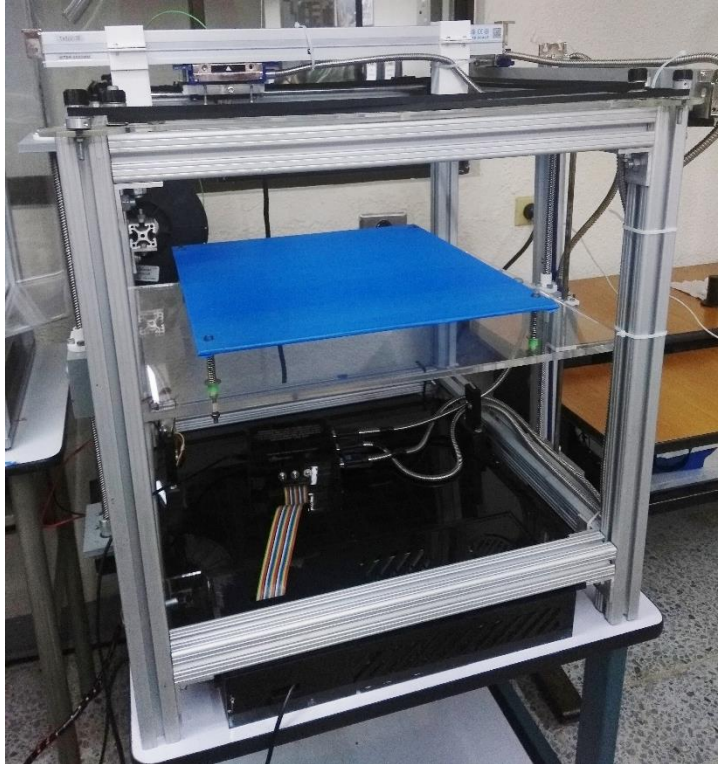
Velocidad (mm/min)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia medida (Hz)	Resolución calculada (steps/mm)
250	4.17	335.65	80.556
1500	25	2010	80.4
3000	50	4030	80.6

# DESARROLLO

## › ESTRATEGIA DE CONTROL



# DESARROLLO





# DESARROLLO

1 pulso= 0,0125mm

RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 765	PEPY: -767	PEPZ: 2268	errorD1: 40	ErrorD2: -38	ErrorD3: 252



Posición deseada en forma de pulsos	Posición actual en forma de pulsos	0,5mm Error
--	---------------------------------------	----------------

## Lazo Abierto

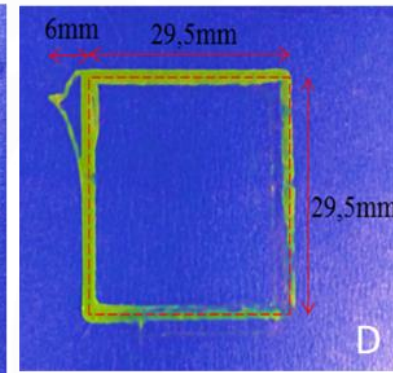
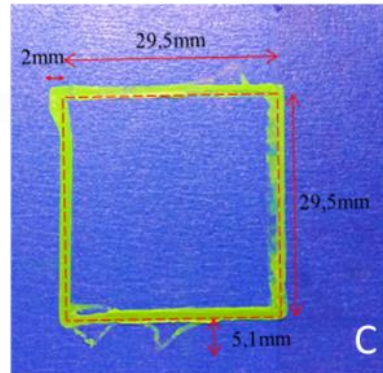
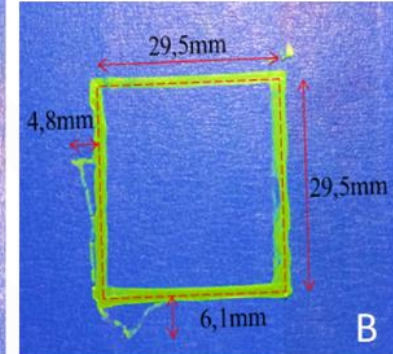
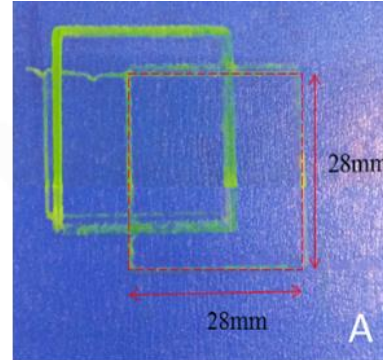
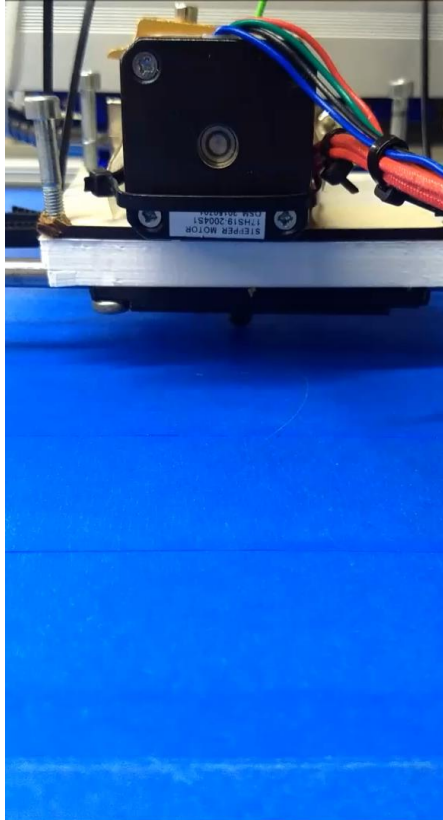
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5
RD1: 805.00	RD2: -805.00	RD3: 2520.00	PEPX: 809	PEPY: -809	PEPZ: 2515	errorD1: -4	ErrorD2: 4	ErrorD3: 5



## Lazo Cerrado

Posición deseada en forma de pulsos	Posición actual en forma de pulsos	0,05mm Error
--	---------------------------------------	-----------------

# PRUEBAS DE VALIDACIÓN

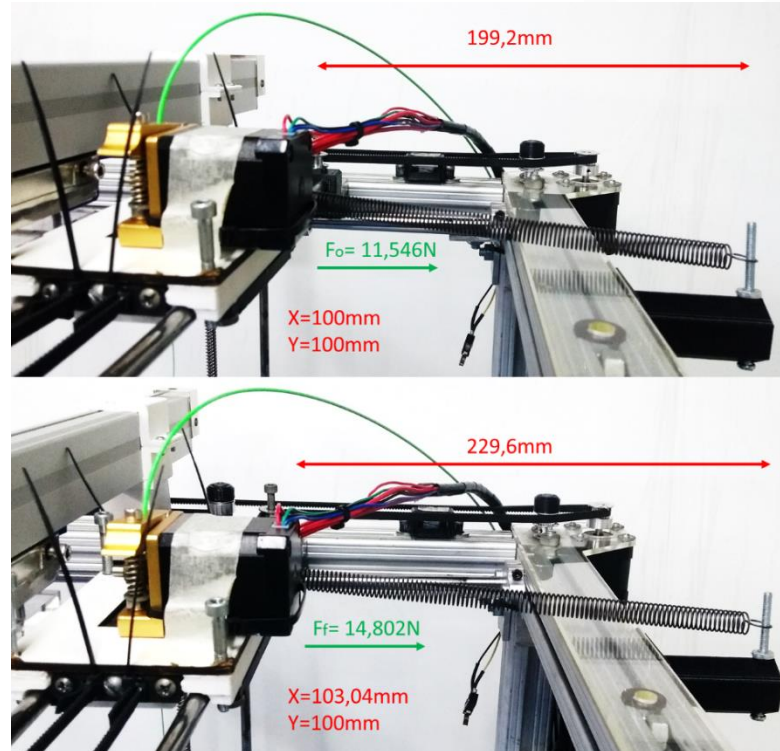


0,0625mm

0,125mm

# PRUEBAS DE VALIDACIÓN

## › PRUEBA CUANTITATIVA

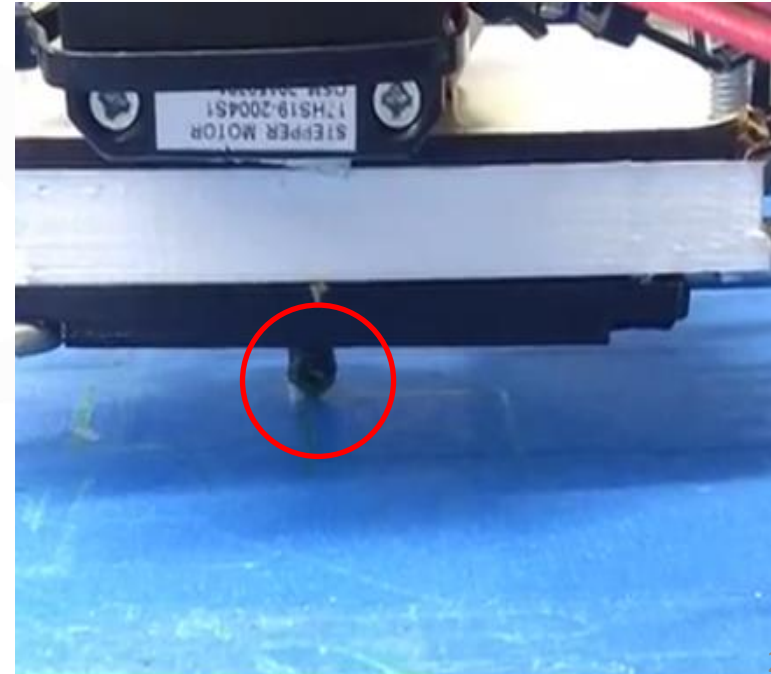


# PRUEBAS DE VALIDACIÓN

**Ubicación de la plataforma en Lazo  
Abierto**



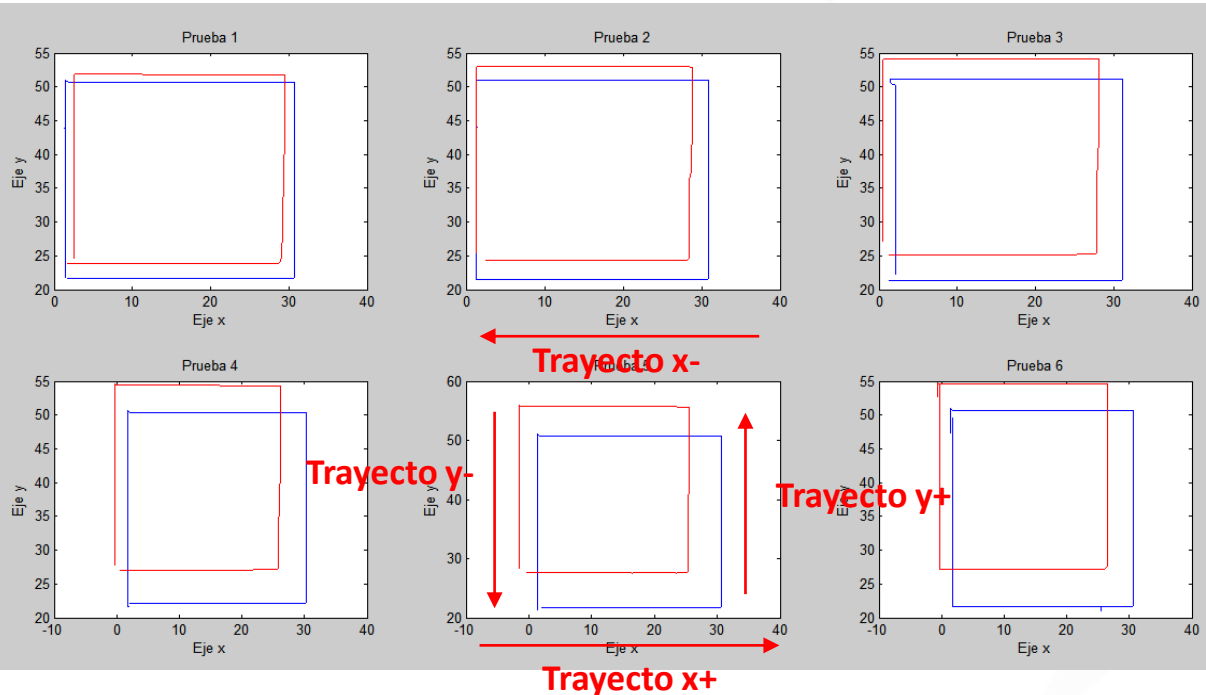
**Ubicación de la plataforma en Lazo  
Cerrado**





# RESULTADOS

## Validación por capa Lazo abierto

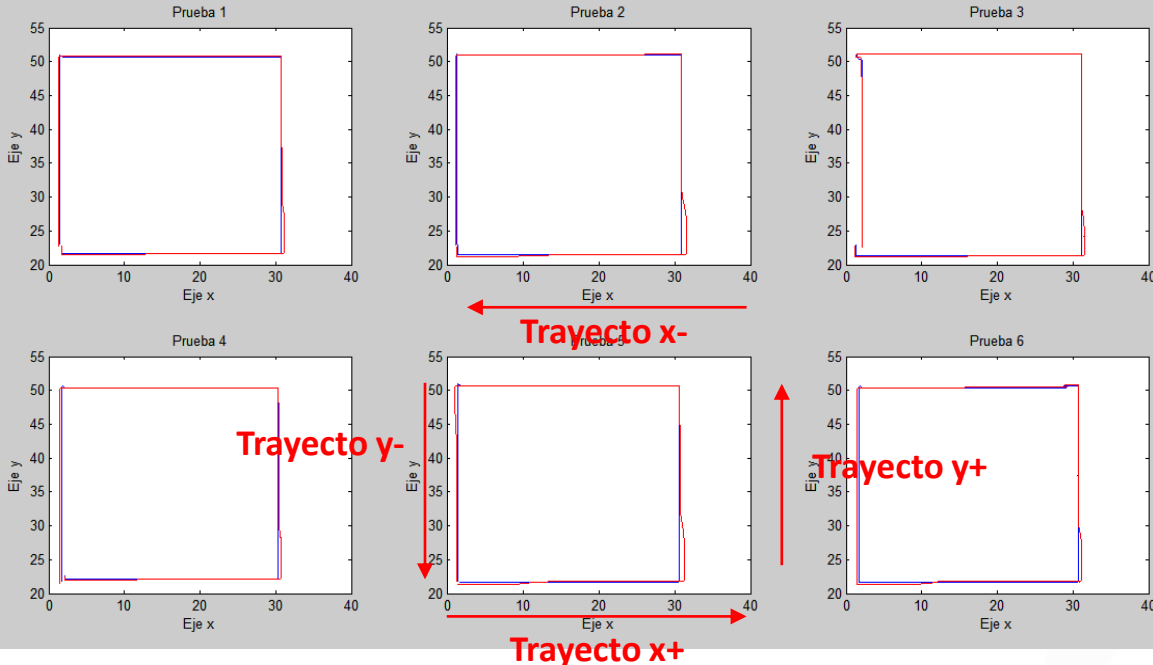


	Trayecto x+		Trayecto y+		Trayecto x-		Trayecto y-	
Prueba 1	21,65	23,88	30,74	28,39	50,74	51,85	1,47	2,5
Diferencia	2,23		-2,35		1,11		1,03	
Prueba 2	21,47	24,4	30,92	28,48	50,92	53,03	1,29	1,33
Diferencia	2,93		-2,44		2,11		0,04	
Prueba 3	21,3	25,22	31,09	27,8	51,09	54,21	2,08	0,52
Diferencia	3,92		-3,29		3,12		-1,56	
Prueba 4	22,08	27,13	30,31	25,91	50,31	54,38	1,73	-0,29
Diferencia	5,05		-4,4		4,07		-2,02	
Prueba 5	21,73	27,58	30,66	25,34	50,66	55,73	1,38	-1,6
Diferencia	5,85		-5,32		4,47		2,98	
Prueba 6	21,73	27,17	30,6	26,49	50,6	54,67	1,73	-0,29
Diferencia	5,44		-4,11		4,07		-2,02	
Promedio	3,26		3,65		3,15		1,6	

Desviaciones máximas

# PRUEBAS DE VALIDACIÓN

## Validación por capa Lazo cerrado



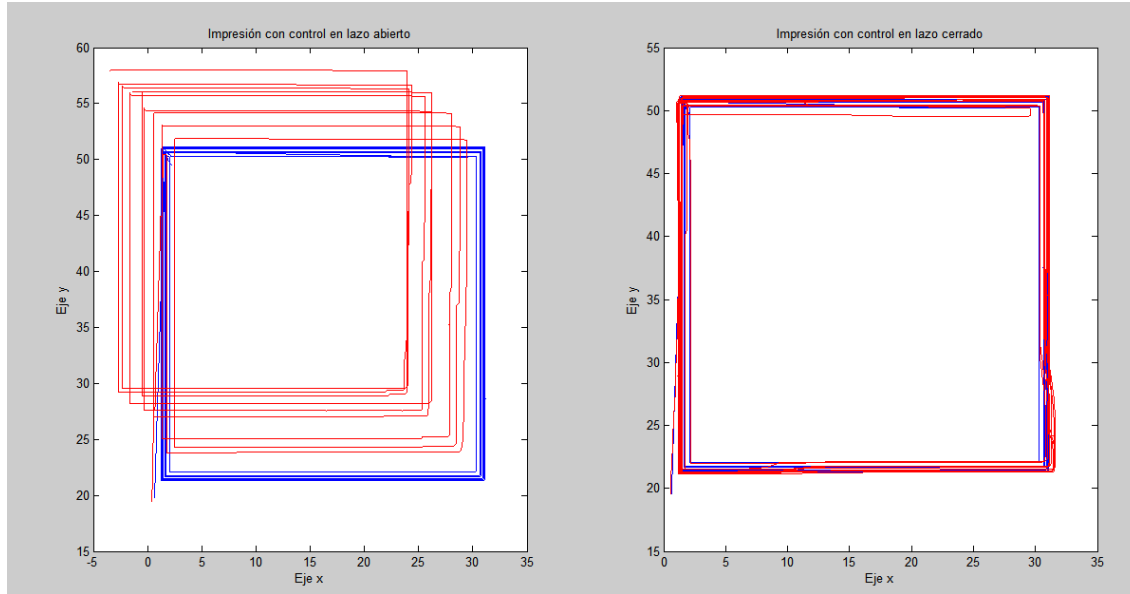
	Trayecto x+		Trayecto y+		Trayecto x-		Trayecto y-	
Prueba 1	21,65	21,55	30,74	31,15	50,74	50,9	1,47	1,27
Diferencia	0,1		0,41		0,16		-0,2	
Prueba 2	21,47	21,23	30,92	31,56	50,92	51,08	1,29	1,16
Diferencia	-0,24		0,64		0,1		-0,13	
Prueba 3	21,3	21,13	31,09	31,48	51,09	51,19	2,08	2,16
Diferencia	-0,17		0,39		0,1		-0,08	
Prueba 4	22,08	21,97	30,31	30,79	50,31	50,39	1,73	1,41
Diferencia	-0,11		0,48		0,08		-0,32	
Prueba 5	21,73	21,29	30,66	31,27	50,66	50,74	1,38	1,06
Diferencia	-0,44		0,61		0,08		-0,32	
Prueba 6	21,73	21,32	30,66	31,13	50,31	50,43	1,73	1,47
Diferencia	-0,41		0,47		0,12		-0,26	
Promedio	0,245		0,5		0,107		0,183	

Desviaciones máximas



# PRUEBAS DE VALIDACIÓN

## Validación geometría impresa



Lazo Abierto

Lazo Cerrado

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (10)$$

	Lazo abierto			Lazo cerrado		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Error MAE	3,75	5,28	2,17	0,14	0,11	0,04
Error RMSE	4,26	5,66	2,17	0,26	0,18	0,04

# CONCLUSIONES

- El sistema monitorea la posición del cabezal y la plataforma durante el proceso de impresión y corrige la desviación de la trayectoria ante perturbaciones.
- La impresora UAO 3DP fue instrumentada con sensores de posición para realimentar la posición relativa del cabezal y plataforma de construcción durante el proceso de impresión, la integración de estos fue uno de los desafíos del proyecto.
- Las características open hardware y open source de la impresora UAO 3DP permitieron integrar el sistema de control de posición al sistema de control de impresión.
- El software de control de posición se desarrolló con el microcontrolador Atmega 2560 y la plataforma Arduino, para leer y procesar las señales de los sensores y de la RAMPS, y generar la acción de control durante el proceso de impresión.
- Sin mencionar la tecnología por procesamiento de Luz Directa (DLP), el sistema de control puede aplicarse a las demás técnicas de impresión o máquinas de mecanizado CNC que tienen sistemas de posicionamiento en 3 ejes.

# RECOMENDACIONES TRABAJO A FUTURO

- El sistema de control de posición puede mejorarse si se realiza una modificación del Firmware que controla la impresora, o si éste se desarrolla desde cero.
- Para la impresora UAO 3DP se recomienda la integración del sistema desarrollado en este proyecto con otras técnicas para cerrar completamente el lazo de control en el proceso de impresión 3D, como el sistema de supervisión de extrusión de filamento; buscando obtener sistemas mucho más robustos y confiables.
- Un trabajo a futuro para mejorar el desempeño de la impresora UAO 3DP y que puede aplicarse a sistemas de impresión open-source, corresponde al desarrollo de una técnica para lograr la reanudación del proceso de impresión tras una desconexión o pérdida de la fuente de alimentación de la impresora.

# REFERENCIAS

3D PRINTING. What is 3d printing? [En línea]. [Consultado el 14 de marzo de 2017] Disponible en internet: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#whatitis>

ACARNLEY, Paul. Stepping Motors a guide to theory and practice. 4ta edición. The Institution of Engineering and Technology. 2007. London, United Kingdom.

AMAYA, Juan; ROJAS, Álvaro Development of a Supervision System: Towards Closing the Control Loop in 3D Printing Systems” presented at the Printing for fabrication conference, Manchester, UK, 2016

-----, -----, “Diseño de un sistema de supervisión para la extrusión de materiales poliméricos en impresoras 3D de software libre”. Cali, 2017. Trabajo de grado (Ingeniero Mecatrónico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Departamento de Automática y electrónica.

BLANDÓN, Santiago. “Construcción de una plataforma de impresión 3D flexible y adaptable bajo estándares open hardware y open source”. Cali, 2016. Trabajo de grado (Ingeniero Mecatrónico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Departamento de Automática y electrónica.

-----, -----, AMAYA, Juan. ROJAS, Álvaro. "Development of a 3D Printer and a Supervision System Towards the Improvement of Physical Properties and Surface Finish of the Printed Parts," presented at the 2nd Colombian Conference on Automatic Control, Manizales, Colombia, 2015.

BOURELL, Dave, et. Al. Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing. ed. Austin, TX: The University of Texas at Austin, 2009.

# REFERENCIAS

MCKITTRICK B, “Closed-Loop Control of a 3D Printer Gantry”. Trabajo de grado (Master of Science). Universidad de Washington. Programa de Ingeniería Mecánica. Disponible en el catálogo en línea de la biblioteca de la Universidad de Washington:

[https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/26048/Weiss\\_washington\\_0250O\\_13644.pdf](https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/26048/Weiss_washington_0250O_13644.pdf)

MOYER.Ilian. Core XY [En línea]. [Consultado el 17 de Febrero del 2018]. Disponible en internet: <http://corexy.com/theory.html>

National Instruments. Difference between X1, X2, X4, and Two-Pulse Encoder Types [En línea]. (Publicado el 4 de Noviembre del 2008). [Consultado el 17 de Enero del 2017]. Disponible en internet: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/FDFA1FB36C8DD235862574F7006D8E3C>

NYCE, David. Linear position sensors: theory and application. John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0471474274, 9780471474272

POLOLU. DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current (md20a) [En línea]. [Consultado el 17 de Febrero del 2018] Disponible en internet: <https://www.pololu.com/product/2132>

SANCHEZ, M. DC motor close-loop control Software [En línea]. [Consultado el 20 de diciembre de 2017] Disponible en internet: <https://www.youmagine.com/designs/dc-motor-closed-loop-control-software>

SAPIENSMAN Automatización Industrial. Control de motores. Sensores de retroalimentación de servosistemas. [En línea]. [Consultado en línea el 18 de marzo del 2017]. Disponible en: [http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/velocidad\\_de\\_motores\\_electricos5.php](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/velocidad_de_motores_electricos5.php)

ULRICH, K; EPPINGER, S. Diseño y Desarrollo de Productos. 2004. Edición 3. McGraw-Hill: México