

**CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE  
TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW**

**MARTHA MARCELA COLL SARMIENTO  
CARLOS ALBERTO JEREZ DURAN**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
BUCARAMANGA  
2011**

**CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE TRES  
GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW**

**MARTHA MARCELA COLL SARMIENTO  
CARLOS ALBERTO JEREZ DURAN**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico**

**Director  
Luis Ángel Silva PhD.  
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
BUCARAMANGA  
2011**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bucaramanga, Marzo 2011**

**A mis Padres por su apoyo, a la bebe y a George  
por estar ahí siempre y no dejarme  
dormir nunca. A mi compañero  
de tesis por su paciencia,  
apoyo y amor.  
Te amo.**

**MMCS**

**Doy gracias a Dios, a mis Padres,  
a mi compañera de tesis por  
su confianza y apoyo en  
aquellos momentos  
difíciles...  
Te Amo  
CAJD**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios por brindarnos sabiduría y paciencia en los momentos difíciles del desarrollo de este proyecto.

Al PhD. Luis Ángel Silva, por su apoyo, confianza y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Juan Carlos Villamizar por el apoyo brindado y su colaboración en todo momento.

Al Ing. Fabio Alonso Guzmán por la confianza, apoyo moral y motivación, que siempre nos dio fuerzas para seguir adelante.

A los amigos que nunca dejaron de creer en nosotros, que con su apoyo y confianza nos motivaron siempre a seguir a delante. Gracias.

A nuestras familias, por la paciencia, y la confianza depositada en nosotros.

## CONTENIDO

	PAG.
INTRODUCCION	15
1. MARCO TEORICO	18
1.2 ¿QUE ES CNC?	18
1.3 TIPOS DE MÁQUINAS CNC	19
1.4 ACTUADORES EMPLEADOS	23
1.4.1 MOTORES PASO A PASO	23
1.5 ENTORNO LABVIEW Y TARJETA NI USB 6008	24
2. ANTECEDENTES	26
2.1 HARDWARE MECÁNICO	26
2.2 HARDWARE ELECTRÓNICO	27
2.3 PROBLEMAS ENCONTRADOS	28
2.4 SOLUCIONES PLANTEADAS	29
3. CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW	30
3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA	30
3.1.1 CIRCUITO ACONDICIONADO DE SEÑAL	30
3.1.2 DRIVER MOTOR PASO A PASO	31
3.1.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES	31
3.1.2.2 DRIVER MOTORES EJE X Y Y	33
3.1.2.3 DRIVER MOTORES EJE Z	34
3.1.3 SENSORES	35
3.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	38

3.2.1	ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE EL ENCODER	38
3.2.2	CONTROL DE POSICIÓN	40
3.2.3	PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS	44
3.2.4	SENSORES FINAL DE CARRERA	46
4.	PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS	48
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	55
	BIBLIOGRAFÍA	56



## LISTA FIGURAS

	PAG.
FIGURA 1: MÁQUINA TALADRADORA [3]	16
FIGURA 2: ESQUEMA PROYECTO [1]	17
FIGURA 3: TORNO CNC [4]	19
FIGURA 4: MÁQUINA CNC TALADRADORA [5]	20
FIGURA 5: MÁQUINA CNC DE FRESADO FANUC [6]	21
FIGURA 6: MESA POSICIONADORA UNIVERSIDAD DE LOJA [7]	22
FIGURA 7: MESA POSICIONADORA UNIVERSIDAD MIXTECA [8]	22
FIGURA 8: MOTOR PAP BIPOLAR [9]	23
FIGURA 9: MOTOR PAP UNIPOLAR [9]	23
FIGURA 10: TARJETA DE ADQUISICIÓN NI USB 6008 [10]	25
FIGURA 11: CONFIGURACION DE PINES [10]	25
FIGURA 12: MESA POSICIONADORA. [1]	26
FIGURA 13: FASE DE POTENCIA [2]	28
FIGURA 14: CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL (CAS) [1]	30
FIGURA 15: IDENTIFICACIÓN DE BOBINAS [13]	32
FIGURA 16: PASOS PARA HALLAR LA SECUENCIA DEL MOTOR [14]	32
FIGURA 17: DRIVER PAP [1][11]	33
FIGURA 18: DRIVER MOTOR EJE Z [1][12]	34
FIGURA 19: FINAL DE CARRERA [15]	35
FIGURA 20: CONFIGURACIÓN INTERNA DEL FINAL DE CARRERA [16]	36
FIGURA 21: CIRCUITO DE RELÉ [1]	36

FIGURA 22: ESQUEMA DE UN ENCODER INCREMENTAL [17]	37
FIGURA 23: ENCODER INCREMENTAL [18]	38
FIGURA 24: DIAGRAMA DE BLOQUES INCREMENTO Y DECREMENTO DE PULSOS [1]	39
FIGURA 25: CONTROL DE POSICIÓN [1]	41
FIGURA 26: ERROR VS. VOLTAJE DE SALIDA	42
FIGURA 27: CONTROL TERCER MOTOR [1]	43
FIGURA 28: SENTIDO DE GIRO TERCER MOTOR [1]	44
FIGURA 29: RUTINA HOME [1]	46
FIGURA 30: POSICIÓN EJE X Vs. TIEMPO	48
FIGURA 31: POSICIÓN EJE Y Vs. TIEMPO	49
FIGURA 32: TRAYECTORIA RECORRIDA	49
FIGURA 33: VELOCIDAD MOTOR EJE X	50
FIGURA 34: VELOCIDAD MOTOR EJE Y	50
FIGURA 35: VELOCIDADES MOTORES X Y Y	51
FIGURA 36: VELOCIDADES MOTORES X Y Y (SETPOINT INVERTIDOS)	52
FIGURA 37: POSICIONAMIENTO TRAYECTORIA MULTIPUNTO	52
FIGURA 38: ERROR DE POSICIÓN TRAYECTORIA MULTIPUNTO	53
FIGURA 39: VELOCIDADES EN TRAYECTORIA MULTIPUNTO	53
FIGURA 40: TRAYECTORIA RECORRIDO MULTIPUNTO	54

## LISTA DE ECUACIONES

	PAG.
ECUACIÓN 1: VOLTAJE DE REFERENCIA	34
ECUACIÓN 2: VELOCIDAD LINEAL	44
ECUACIÓN 3: TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO	45
ECUACIÓN 4: NUEVA VELOCIDAD	45
ECUACIÓN 5: VOLTAJE EQUIVALENTE	45

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Diseñar e implementar un control en lazo cerrado, para una mesa posicionadora de tres grados de libertad, utilizando el entorno LABVIEW.

### Objetivos específicos

- Diseñar e implementar el driver controlador de los motores paso a paso (PAP).
- Diseñar e implementar un oscilador controlado por voltaje (VCO) para controlar los drivers de los motores, partiendo del voltaje entregado por la tarjeta NI USB 6008
- Diseñar e implementar un sistema acondicionador de señal (CAS) para acoplar la salida de voltaje de la tarjeta al VCO y la salida de este al driver de los motores.
- Diseñar el controlador de posición de cada eje de la mesa posicionadora utilizando Labview.
- Programar las coordenadas (X, Y) que determinen la posición espacial deseada de la mesa.

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO: CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW**

**AUTORES: MARTHA MARCELA COLL SARMIENTO  
CARLOS ALBERTO JEREZ DURAN**

**FACULTAD: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DIRECTOR: LUIS ÁNGEL SILVA PhD.**

### **RESUMEN**

En este proyecto se mejoró el funcionamiento de una mesa posicionadora de tres grados de libertad mediante control numérico computarizado. Esta máquina fue donada al laboratorio de control de la universidad, sin embargo no contaba con un software de funcionamiento, razón por la cual no se encontraba en uso, lo que provocó el daño y deterioro de muchos de los componentes electrónicos.

Mediante la construcción de un modulo software/hardware que permite controlar la mesa posicionadora, se logró que esta funcione nuevamente y que su desempeño esté a la altura de cualquier proceso industrial. De igual manera se creó un diseño confiable que desempeña la función driver para los motores paso a paso que posee la máquina y que es controlado variando la frecuencia de entrada; así con un oscilador controlado por voltaje se puede cerrar el lazo de control y manejar los motores desde el computador a través de la tarjeta de adquisición de datos.

El prototipo mejorado tiene como objetivo motivar el desarrollo tecnológico y la construcción de maquinaria de automatización a un costo inferior al del mercado y que pueda ser empleada en al automatización de la industria de la región.

**PALABRAS CLAVE:** Control numérico computarizado, motores paso a paso, driver.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **ABSTRACT OF THE PROYECT**

**TITLE: FEEDBACK CONTROL OF A POSITIONING TABLE WITH THREE DEGREES OF FREEDOM USING LABVIEW.**

**AUTHORS: MARTHA MARCELA COLL SARMIENTO  
CARLOS ALBERTO JEREZ DURAN**

**DEPARTMENT: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DIRECTOR: LUIS ÁNGEL SILVA PhD.**

### **ABSTRACT**

This project will optimize the operation of a positioning machine, of three degrees of freedom, using computer numerical control. This machine was donated to the laboratory of the university but it was not working, this had led to deterioration and damage of the electronic components, we were able to run the machine again and that it can be used for different activities.

A new software/hardware module was developed to control the machine, achieving its performance as good as any industrial process. Together with that was designed a driver to the stepped motors, the driver is controlled by a voltage control oscillator that works as feedback and let us supervise the motors from the computer.

The end of this project is to create our own technology and motivate the construction of automation machinery that can be used in the industry of the region.

**PALABRAS CLAVE:** CNC, PAP, coordinates, dirver.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## INTRODUCCION

Los robots en la industria son de gran utilidad, debido a que cumplen funciones que los seres humanos no pueden realizar, llevando a cabo dichas tareas con mayor rapidez, precisión y exactitud. Se encuentran gran variedad de robots especializados en la industria, un ejemplo de ello es en la industria del cortado de piezas, ya sea por chorro de agua o por plasma, en donde se necesitan estructuras rígidas de gran velocidad y precisión.

Debido a la globalización es necesario para todo sector industrial del país pensar en invertir en tecnología, que los mantenga a la altura de los estándares de producción y calidad exigidos por los compradores del exterior. Una opción tecnológica es la robótica, la cual permite asegurar estándares de calidad y un ritmo constante de producción, generando así beneficios para la empresa.

Sin embargo en Colombia la automatización se llevado a cabo por medio de la importación de tecnología, que incrementan los costos de producción de pequeñas y medianas empresas.

Bajo este marco nace la idea de implementar un prototipo de robot industrial, tipo mesa posicionadora, la cual cuenta con tres grados de libertad, siendo su funcionamiento apto para cualquier proceso que requiera características como precisión, que se encuentre a la altura de cualquiera de las máquinas ensambladas en el exterior y que cuente con una plataforma amigable al usuario; razón por la cual se escogió LABVIEW como interfaz a utilizar.

Hoy en día este tipo de máquinas se aplica a muchos procesos, como lo son el ensamble, corte de vidrio, soldadura, etc. El funcionamiento de estas máquinas viene dado por el posicionamiento de sus tres ejes en un punto deseado, llevando uno de estos la herramienta final, encargada de realizar la acción y que varía de acuerdo a la aplicación que se desee llevar a cabo. El posicionamiento de los ejes viene dado por control numérico por computadora (CNC), este es un sistema que mediante un software permite el control y monitoreo de la posición de los ejes.

En la figura 1 se puede observar las partes principales que forman una máquina CNC, similar a la que se encuentra en el laboratorio de control de la universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Esta fue desarrollada como tesis de grado y donada a la universidad, por los estudiantes Gustavo Andrés Aguillón Almario y Carlos Iván Mendoza Poveda.

El trabajo planteaba la construcción de una mesa posicionadora, con tres grados de libertad, utilizando motores paso a paso, para obtener mayor precisión, los motores se controlaban utilizando los canales de baja frecuencia de la tarjeta NI USB 6009, esto provocaba que la velocidad de desplazamiento de la mesa fuera

muy baja. El software encargado del control de la mesa tomaba los datos para la posición de un archivo de formato .txt, generado por un programa para diseño de circuitos impresos. Sin embargo en la documentación existente sobre ese trabajo no se encuentra ningún registro del software desarrollado.

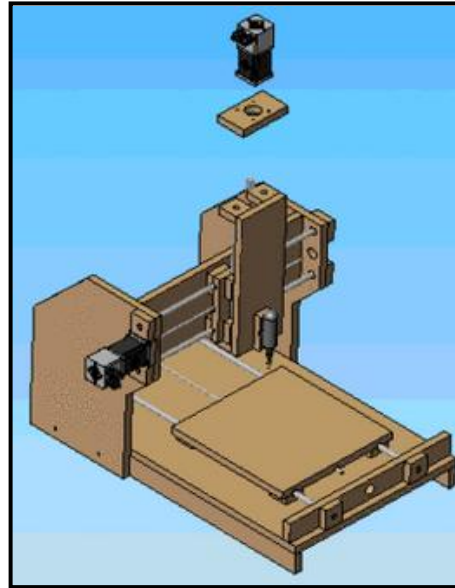


Figura 1: Máquina Taladradora [3]

En el presente proyecto se plantea el mejoramiento de esta máquina, implementando un control proporcional realimentado para el manejo de los motores, logrando así una mayor precisión y la posibilidad de aumentar la velocidad de los mismos. Para el funcionamiento de los motores se desarrolló un driver, controlado por variación de frecuencia desde la tarjeta de adquisición de datos, el software que supervisa y controla el desempeño de la mesa se creó en la plataforma de programación Labview.

La comunicación con el computador se llevará a cabo por medio de una tarjeta de adquisición de datos, NI USB6008, de la empresa National Instruments y una tarjeta electrónica, para cada motor, que hace la función del driver para la secuencia de los motores paso a paso (PAP) que posee la máquina.

En la figura 2 se muestra un esquema del proceso desarrollado. El módulo driver es el encargado de controlar el motor PAP; éste envía las señales del encoder a la tarjeta de adquisición, que está encargada de transmitirlos al computador; allí se ejecuta el algoritmo de control, dando como resultado la dirección, velocidad y distancia que deben recorrer los ejes de la mesa posicionadora. Mediante la tarjeta de adquisición estos datos pasan al circuito acondicionador de señal (CAS) y vuelven al driver del motor, cerrando así el ciclo de control.



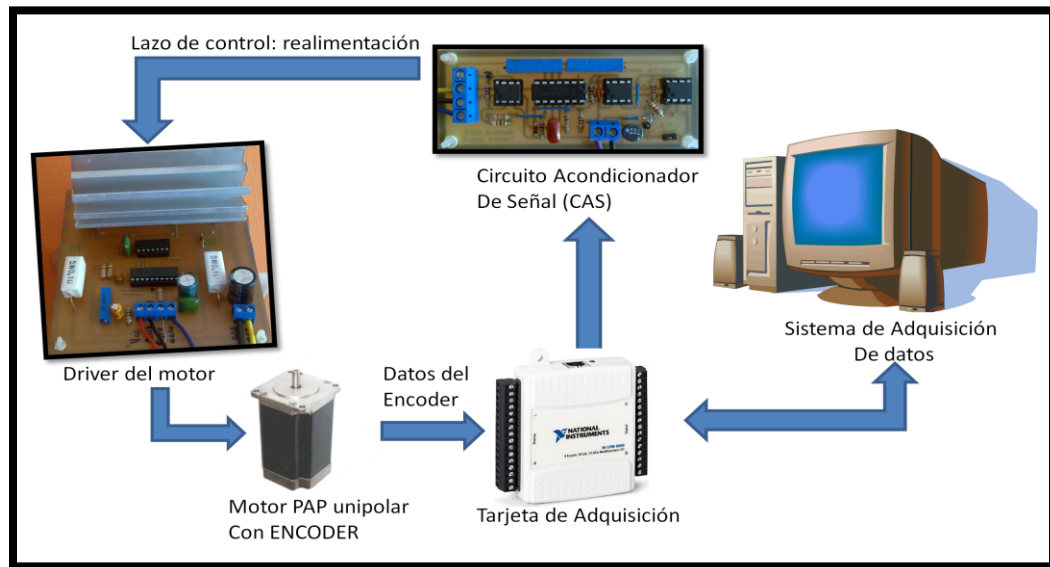


Figura 2: Esquema Proyecto [1]

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 MÁQUINAS HERRAMIENTA

Son máquinas estacionarias que se utilizan para dar forma o moldear materiales. Esto se consigue eliminando parte del material o estampándola con una forma determinada. Son base de la industria, pueden clasificarse en: máquinas desbastadoras convencionales, prensas y herramientas

Las máquinas herramienta datan de 1775, cuando el inventor británico John Wilkinson construyó una taladradora horizontal que permitía conseguir superficies cilíndricas. En 1794 se desarrolló el primer torno mecánico; Años después, Joseph Whitworth desarrolló varios instrumentos permitiendo una precisión de una millonésima de pulgada.

Durante el siglo XIX se logro una precisión relativamente alto en tornos, perfiladoras, cepilladoras, pulidoras, sierras, fresas, taladradoras y perforadoras. Extendiéndose su utilización a todos los países industrializados, Sin embargo, carecían de flexibilidad y no podían utilizarse para varios productos, ni para variar los estándares de fabricación. Como solución para este problema, durante las últimas décadas se han desarrollado máquinas herramientas muy versátiles y precisas, controladas por computadores, que permiten fabricar de forma barata productos con formas complejas. Estas nuevas máquinas reciben el nombre de CNC

## 1.2 ¿QUE ES CNC?

Desde el principio de la humanidad el hombre ha buscado la tecnificación: los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses, los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, durante los siglos XVII y XVIII en Europa fueron construidos muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de robots.

Hoy en día, la globalización presenta un reto a la industria y a todos los interesados en hacer industria, y la automatización es la alternativa para estar a la vanguardia.

El control automático de procesos viene desarrollando un papel muy importante, debido a los beneficios que proporciona, entre los cuales se encuentran:

- Mayor precisión
- Mayor rapidez
- Elaboración de piezas de mayor complejidad
- Operación mas sencilla

Los países mas desarrollados, cuentan con mayor experiencia en este campo, y desde hace años han venido aplicando esta tecnología a herramientas de uso diario, tanto cotidiano como industrial.

Las siglas CNC significan Control Numérico Computarizado, este es un sistema que permite controlar el movimiento de herramientas por medio de programas de computador que utilizan datos numéricos, este control se puede usar con casi todas las máquinas tradicionales.

### 1.3 TIPOS DE MÁQUINAS CNC

- **Torno de control numérico:** Esta clase de tornos modernos, al ser controlados por una computadora, permite realizar piezas de revolución (cilindros), con mayor precisión, asegurando así mayor calidad y menor tiempo de producción. Un ejemplo es el torno Goldmatic, desarrollado y comercializado por COMEV, este se puede ver en la figura 3.



Figura 3: Torno CNC [4]

- **Máquina CNC Taladradora:** Este es uno de los procesos que se considera fundamental en la industria, debido a que es necesario para la mayoría de componentes que se fabrican. Poder tener control computarizado sobre este proceso asegura una mayor fiabilidad y rapidez en la producción, en la figura 4 se puede observar una máquina CNC taladradora, comercializada por opti-machine.



Figura 4: Máquina CNC taladradora [5]

- **Máquina CNC de Fresado:** Este es un claro ejemplo de automatización programable. Su principal aplicación es la producción de piezas sencillas, permitiendo obtener piezas de mayor calidad y cambiar de un modelo de pieza a otra mediante la simple inserción del programa correspondiente y de las nuevas herramientas.

Las fresadoras modernas, como la de la figura 5, poseen dispositivos que permiten visualizar las posiciones de las herramientas, lo cual otorga al usuario la oportunidad de supervisar el funcionamiento de la máquina.



Figura 5: Máquina CNC de fresado Fanuc [6]

- **Perfiladora.**

La perfiladora se utiliza para obtener superficies lisas. La herramienta final se desliza sobre una pieza fija y efectúa un primer recorrido para cortar salientes, volviendo a la posición original para realizar el mismo recorrido tras un breve desplazamiento lateral. No se suele utilizarse en las líneas de producción, pero sí en fábricas de herramientas y troqueles.

- **Máquinas CNC Tipo Mesa Posicionadora**

Como se pudo observar anteriormente todas estas máquinas-herramientas cuentan con una parte móvil, encargada de ejecutar la función para las cuales son diseñadas, es por esto que también son conocidas como mesas posicionadoras. Estas obedecen a una trayectoria o velocidad indicada desde el computador, la cuales a su vez monitoreada, asegurando una mayor precisión y calidad.

Para el óptimo funcionamiento de este tipo de máquinas se requiere garantizar una buena velocidad de conexión con el computador, así como el óptimo funcionamiento de los motores que la forman, esto garantiza la velocidad.

Se debe tener en cuenta que estas máquinas necesitan un motor de alto torque capaz de garantizar el movimiento de cada uno de los ejes que formen la maquinaria. Para esto en muchos casos se utilizan motores PAP industriales, los cuales son de menor precio.

En las figura 6 y 7 se presentan dos ejemplos de maquinas posicionadoras, la primera fue desarrollada como tesis de grado en la Universidad de Loja, Ecuador.

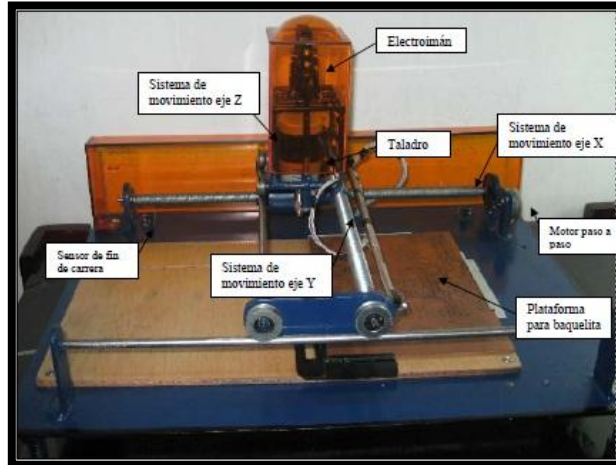


Figura 6: Mesa Posicionadora Universidad de Loja [7]

Esta mesa cuenta con tres grados de libertad y puede llegar a alcanzar una velocidad de 1cm/s.

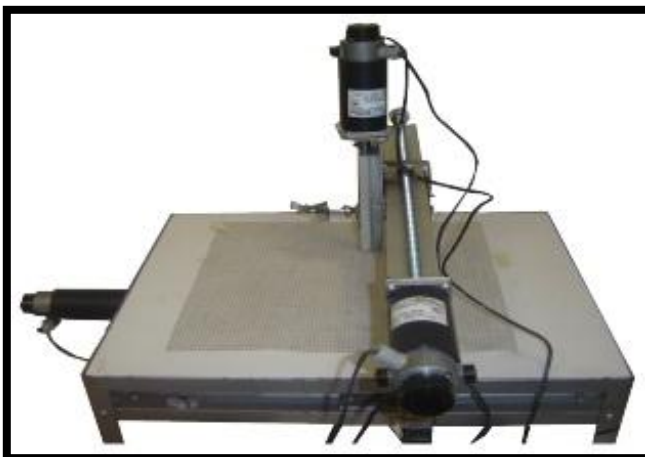


Figura 7: Mesa Posicionadora Universidad Mixteca [8]

La segunda mesa fue desarrollada en la Universidad Tecnológica Mixteca, México. Cuenta con tres grados de libertad y tiene una velocidad de desplazamiento de 5cm/s.

## 1.4 ACTUADORES EMPLEADOS

En una mesa posicionadora los actuadores son los encargados de posibilitar el movimiento de la misma. En este caso se trata de motores paso a paso, a continuación se habla sobre estos.

### 1.4..1 Motores Paso a Paso

Este tipo de motores se utilizan en mecanismos que necesitan de movimientos precisos. Su caracterizan por que pueden ser movidos una paso a la vez, por cada pulso que se aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ ,

Otra característica muy importante es la habilidad de poder quedar enclavados en una posición si una o más de sus bobinas están energizadas.

- **Tipos de motores paso a paso.**

Existen motores tipo bipolar o unipolar. Los motores bipolares, como el de la figura 8, son llamados así porqué para girar, deben invertir la polaridad de la alimentación de sus bobinas, estos motores se reconocen por poseer solo 4 hilos que salen de su cuerpo.

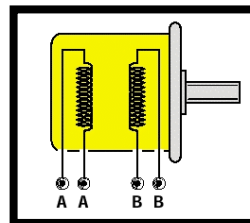


Figura 8: Motor PAP bipolar [9]

Los motores unipolares cuentan con un doble arrollamiento en sus bobinas, lo que hace que no sea necesario invertir la polaridad de la alimentación. Se reconocen por los 5 o 6 hilos que salen de su cuerpo. Se pueden ver los esquemas de estos motores en la figura 9.

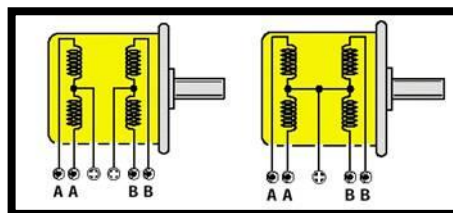


Figura 9: Motor PAP unipolar [9]

Si se observa uno de estos motores por dentro, se puede ver algo similar a un dínamo de bicicleta: un imán con múltiples polos, conectado al eje del motor.

Para identificar las bobinas que forman el motor y la secuencia de los pasos, se aplica un voltaje en el cable común y se pasa cada uno de los otros cables a tierra.

## **1.5 ENTORNO LABVIEW Y TARJETA NI USB 6008**

Esta es una herramienta gráfica de control y diseño mediante la programación en lenguaje gráfico, fue creado por National Instruments en 1976 para funcionar sobre máquinas MAC y salió al mercado por primera vez en 1986. Hoy en día está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux.

Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo. LABVIEW consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante, como son tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, como de otros fabricantes.

Es utilizado por ingenieros y científicos para aplicaciones como:

- Adquisición de datos y análisis matemático.
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante.
- Automatización industrial y programación de PACs.
- Control y supervisión de procesos.
- Visión artificial y control de movimiento.
- Robótica, Domótica y redes de sensores inalámbricos.

Su principal característica es la facilidad de uso lo que permite que programadores de pocos conocimientos logren programas relativamente complejos, que resultarían muy complejos con lenguajes tradicionales.

De la misma National Instruments se encuentra en el mercado la tarjeta NI USB 6008, mostrada en la figura 10, esta es el complemento perfecto para la adquisición de datos con LABVIEW. Esta cuenta con 8 canales de entrada analógica, 2 canales de salida analógica, 12 canales de entrada/salida digital y una entrada contador, esta última con la capacidad de manejar frecuencias altas.





Figura 10: Tarjeta de adquisición NI USB 6008 [10]

La configuración de pines de la tarjeta se puede observar en la figura 11.

Terminal	Señal Individual	Señal Diferencial
1	GND	GND
2	AI 0	AI 0+
3	AI 4	AI 0-
4	GND	GND
5	AI 1	AI 1+
6	AI 5	AI 1-
7	GND	GND
8	AI 2	AI 2+
9	AI 6	AI 2-
10	GND	GND
11	AI 3	AI 3+
12	AI 7	AI 3-
13	GND	GND
14	AO 0	AO 0
15	AO 1	AO 1
16	GND	GND

Terminal	Señal
17	PO 0
18	PO 1
19	PO 2
20	PO 3
21	PO 4
22	PO 5
23	PO 6
24	PO 7
25	P1 0
26	P1 1
27	P1 2
28	P1 3
29	PFI 0
30	+2.5 V
31	+5 V
32	GND

Figura 11: Configuración de pines [10]

## 2. ANTECEDENTES

A continuación se presenta una breve descripción el estado en el que se encontraba la mesa posicionadora, antes del presente proyecto.

Esta máquina fue realizada en la Universidad Pontificia Bolivariana como tesis de grado, por los estudiantes Gustavo Andrés Aguillón Almario y Carlos Iván Mendoza Poveda. Su funcionamiento se basa en la ubicación de un taladro mediante el posicionamiento de los ejes X y Y.

Durante el desarrollo de esa tesis se creó un software encargado de controlar el movimiento de los ejes. Puesto que la función de esta máquina es la perforación de circuitos impresos, se utilizó un programa para el diseño de PCB, que genera un archivo en bloc de notas (.txt) donde se encuentran las coordenadas X,Y. El procesamiento de estas coordenadas se realizó mediante software desarrollado, que envía las señales a los motores encargados de posicionar los ejes.

### 2.1 Hardware Mecánico

Se compone de todas las estructuras que conforman la mesa posicionadora, como se muestra en la figura 12, las cuales se explican a continuación.

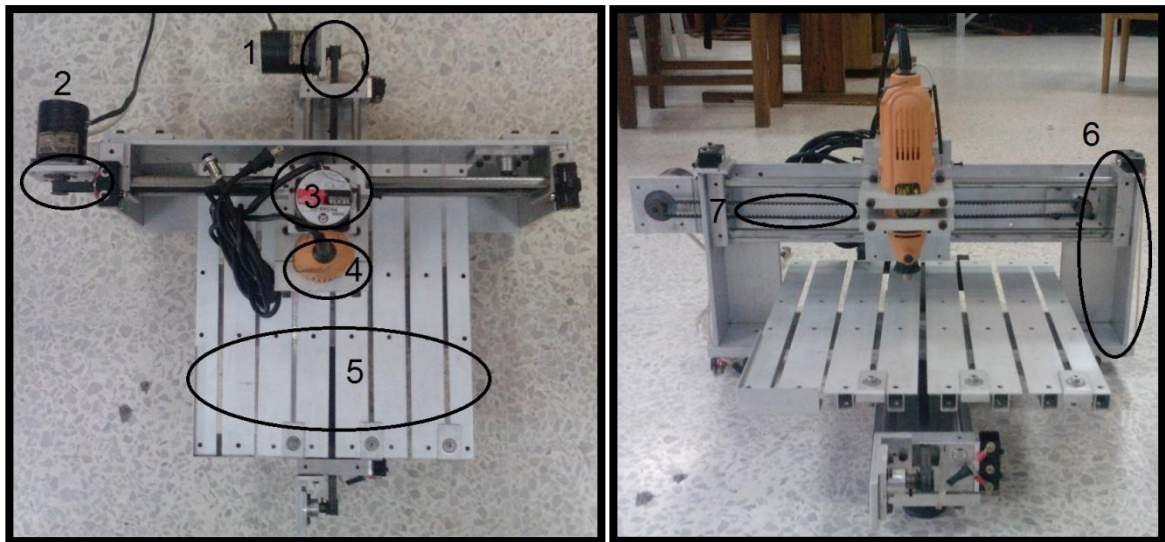


Figura 12: Mesa Posicionadora. [1]

### **Soporte Motores (1, 2, 3)**

Están hechas con el fin de acoplar los motores paso a paso a sus respectivos ejes.

### **Soporte de Taladro (4)**

Su finalidad es sujetar y desplazar el taladro, manteniéndolo centrado. Cuatro tornillos aprisionan las platinas que mantienen el taladro en su puesto.

### **Plataforma de Perforación (5)**

Tiene un área de 360mm x 330mm. Para lograr su movimiento se cuenta con un sistema de barras lisas y correas dentadas.

### **Parales Tipo L (6)**

Soportan la estructura del eje X, están unidos entre sí por medio de una platina, y alojan un par de varillas lisas. Su función es desplazar el eje donde está sostenido el taladro.

### **Polea y Correa (7)**

Se utilizan para lograr la transferencia de fuerza del motor a su respectivo eje de coordenadas.

## **2.2 Hardware Electrónico**

La mesa posicionadora no contaba con un driver para el control de los motores, su manejo estaba dado por las señales generadas desde la tarjeta de adquisición (fase de control) y amplificadas por una fase de potencias, estas dos se explican brevemente a continuación.

- **Fase de Control**

En esta etapa se interpretan y acondicionan las señales provenientes del software, luego son transmitidas a la fase de potencia. De igual forma se captan señales provenientes de los sensores que posee la máquina y por los cuales se lleva a cabo la realimentación.

- **Fase de Potencia**

Esta fase se encarga de energizar las bobinas del motor PAP. Se compone de cuatro transistores TIP120 y dos resistencias de potencia por cada fase. (Ver figura 13)

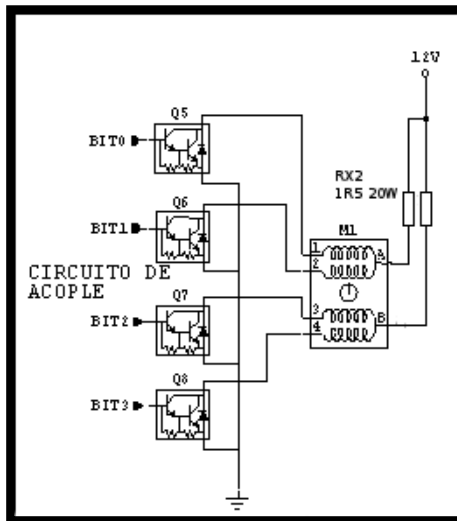


Figura 13: Fase de potencia [2]

### 2.3 Problemas Encontrados

Los problemas encontrados son los siguientes:

- Debido al mismo estado de abandono la parte electrónica se encontraba en mal estado, siendo necesario reemplazar los encoders de los motores.
- Cuando la mesa posicionadora se encontraba en funcionamiento su velocidad de desplazamiento era muy lenta, lo cual hacía que el proceso fuera largo y tedioso.
- La mesa no contaba con sensores de protección, para la protección de la estructura mecánica.
- No se encontró el software de la mesa posicionadora, ni documentación sobre éste, fuera de una guía de usuario muy básica.

## 2.4 Soluciones planteadas

- Poner en funcionamiento la mesa posicionadora y desarrollar un sistema de control que permita que la máquina funcione en óptimas condiciones.
- Mejorar la velocidad de funcionamiento de la máquina, manejando la entrada de alta frecuencia que cada una posee.
- Acondicionar dos sensores final de carrera, con el fin de detectar algún fallo en el desplazamiento normal de la máquina y que cumpla con las medidas de seguridad requeridas en la industria.
- Crear un software abierto que permita al usuario familiarizarse y tener acceso al mismo, conociendo como fue desarrollado.
- Crear un control proporcional para el manejo de los motores paso a paso, reduciendo así el error en su posicionamiento.

### 3. CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW

En la realización del presente proyecto se mantuvo la estructura mecánica de la mesa posicionadora, y se planteó modificar la parte de su funcionamiento electrónico para optimizar su desempeño. A continuación se presenta el diseño de los diferentes drivers y del software, desarrollados para este fin.

#### 3.1 Diseño e Implementación Electrónica

La parte electrónica implementada se compone de un circuito acoplador de señal (CAS) para la realimentación del sistema, un driver para los motores PAP encargados del movimiento de los ejes X y Y y un driver para el motor del eje Z.

##### 3.1.1 Circuito Acondicionado de Señal

El circuito acondicionador de señal es el encargado de enviar las señales provenientes de la tarjeta de adquisición hacia el driver del motor. Como se mencionó anteriormente la adquisición de los datos de los encoder se lleva a cabo mediante una tarjeta NI USB 6008. Para cerrar el lazo de control se utilizó una salida analógica de voltaje de esta, la cual varía de 0 a 5 voltios. El CAS se encarga de transformar el voltaje analógico en un tren de pulsos, de frecuencia variable, el cual pone en funcionamiento el driver del motor PAP.

En la Figura 14 se muestra el diseño del CAS.

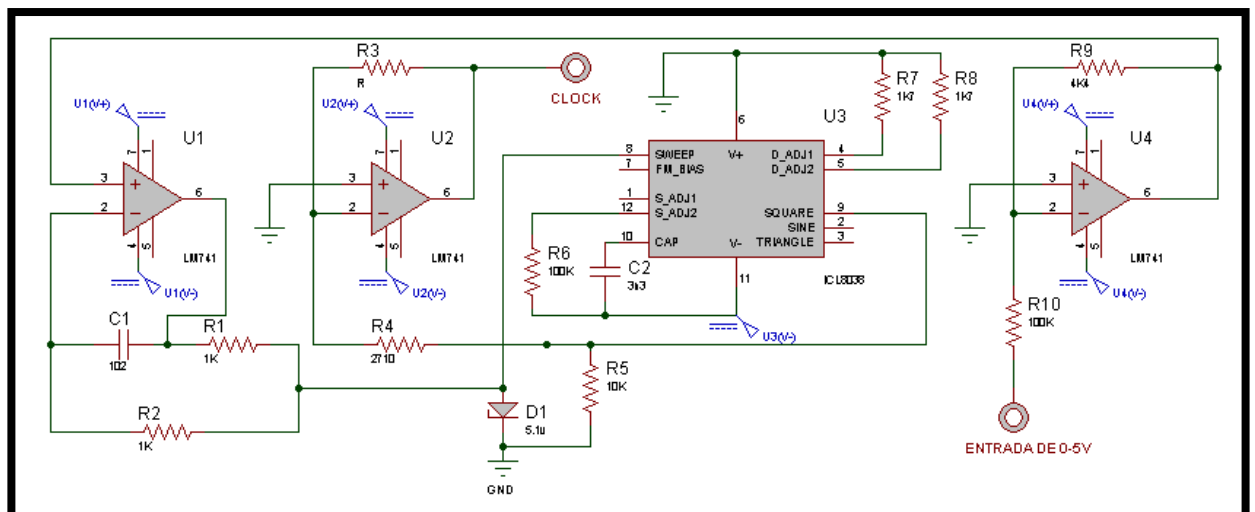


Figura 14: Circuito acondicionador de señal (CAS) [1]

El cual está formado por un ICL8038, encargado de convertir la señal de voltaje, que entrega la tarjeta de adquisición, en un tren de pulsos. Antes de transmitir esta nueva señal al driver del motor debe ser acondicionada por un amplificador.

### **3.1.2 Driver Motor Paso a Paso**

A continuación se presentan las características de los motores que posee la mesa posicionadora, así como la descripción de los dos drivers diseñados para el manejo de los motores paso a paso.

#### **3.1.2.1 Características de los Motores**

Para este proyecto se mantuvieron los mismos motores, estos tienen las siguientes características:

Motores de los ejes X y Y

- Marca: Servo Stepping M.
- Modelo: Kp6m2-020
- Torque: 50 Oz-In Hold
- Pasos: 200 Por Vuelta 1,8 Grados Por Paso
- Consumo: 2,4 Amperios Por Fase Unipolar
- Voltaje: 12v

Motor del eje Z

- Marca: vexta stepping motor.
- Modelo: ph266-01
- Torque: 50 oz-in hold
- Pasos: 200 por vuelta 1,8 grados por paso
- Consumo: 1,2 amperios por fase unipolar
- Voltaje: 12v

Los tres motores son de tipo unipolar, es decir poseen un común para cada una de las bobinas, de esta forma se pueden identificar que cables forman cada bobina midiendo la continuidad entre ellos. La distribución de las bobinas se puede ver en la figura 15.

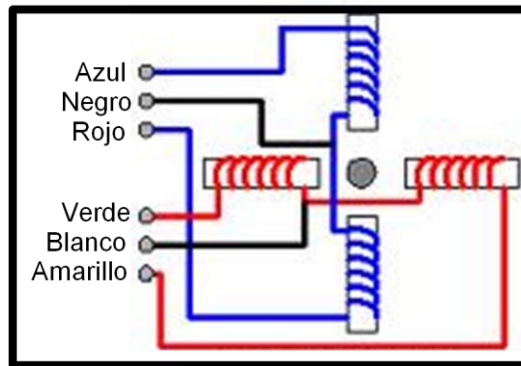


Figura 15: Identificación de Bobinas [13]

Una vez identificados los terminales de cada bobina es necesario hallar la secuencia de giro del motor, para esto se debe energizar el común de cada bobina con 12V e ir pasando cada uno de los terminales restantes a tierra, como se indica en la Figura 16.

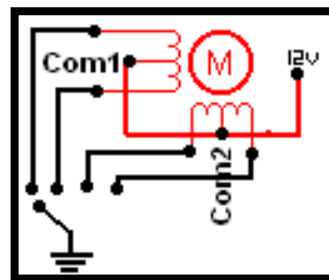


Figura 16: Pasos para hallar la secuencia del motor [14]

La secuencia para que le motor gire en un sentido se muestra continuación:

1. Verde
2. Amarillo
3. Azul
4. Rojo

Para que el motor gire en sentido contrario solo se invierte el sentido de la secuencia.



### 3.1.2.2 Driver Motores eje X y Y

El driver de estos motores cuenta con un L297, este es un integrado diseñado especialmente para el control de motores paso a paso, ya que genera la secuencia de pulsos necesaria para hacer girar el motor.

Para lograr la corriente que necesitan las bobinas del motor se utilizaron cuatro Mosfet IRFZ44N. En la figura 17 se puede observar un esquema del driver del motor.

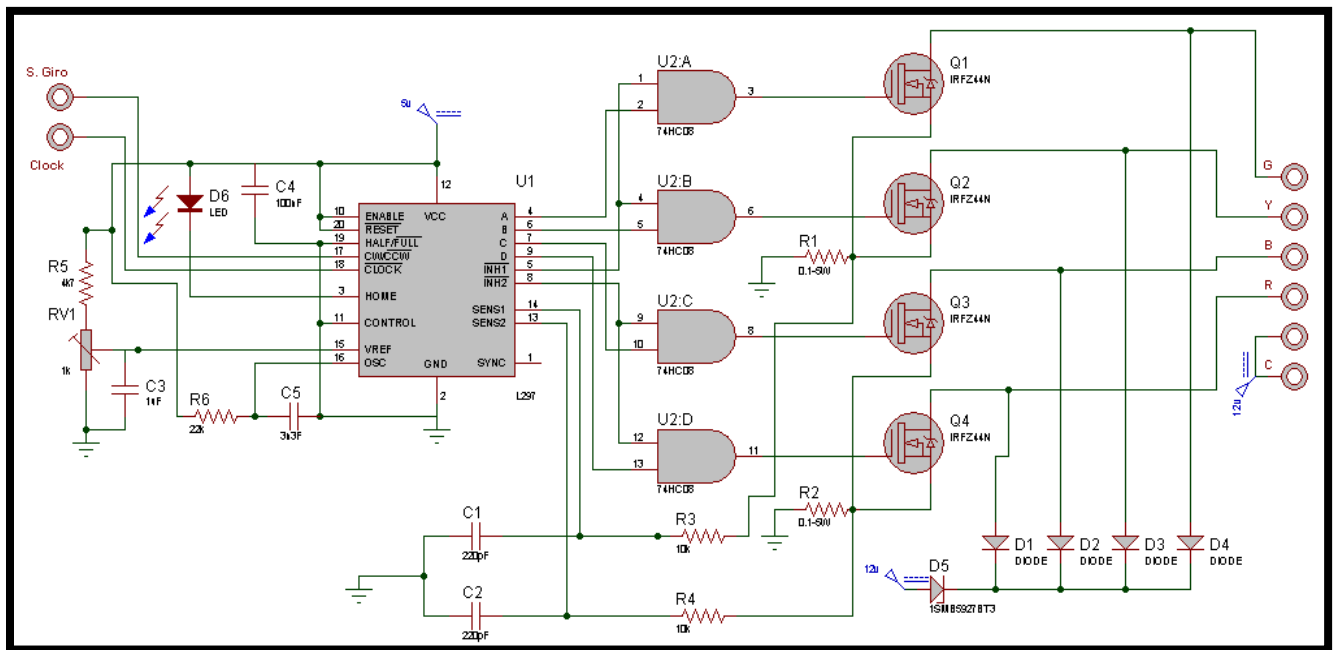


Figura 17: Driver PAP [1] [11]

El integrado L297 cuenta con dos pines para el control de corriente, con el fin de proteger el motor de picos de corriente que se puedan generar. El censado de corriente se lleva a cabo mediante las resistencias R1 y R2, dependiendo de la tensión de referencia, la cual se varía con el divisor de corriente en el pin 15 del L297, la limitación de corriente viene dada por un comparador que habilita o deshabilita la salida de pulsos esto a su vez activan o desactivan los Mosfet, generando así la corriente que necesita el motor para funcionar.

Para calcular la corriente de trabajo deseada se calcula el voltaje de referencia como se muestra en la ecuación 1:

$$V_{ref} = 0.1 \times I_{motor} \quad [1]$$

Ecuación 1: Voltaje de Referencia

El driver posee con dos entradas, *señal* y *giro*, la primera corresponde al tren de pulso que proviene del circuito acondicionador de señal y la segunda es el sentido de giro que viene dado desde la misma tarjeta de adquisición. Cuenta a su vez con seis salidas, para cada uno de los conectores del motor.

### 3.1.2.3 Driver Motores eje Z

Para el funcionamiento de este motor se implemento otro tipo de driver, puesto que este motor no posee encoder, por lo cual el control implementado será de tipo on-off.

El esquemático de este driver se muestra en la figura 18

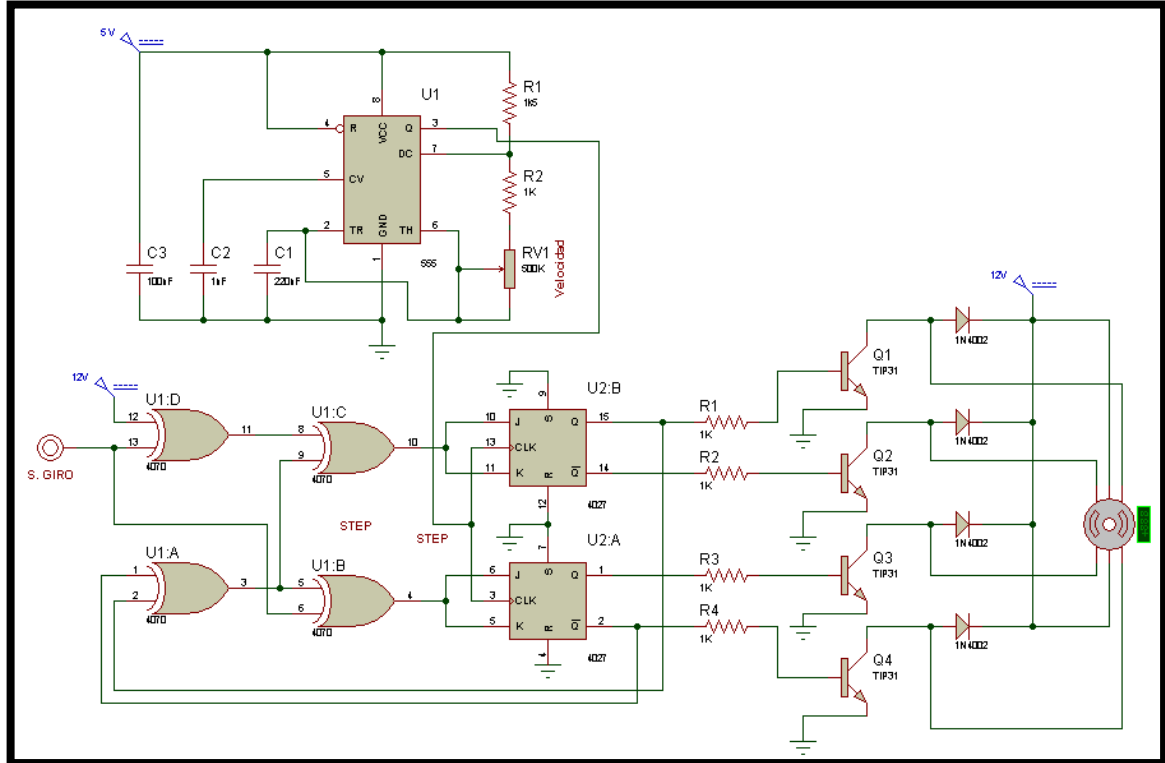


Figura 18: Driver Motor Eje Z [1][12]

Está basado en dos Flip-Flop JK y una EXOR, que generan la secuencia de pulsos necesarios para mover el motor, junto con 4 Tip120 que impulsan la corriente.

Su funcionamiento está dado por un oscilador LM555 en configuración astable, este hace la función de reloj para los Flip Flop JK y cuatro compuertas EXOR, generando así el tren de pulsos para el motor.

Una de las entradas de las EXOR determina el sentido de giro, este viene dado desde la tarjeta de adquisición. Adicionalmente para activar o desactivar el circuito se cuenta con un relé, el cual es a su vez activado por el software solo en el momento en que se requiera llevar a cabo la acción final del proceso.

### 3.1.3 Sensores

En esta sección se presentarán los sensores que posee la mesa posicionadora, que sirven para protección y detección de estados o posiciones importantes.

- **Final de Carrera**

En la figura 19 se puede ver un sensor final de carrera como los que posee la máquina. Estos sensores sirven para dar seguridad al proceso, marcan el punto de inicio y sirven de protección en caso de un desbordamiento en la rutina.



Figura 19: Final de Carrera [15]

En la figura 20 se observa la estructura interna de un final de carrera. Este tipo de sensores son muy usados en la industria para determinar la llegada a determinada posición de un elemento.

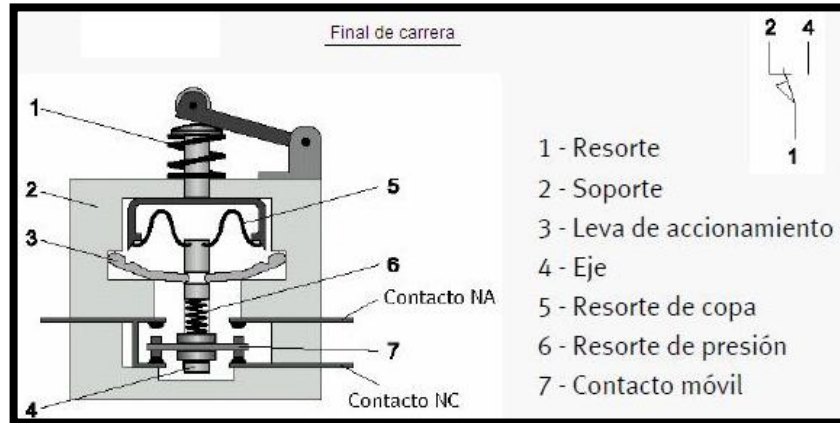


Figura 20: Configuración Interna del Final de Carrera [16]

En este caso los sensores envían señales a través de la tarjeta de adquisición hacia el software de control de la máquina, indicando dos estados importantes del proceso el inicio o home y el desbordamiento o mal funcionamiento de la rutina.

- **Relé**

Un relé es un pulsador activado por un electroimán, en el que por medio de una bobina y el electroimán, se activa uno o varios contactos, abriendo o cerrando circuitos independientes. En la figura 21 se puede ver el circuito implementado para el control del relé.

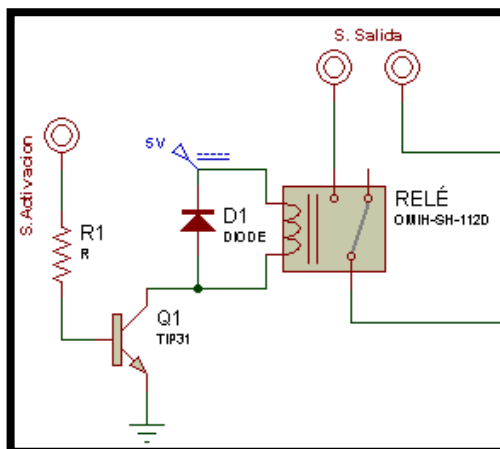


Figura 21: Circuito de Relé [1]

Aunque este en si no es un sensor, en este caso se utiliza para activar o desactivar el circuito de control del motor del eje Z y la herramienta final del proceso, dependiendo de las ordenes que reciba desde el software de control.

El relé se activa por una señal proveniente de la tarjeta de adquisición, generando así los 5V que energizan el circuito del motor del eje Z ó los 120V de corriente alterna para el taladro.

- **Encoder**

El encoder es un sensor rotativo que convierte el movimiento angular del motor en un tren de pulsos, que se utilizan para controlar el desplazamiento, angular o lineal, del motor.

En la figura 22 se observa como esta formado un encoder y la manera en que este funciona.

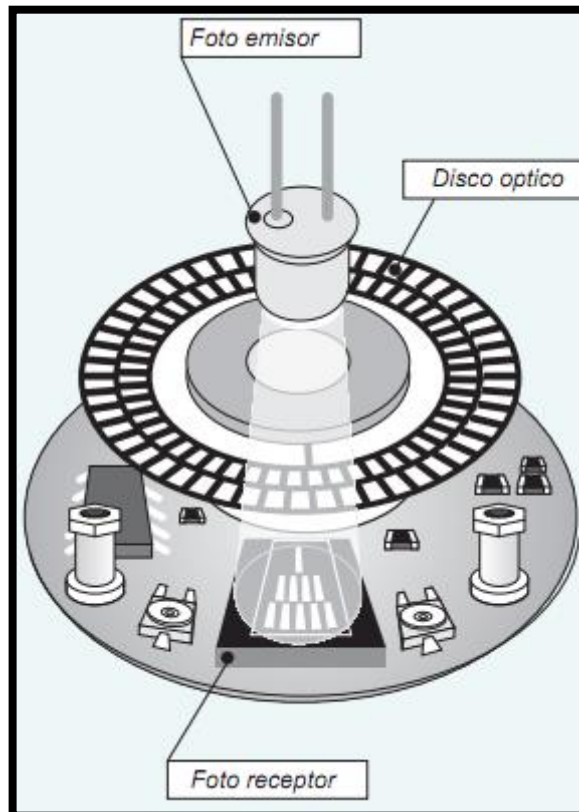


Figura 22: Esquema de un Encoder Incremental [17]

La lectura del encoder se basa en la rotación de un disco ranurado que se encuentra en medio de un foto-emisor y su respectivo foto-receptor, interrumpiendo el haz de luz enviado por el primero, generando así los pulsos eléctricos respectivos.

Existen diferentes tipos de encoders, para este proyecto se trabajó con encoders incrementales, estos normalmente proporcionan dos señales cuadradas desfasadas  $90^\circ$  entre sí. Al hacer lectura de un solo canal se puede obtener información sobre la velocidad angular del motor; si además se obtiene la información del segundo canal se puede determinar el sentido de giro.

Externamente el encoder se ve como el encapsulado mostrado en la figura 23:

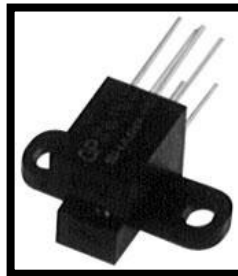


Figura 23: Encoder Incremental [18]

## 3.2 Descripción del Software

A continuación se presenta y explica el software desarrollado para el funcionamiento de la mesa posicionadora, el sistema de adquisición de datos y el tipo de control utilizado para lograr el posicionamiento de la máquina.

### 3.2.1 Adquisición de datos desde el encoder

La adquisición de datos se realizó por medio de una tarjeta NI USB 6008, esta cuenta con una única entrada de contador, la cual está diseñada para soportar frecuencias de hasta 5Mhz, a diferencia del resto de las entradas/salidas digitales que solo trabajan a 150Hz.

Al poseer solo una entrada de contador por tarjeta limita la adquisición de datos a solo un canal por encoder, por lo tanto fue necesario diseñar por software un

sistema de incremento y decremento de pulsos, con el fin de determinar el sentido de giro y la disminución del error al acercarse a la posición deseada.

En la figura 24 se muestra el diagrama de bloques diseñado para el incremento y decremento de los pulsos recibidos desde el encoder. La figura está dividida en seis partes las cuales se explican a continuación.

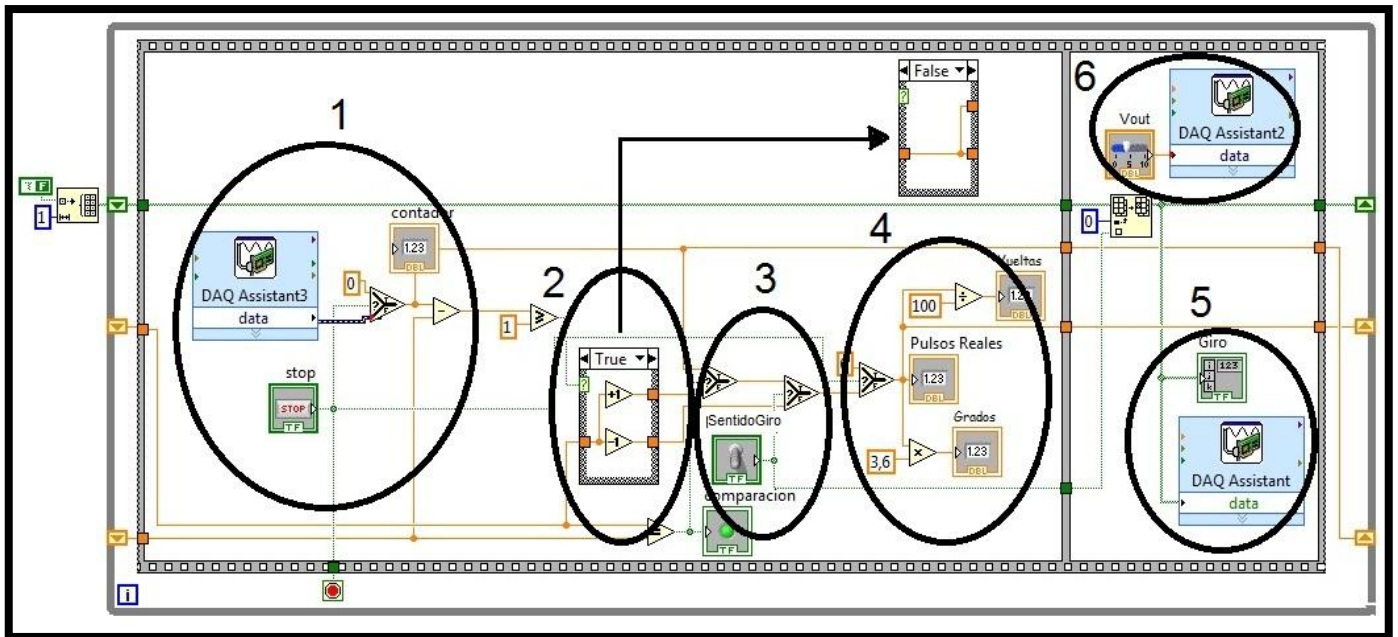


Figura 24: Diagrama de Bloques Incremento y Decremento de pulsos [1]

1. Esta primera parte está formado por el módulo DAQ Assistant, este permite seleccionar que tipo de entrada se desea, y visualizarla mediante un indicador (contador) como se observa en la figura.
2. Al ser un encoder incremental el número de pulsos aumenta indiferentemente al sentido de giro del motor, por lo cual es necesario realizar un sistema que reste los pulsos una vez cambie el sentido de giro. Para esto se lleva un registro del conteo, con la ayuda de los registros de corrimiento en el marco de la estructura while y una estructura de case encargada de sumar o restar los pulsos dependiendo del sentido de giro del motor.

3. En esta parte se muestra como se simuló el cambio en el sentido de giro por medio de un switch (sentido de giro), el cual varia la salida de alto a bajo indicando así que el motor gira hacia la derecha o hacia la izquierda.
4. En esta parte se observa el conteo de los pulsos, este aumenta al girar el motor hacia la izquierda y disminuye una vez se cambia el sentido de giro. Así mismo se calculó el número de vueltas y los grados recorridos, a partir de una regla de tres donde cada paso del motor son 3.6 grados y cada vuelta son 100 pulsos.
5. En esta parte se utiliza el módulo DAQ assistant para enviar la señal del sentido de giro hacia el motor, para lo cual se crea una matriz que transmita el cambio del Switch de sentido de giro. Este módulo DAQ assistant se configura de forma similar al de la entrada de contador, solo que como salida digital.
6. Por último en esta parte se creo un voltaje de salida graduable, de esta forma se podrá controlar la velocidad del motor, cabe resaltar que este tipo de control es temporal y que la velocidad del motor se da de forma automática en el programa de control de posición.

### **3.2.2 Control de Posición**

Partiendo del programa anterior, se llevó a cabo la implementación del control de posición para el motor. Se escogió un control proporcional por tratarse de motores paso a paso, estos de por si son muy precisos y fácil de controlar. En la figura 25 se muestra el esquema del programa realizado.



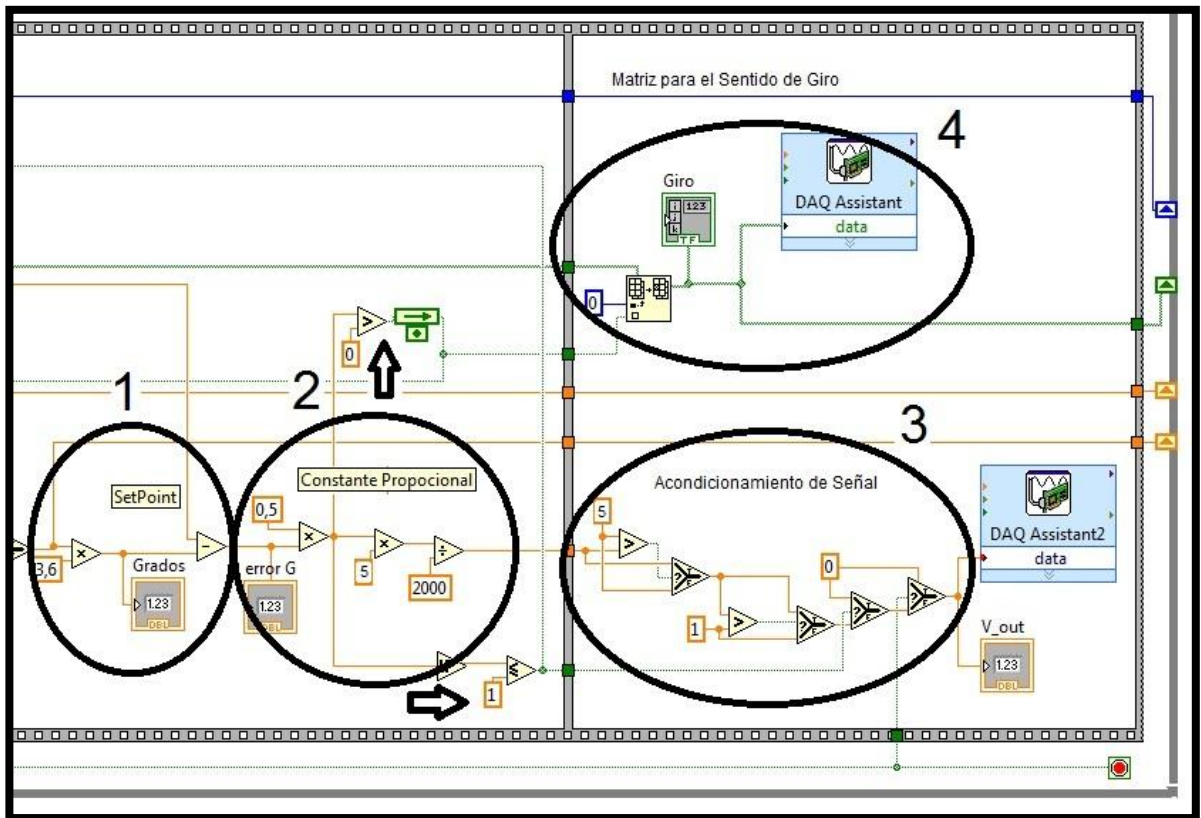


Figura 25: Control de Posición [1]

A continuación se explica el programa deteniéndose en cada una de las partes en que se encuentra dividido.

1. En esta primera parte se calcula el error a partir de la diferencia entre el setpoint dado por el usuario y los grados recorridos por el motor, estos últimos calculados como se explico anteriormente.
2. En la segunda parte se multiplica el error hallado por una constante proporcional, esta se escogió partiendo del análisis del error generado al posicionarse el motor, al multiplicarlo por una constante menor a 1 se puede lograr disminuirlo.

A la salida del controlador proporcional se tiene un valor en grados que debe ser convertido a su equivalente en voltaje. Para esto se hace una relación entre el valor máximo en grados que se desea alcanzar o que puede tomar el setpoint y el máximo valor de voltaje que se puede obtener. Con estos datos se realiza una regla de tres y se obtiene el voltaje de salida que en el driver será transformado en la velocidad del motor.

En la figura 26 se presenta una gráfica donde se ilustra la relación entre el error y el voltaje de salida obtenido, suponiendo un error máximo de 2000 grados.

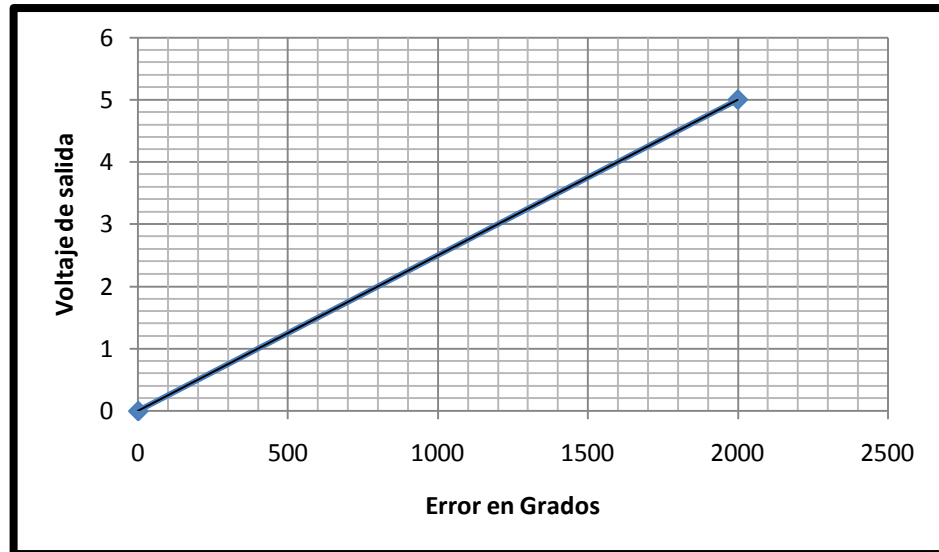


Figura 26: Error Vs. Voltaje de salida

La salida de voltaje analógico de la tarjeta de adquisición puede variar de 0 a 5 voltios, con la equivalencia de voltaje realizada anteriormente se garantiza que independientemente del error el voltaje de salida nunca supere los 5 voltios y que este varía directamente proporcional al error que se presente.

A partir del error se determina también el sentido de giro, basta con mirar si este es mayor o menor a cero, esto hará que el motor gire hacia la derecha o la izquierda.

Cuando el error sea menor a 1 grado el motor recibe la orden de detenerse, como se muestra en la parte inferior de la figura 26.

3. En esta parte del programa se revisa nuevamente que nunca se sobrepase los valores permitidos por la tarjeta de adquisición, mediante una serie de comparadores y selectores, los cuales no permiten el paso de un voltaje mayor a 5V o menor a 0V, con esto se garantiza que el programa no presente ningún error a la hora de ejecutarse.

4. Por último en esta parte se muestra nuevamente como se envía la señal del sentido de giro a la tarjeta de adquisición, por medio del módulo DAQ assistant configurado como salida digital. De igual forma se envía el voltaje de salida a través de otro módulo DAQ assistant configurado como salida análoga.

Este control de posición se utilizó para los motores de los ejes X y Y, los cuales cuentan con el mismo driver y poseen encoder para la realimentación del sistema.

El motor que mueve el eje Z (herramienta) no cuenta con un encoder para realimentación, por esto se agrego un pulsador que indique cuando la herramienta ha llegado a su posición final y por cuya señal se invierta el sentido de giro de este motor. El programa diseñado para su control se observa en la figura 27 y está dividido en dos partes:

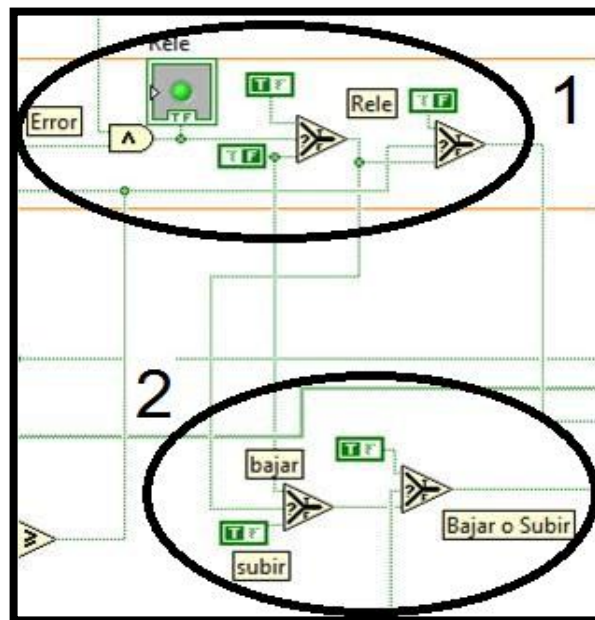


Figura 27: Control tercer motor [1]

1. El primer paso consiste en activar el relé que energiza el driver, esto se hace a partir cuando el error de posición de los otros dos motores es cero, es decir cuando están detenidos en la posición deseada, esto con el fin de que no se accionen el driver de la herramienta antes de estar posicionados correctamente los otros dos ejes. Para asegurar esto se realiza una operación lógica AND entre los errores de esta forma solo cuando ambos sean cero, es decir la mesa esté posicionada se activa el relé.

- En la segunda parte del programa se determina la acción que debe realizar el driver, subir o bajar la herramienta. Esto se hace a partir del dato adquirido del pulsador, este ingresa a través de un módulo DAQ assistant configurado como entrada digital, si la entrada es un valor lógico bajo indica que el pulsador no ha sido accionado, es decir la herramienta debe bajar, de lo contrario este debe subir.

La señal del pulsador se toma como una entrada digital, como se muestra en la figura 28, esta cambia su valor al ser pulsado, indicando así la necesidad de cambiar el sentido de giro para subir la herramienta.

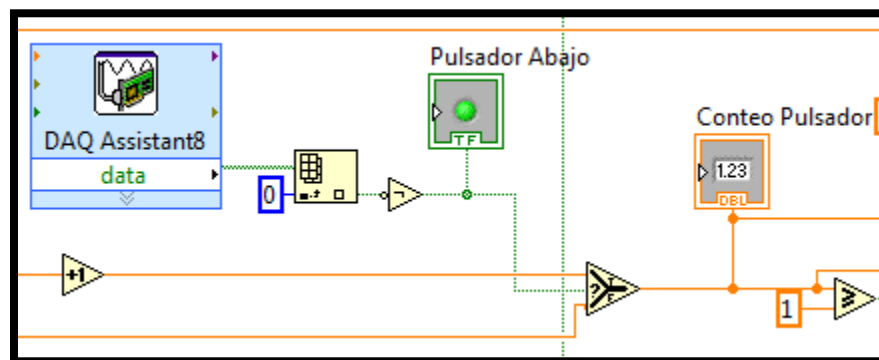


Figura 28: Sentido de Giro tercer motor [1]

La misma señal que activa el relé, para el driver del tercer motor, activa un segundo relé para el encendido de la herramienta, en este caso un motortool.

### 3.2.3 Planificador de Trayectorias

El objetivo de un planificador de trayectorias es controlar la forma de desplazamiento de la mesa, logrando que el recorrido descrito por los ejes al moverse sea una línea recta, para esto se asume que la velocidad a la que se mueven los motores son lineales, como se muestra en la ecuación [2]. Donde X y Y son los desplazamientos de los ejes,  $V_x$  y  $V_y$  son las velocidades y  $t_x$  y  $t_y$  el tiempo que demora en posicionarse cada uno.

$$X = V_x * t_x \quad Y = V_y * t_y \quad [2]$$

Ecuación 2: Velocidad Lineal

Para lograr que el desplazamiento se efectuó en el mismo tiempo, independiente de la distancia a recorrer, se debe calcular un tiempo mínimo ( $t_{min}$ ), esto se hace despejando el tiempo de la ecuación 2, obteniendo la ecuación [3]

$$t_x = \frac{X}{V_x} \quad t_y = \frac{Y}{V_y} \quad [3]$$

Ecuación 3: Tiempo de desplazamiento

$V_x$  y  $V_y$  deben ser iguales, para lo cual se utiliza la velocidad máxima a la que se puede mover el motor, esto es cuando está alimentado a 5V. X y Y son el setpoint o posición deseada.

Una vez calculado este tiempo se debe encontrar la nueva velocidad a la que se moverá cada motor, volviendo nuevamente a la ecuación [2] y despejando velocidad se obtiene la ecuación [4]:

$$V_{xn} = \frac{X}{t_{min}} \quad V_{yn} = \frac{Y}{t_{min}} \quad [4]$$

Ecuación 4: Nueva Velocidad

Donde  $V_{xn}$  y  $V_{yn}$  Son las nuevas velocidades halladas, teniendo en cuenta que el tiempo debe ser el tiempo mínimo hallado anteriormente.

Como paso final se halla un equivalente de voltaje para cada una de las velocidades encontradas ( $V_{xn}, V_{yn}$ ), donde a mayor voltaje mayor velocidad. El cálculo se hace mediante una regla de tres, donde la velocidad máxima equivale al voltaje máximo aplicado al motor (5V), como se muestra en la ecuación [5].

$$\begin{aligned} \text{Voltaje Eq. X} &= \frac{(V_x * \text{Voltaje Max})}{\text{Vel Max}} \\ \text{Voltaje Eq. Y} &= \frac{(V_y * \text{Voltaje Max})}{\text{Vel Max}} \end{aligned} \quad [5]$$

Ecuación 5: Voltaje Equivalente

Este voltaje equivalente es el enviado a la tarjeta de adquisición de datos para el control de los drivers de los motores.

### 3.2.4 Sensores final de carrera

Estos fueron agregados para tener mayor seguridad en los desplazamientos de la mesa, poder determinar el inicio o Posición Home y proteger la mesa en caso de presentarse algún problema en la rutina.

- **Sensor de la Posición Home**

Consisten en dos final de carrera, utilizados para ubicar la posición inicial en la cual se deben posicionar los motores de los ejes X y Y al iniciar el funcionamiento de la mesa. La rutina para posicionarse en el Home se muestra en la figura 29.

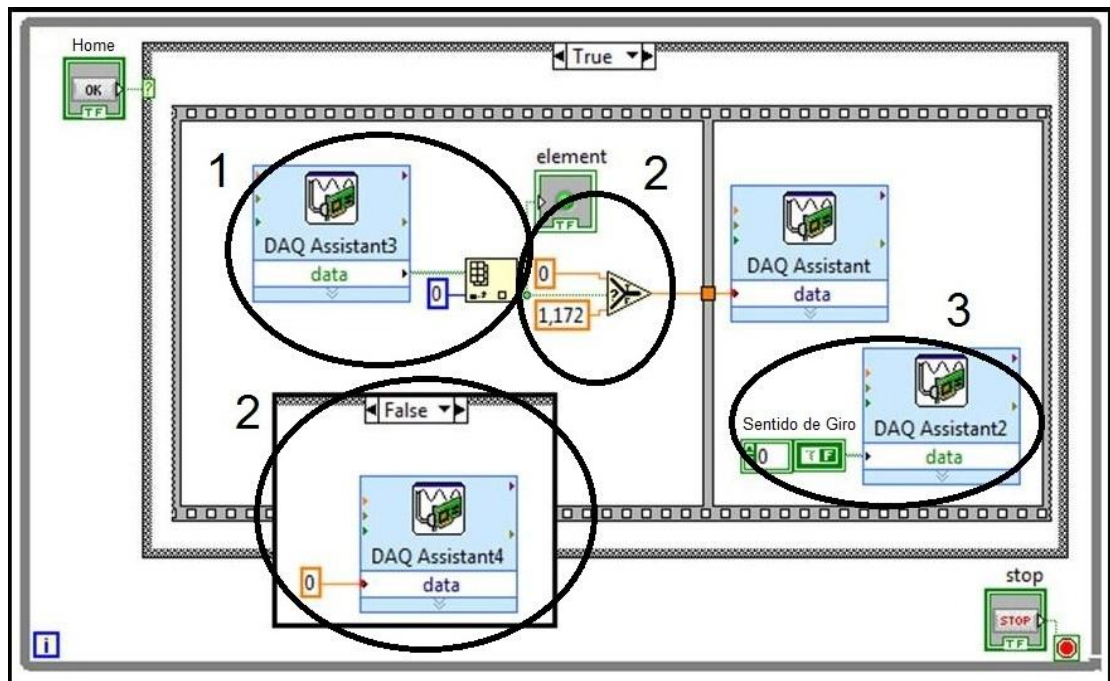


Figura 29: Rutina Home [1]

1. Al pulsar el botón de Home se activa la estructura de case, esta toma a través del Módulo DAQ assistant, configurado como una entrada digital, la señal del final de carrera, esta tendrá un valor lógico bajo si la mesa no esta posicionada el su origen.
2. Si la mesa no se encuentra en la posición Home debe de aplicarse un voltaje hasta que se llegue a la posición deseada. En caso de recibir una señal lógica alta, como se observa en la parte inferior de la

imagen, el voltaje de salida tiene un valor de 0 V, ya que se entiende que esta en posición de Home.

3. En esta parte se observa como se determina el sentido de giro del motor, el cual siempre será el mismo, ya que este debe moverse en una sola dirección para llegar a la posición Home.

El botón de la posición Home debe ser presionado cada vez que se desee que los ejes coordenados se ubiquen en la posición de inicio, esta también será tomada cada vez que la mesa empiece su rutina.

- **Sensor de seguridad**

Consiste en dos final de carrera ubicados al final de cada uno de los recorridos (X y Y), con el fin de prevenir un daño en la estructura mecánica de la mesa en el caso de ocurrir algún error en la rutina; al ser pulsados cualquiera de estos sensores se debe asumir que existe un fallo en el sistema y debe reiniciarse el proceso, por cual es necesario el regreso a Home de cada uno de los ejes, esto lo realiza de forma automática.

#### 4. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan una serie de pruebas realizadas al prototipo, así como los resultados obtenidos en trayectorias de un único punto y multipunto.

##### **Prueba 1: Posición y Error en trayectorias de un solo punto.**

Para esta prueba se asignó una posición dada por el par coordenado (28.1cm, 13.8cm) que sirvió de setpoint para los motores de la mesa.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 30 y 31, donde se observa como la posición de cada eje varía desde HOME, hasta la posición indicada por el setpoint. El error disminuye exponencialmente, hasta un valor aproximado de 1mm, una vez los ejes se han posicionado. Este comportamiento asegura la estabilidad asintótica del sistema.

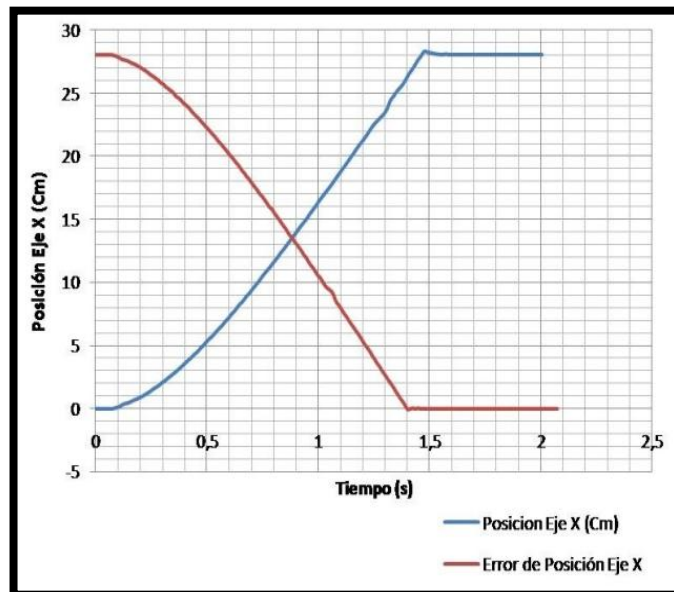


Figura 30: Posición Eje X Vs. Tiempo



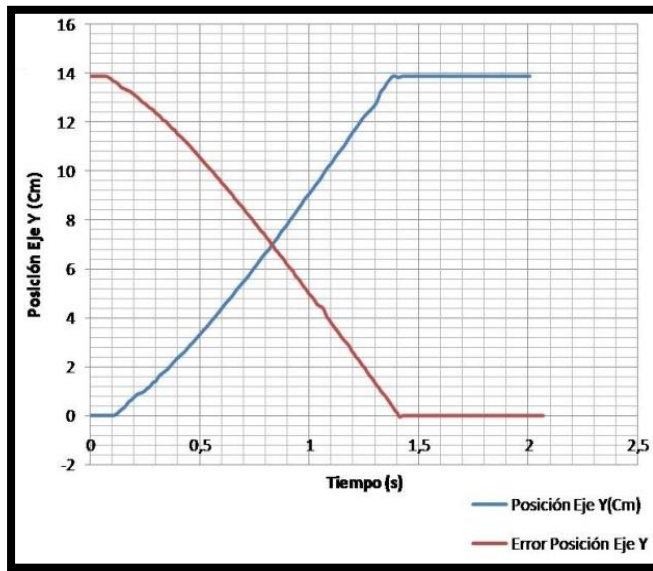


Figura 31: Posición Eje Y Vs. Tiempo

En las graficas se puede observar también como el tiempo de establecimiento para los dos ejes es el mismo, esto nos indica que el planificador de trayectorias funciona correctamente.

En la figura 32 se observa la trayectoria descrita por la herramienta, como esta es lineal, ya que se logra el posicionamiento simultáneo de los dos ejes, sin importar que los valores de setpoint sean diferentes.

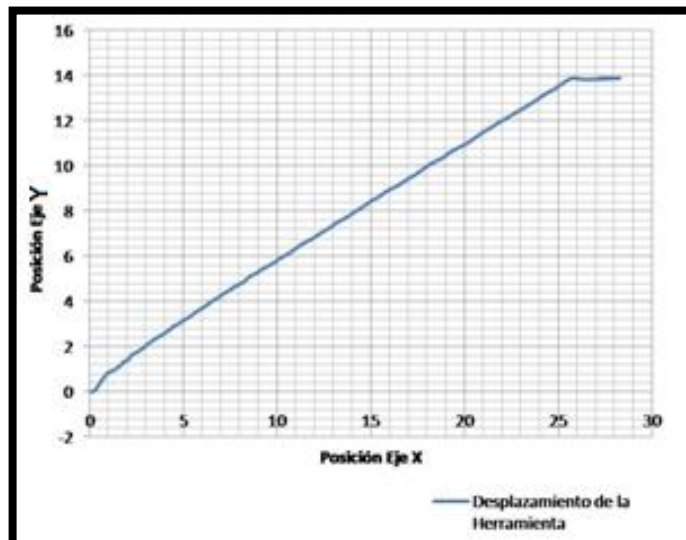


Figura 32: Trayectoria Recorrida

**Prueba 2: Velocidad para trayectorias de un único punto, con SetPoint iguales y diferentes.**

Esta prueba se divide en dos partes, para la primera se asignó una posición dada por el par coordenado (28.1cm, 28.1cm) que sirvió de setpoint.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 33 y 34, donde se observa como la velocidad de cada eje aumenta suavemente hasta alcanzar la indicada por el planificador de trayectorias. Esto garantiza el buen funcionamiento de los motores.

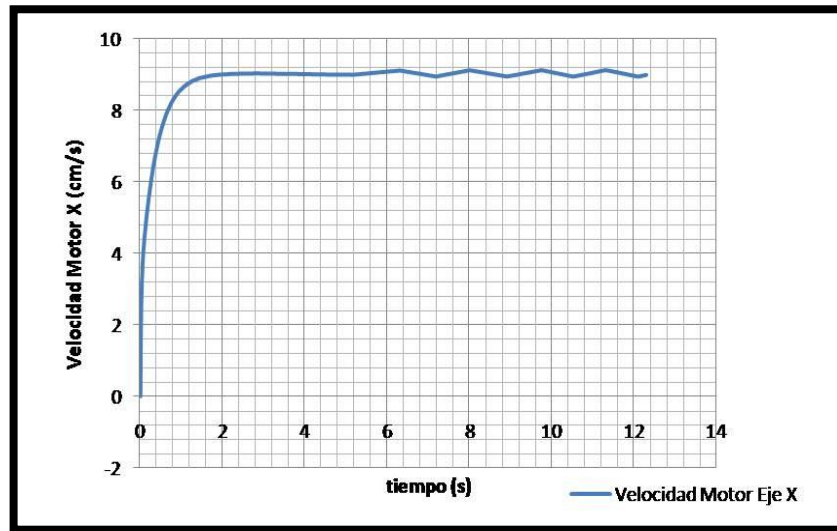


Figura 33: Velocidad Motor Eje X

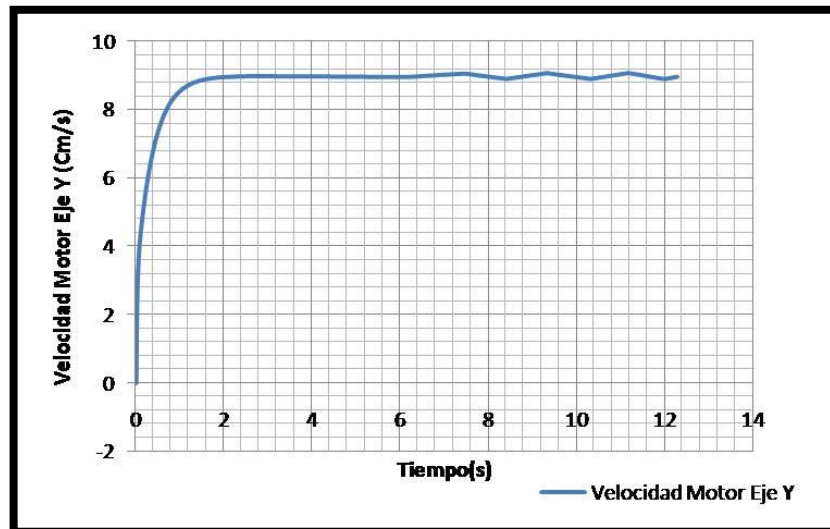


Figura 34: Velocidad Motor Eje Y

Como se puede observar la velocidad alcanza un valor de aproximadamente 9Cm/s, este es el mismo para los dos motores puesto que el setpoint es igual para ambos.

En la segunda parte de la prueba se tomaron los valores de (28.1cm, 13.8cm) como setpoint para los motores de los ejes X y Y respectivamente, estos posteriormente fueron invertidos con el fin de observar el comportamiento de las velocidades determinadas por el planificador de trayectorias.

Los resultados de esta prueba se muestran en las figuras 35 y 36.

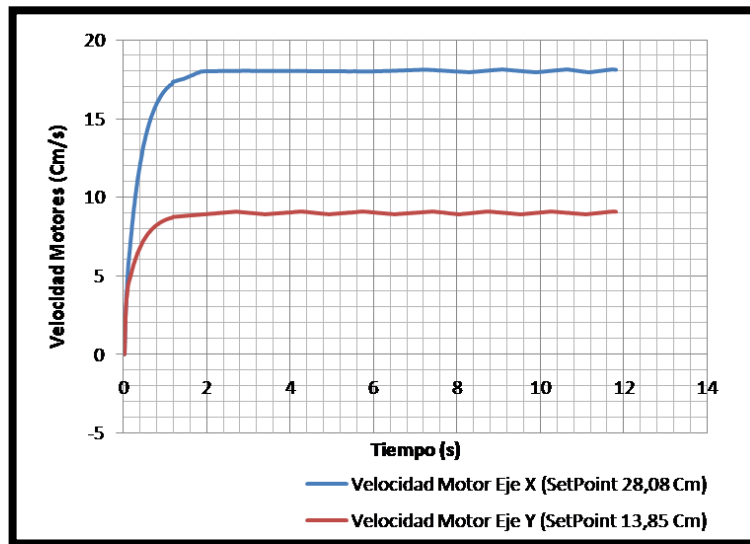


Figura 35: Velocidades Motores X y Y

Como se puede observar la velocidad del motor Y es de 9Cm/s, mientras que la velocidad del motor del eje X llega a ser de 18Cm/s, dado que la distancia a recorrer en ese eje es el doble. De igual forma se observa el incremento en la velocidad desde 0Cm/s hasta la indicada por el planificador.

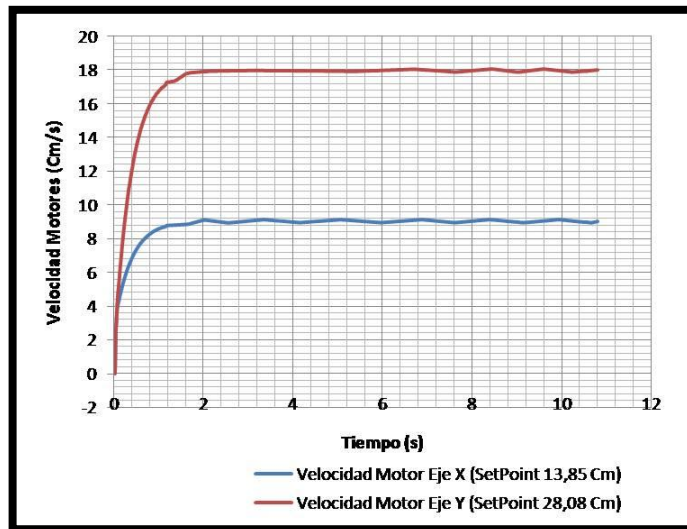


Figura 36: Velocidades Motores X y Y (SetPoint Invertidos)

En este caso se observa como los valores de las velocidades se han invertido para cada eje, al invertirse el valor del SetPoint. Esto demuestra el correcto funcionamiento del planificador de trayectorias, así como del controlador de velocidad, el cual logra que la velocidad se incremente suavemente hasta el valor deseado.

**Prueba 3: Posición, Error y Velocidad en trayectorias multipunto.**

Para esta prueba es escogieron tres posiciones, dadas por los pares coordenados (28.1cm, 28.1cm), (21.1cm, 13.8cm) y (13.8cm, 21.1cm).

En la figura 37 se puede observar el desplazamiento llevado a cabo por al herramienta en cada uno de los ejes. Nótese que a pesar de ser recorridas distancias diferentes el tiempo total de ejecución de la rutina es el mismo.

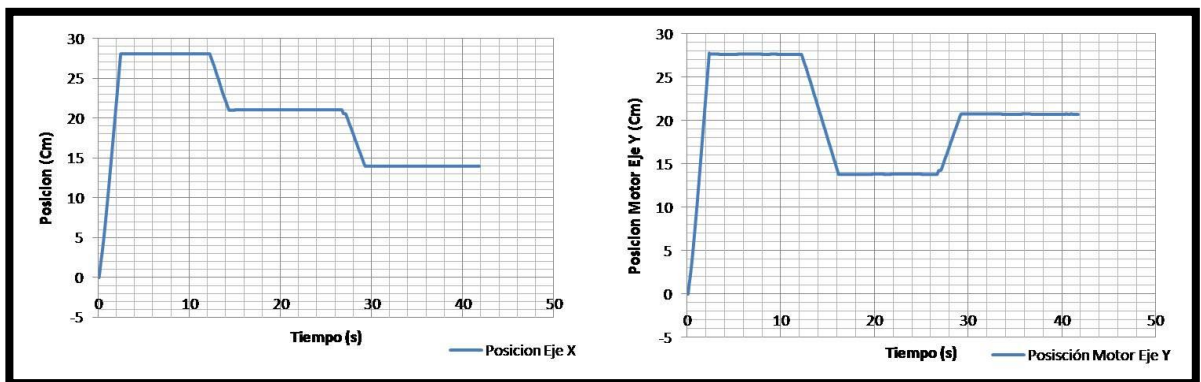


Figura 37: Posicionamiento Trayectoria Multipunto

En la Figura 38 se pueden observar como disminuyen los errores al posicionarse la mesa en cada una de las coordenadas dadas.

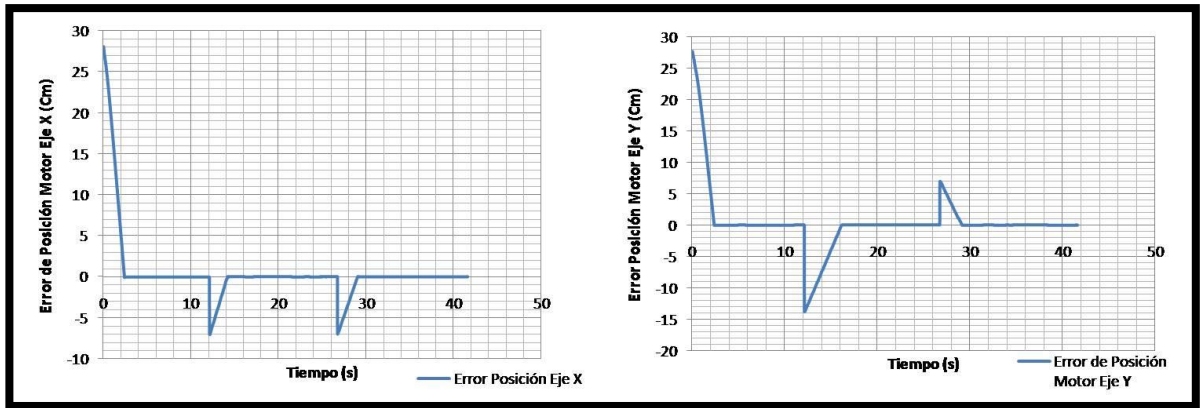


Figura 38: Error de Posición Trayectoria Multipunto

Los errores negativos se presentan cuando el motor recibe la orden de retroceder en su desplazamiento, puesto que el valor de la posición actual es mayor que el de la nueva posición, resultando una resta de valor negativo, esto es lo que indica el cambio de giro del motor.

En la figura 39 se presentan las velocidades de desplazamiento, como se puede ver en la primera parte las velocidades son iguales, ya que los setpoint son las mismas. Al tener setpoint diferentes las velocidades cambian, según lo determinado por el planificador de trayectorias, con el fin de asegurar que el desplazamiento de la herramienta sea lineal en todo momento.

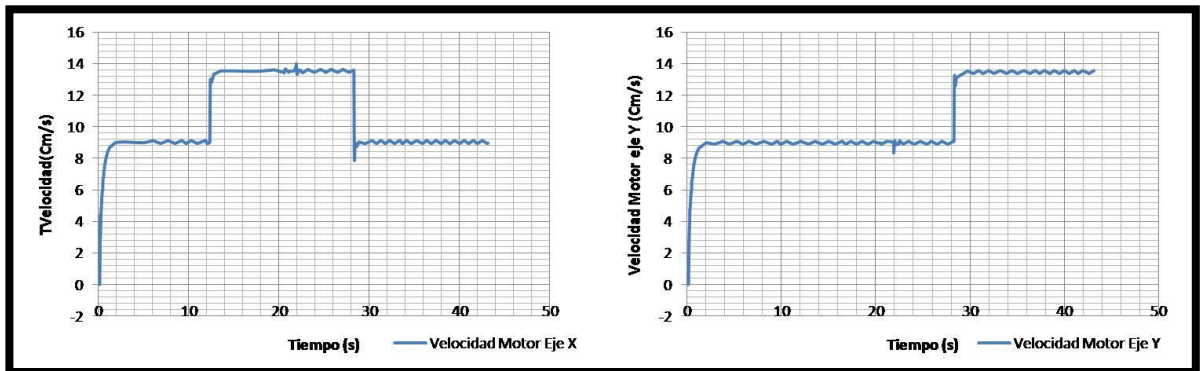


Figura 39: Velocidades En trayectoria Multipunto

Por último en la figura 40 se muestra el recorrido de la herramienta en esta trayectoria, como se observa el desplazamiento es lineal entre cada uno de los setpoints escogidos; lo cual indica que el funcionamiento del prototipo esta funcionando correctamente y que el controlador y el planificador de trayectorias están llevando a cabo la tarea para la que fueron diseñados.

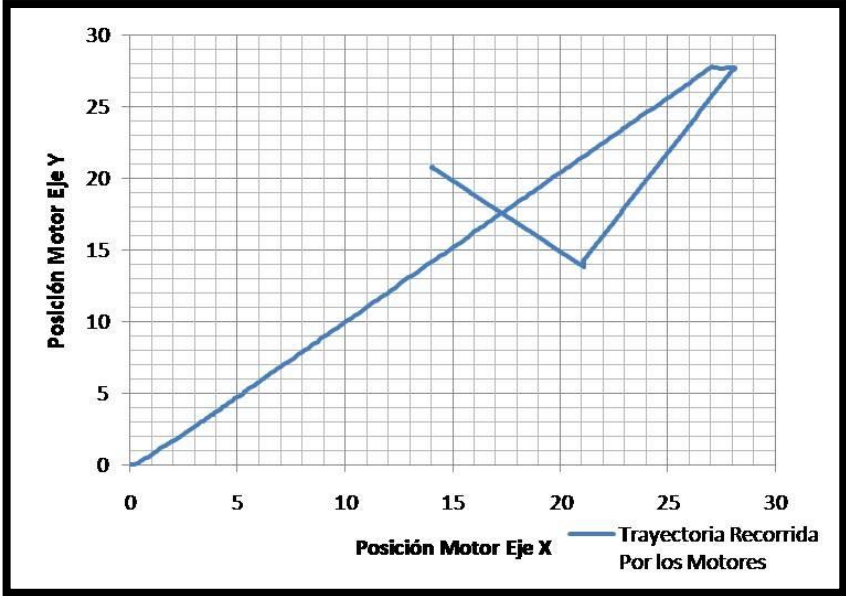


Figura 40: Trayectoria Recorrido Multipunto

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se diseñó un control en lazo cerrado para el manejo de una mesa posicionadora, logrando que el prototipo se encuentre a la altura de cualquier máquina comercial, ya que cumple con las características de precisión, velocidad de operación y flexibilidad de programación que se requiere para llevar a cabo procesos industriales de manera confiable, superando estándares comerciales.
- Se diseñó e implementó un driver para el funcionamiento de los motores paso a paso de la mesa posicionadora, logrando que el desempeño sea confiable y de fácil control.
- Se logró acoplar la salida de la tarjeta de adquisición de datos al driver de los motores por medio de un circuito acondicionador de señal, conformado por un VCO.
- Se logró que los lazos de control desarrollados para el posicionamiento de la herramienta se sincronizaran mediante el planificador de trayectorias, haciendo que el rendimiento de la máquina aumente significativamente.
- Este proyecto es un importante avance para el desarrollo del sector industrial de la región, ya que permite automatizar procesos manteniendo la calidad de producción e invirtiendo en tecnología nacional.
- Este prototipo deja las puertas abiertas al desarrollo de maquinaria para la industria utilizando como modelo el software desarrollado.
- El driver desarrollado, así como el controlador son estructuras funcionales, que pueden ser aplicadas a diferentes tipos de mesas posicionadoras de tipo industrial.
- Para aplicaciones futuras se plantea la utilización de servomotores, los cuales traería mayor velocidad de operación, precisión y permitiría el desarrollo de nuevas estrategias control.

## BIBLIOGRAFÍA

**[1]** Coll Martha y Jerez Carlos. Control en lazo cerrado de una mesa posicionadora de tres grados de libertad utilizando Labview. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de ingeniería Electrónica. 2011.

**[2]** Aguillón Gustavo y Mendoza Poveda. Rediseño y optimización del sistema de posicionamiento bidimensional aplicado a la perforación de circuitos impresos. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de ingeniería Electrónica. 2009.

**[3]** Máquina CNC Taladradora  
<http://metrologos.wikispaces.com/CONTROL+NUMERICO>  
[Con acceso 12/10/2010 1:20 Pm]

**[4]** Torno Control Numérico  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/MoriSeikiLathe.jpg>  
[Con acceso 10/10/2010 2:00PM]

**[5]** Máquina CNC Taladradora  
[http://www.maquinariamadrid.com/f\\_taladros\\_fresadores\\_51.html](http://www.maquinariamadrid.com/f_taladros_fresadores_51.html)  
[Con acceso 10/10/2010 9:30 AM]

**[6]** Máquina CNC de Fresado  
<http://maquinascontrolnumerico.blogspot.com/>. [Con acceso 10/10/2010 3:00 PM]

**[7]** Calle C., Alfredo P. (2008). Diseño e implementación de un equipo para la perforación de circuitos impresos por medio de control numérico, Universidad Técnica de Loja, Ecuador

**[8]** Muñoz C., Miguel (2010) Prototipo Electromecánico para dibujar circuitos impresos sobre una placa de cobre, Universidad Tecnológica de la Mixteca.

**[9]** Motores Paso a Paso  
<http://jmdiezm.iespana.es/documentos/motorelectric/motorespap.pdf>  
[Con acceso el 2-10-2010, 11:30am]

**[10]** National Instruments  
[www.ni.com/pdf/manuals/371303e.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/371303e.pdf) [con acceso el 10-04-2010, 3:30pm]



**[11]** Driver Unipolar de 4 A.

<http://www.esteca55.com.ar/proye-dvu4a.html> [con acceso el 25-11-2010, 9:00am]

**[12]** Controlador para motor Paso a Paso

<http://www.roboticajoven.mendoza.edu.ar/docu/stepper.pdf>

[con acceso el 2-12-2010, 10:00am]

**[13]** Esquema Motor PAP

<http://www.forosdeelectronica.com/f16/motores-paso-paso-unipolares-bipolares-tutorial-13284/> [con acceso el 15-11-2010, 6:50 PM]

**[14]** Secuencia Motor PAP

<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>

[con acceso el 15-12-2010, 6:50 PM]

**[15]** Sensor Final de Carrera

<http://www.electronicaembajadores.com/conmutadores/carrera.html>

[Con acceso 7-1-2011, 4:20 PM]

**[16]** Sensor Final de Carrera

<http://sensoresdeproximidad.galeon.com/> [Con acceso el 6-1-2011, 9:37AM]

**[17]** Encoder Incremental. Descripción General

<http://bc.inter.edu/facultad/arincon/encoderIncrementales.pdf>.

[Con acceso el 7-1-2011, 6:00 PM]

**[18]** Encoder Incremental.

<http://sharp->

[world.com/products/device/lineup/selection/photointr/html/GP1A30RJ000F.html](http://world.com/products/device/lineup/selection/photointr/html/GP1A30RJ000F.html).

[Con acceso el 8-1-2011, 5:00 PM]