



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de Ingeniería.

### **Reconversión y control en los ejes de una máquina RX-4A basado en FPGA**

TESIS

Que para obtener el título de:

**Ingeniero electromecánico**  
(Especialidad en Mecatrónica)

Presenta:

**Juan José González Cruz**

Dirigido por:

**Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos.**  
**Dr. Luis Morales Velázquez**

San Juan del Río, Querétaro. Octubre del 2011

## **DEDICATORIA**

**A mis padres y hermana  
por su apoyo y cariño.**

## **AGRADECIMENTOS**

A mis padres por todo su apoyo, comprensión y confianza me han dado, que me motiva a lograr mis metas y llegar más lejos.

Al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos por su disposición constante para ayudarme y aconsejarme durante el desarrollo y documentación de la tesis.

Al Dr. Luis Morales Velázquez por haberme guiado en el desarrollo de este trabajo y por siempre estar dispuesto a ayudarme.

A mis amigos y compañeros de Licenciatura y Posgrado con quienes pase gratos momentos durante estos cuatro años.

# Índice General

<b>Dedicatoria</b> .....	<b>i</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Índice General</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>viii</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivos General .....	4
1.2.2 Objetivos Particulares .....	5
1.3 Justificación .....	5
1.4 Planteamiento general.....	6
<b>2 Revisión de Literatura</b> .....	<b>8</b>
2.1 Estado del arte.....	8
2.2 Servoamplificadores .....	8
2.2.1 Servoamplificador de motores con escobillas .....	9
2.2.2 Servoamplificador de motores sin escobillas .....	9
2.3 Servomotores.....	10
2.4 Identificación.....	11
2.5 Controladores .....	14
2.5.1 Controladores clásicos .....	14
2.5.2 Controladores digitales .....	18
2.5.3 Controlador comercial .....	20
2.6 Perfiles de movimiento .....	20
2.6.1 Perfiles convencionales.....	20

2.6.2	Perfiles polinomiales.....	21
2.6.3	Perfil polinomial de sexto grado en posición.....	22
2.7	Sensores .....	25
2.7.1	Encoder .....	26
2.8	Máquinas de montaje de componentes de chip.....	29
<b>3</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>31</b>
3.1	Levantamiento de la zona que se reconvertirá y controlará de la máquina RX-4A .....	32
3.2	Reconversión electromecánica.....	33
3.2.1	Etapa eléctrica.....	34
3.2.2	Etapa mecánica.....	37
3.3	Interfaz de usuario .....	41
3.4	Casos de estudio .....	43
3.4.1	Caso de estudio 1: Parámetros de respuesta.....	43
3.4.2	Caso de estudio 2: Repetitividad .....	43
3.4.3	Caso de estudio 3: Dinámica de movimiento.....	44
3.4.4	Caso de estudio 4: Movimiento de ejes para simulación de ensamble de componentes de tarjeta. ....	46
3.5	Control .....	47
3.5.1	Controlador comercial .....	47
3.5.2	Controlador de posición propio basado en FPGA.....	49
<b>4</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>52</b>
4.1	Resultados de caso de estudio 1.....	52
4.2	Resultados de caso de estudio 2.....	54
4.3	Resultados de Caso de estudio 3 .....	55
4.4	Resultados de caso de estudio 4 .....	57
<b>5</b>	<b>Conclusiones y prospectivas.....</b>	<b>60</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>62</b>

<b>A. Actuadores y reductores</b> .....	<b>64</b>
A.1 Motor Copley Control Mod: SSC 23SMDC-LCSS .....	64
A.2 Reductor de engrane planetario Carson para Motor de eje Y.....	66
A.3 Motor Maxon DC 2260.885-73.216-200 .....	67
A.4 Reductor de engrane planetario Maxon para Motor de eje X.....	68
<b>B. Tarjetas del controlador</b> .....	<b>69</b>
B.1 UPDSH.....	69
B.2 DAS1612 .....	73

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Diagrama general del proyecto .....	7
Figura 2.1. Esquema de control de servoamplificador de motores con escobillas. ....	9
Figura 2.2 Sistema de control de motor sin escobillas.....	10
Figura 2.3. Sistema de control en lazo cerrado.....	14
Figura 2.4. Dinámica de movimiento para un perfil trapezoidal en velocidad. ....	21
Figura 2.5. Dinámica de movimiento para un perfil polinomial de movimiento .....	22
Figura 2.6. Perfil polinomial de sexto grado en posición .....	23
Figura 2.7 Principio de funcionamiento de los codificadores incrementales angulares .....	26
Figura 2.8 Señales obtenidas de un encoder incremental .....	27
Figura 2.9 Principio de funcionamiento de codificadores absolutos .....	29
Figura 3.1. Diagrama general del desarrollo del proyecto .....	32
Figura 3.2 Máquina RX-4A sin modificaciones.....	33
Figura 3.3 Sistema de control para cada eje de la máquina RX-4A.....	33
Figura 3.4 Sistema eléctrico de control.....	34
Figura 3.5. Servoamplificador Copley Control Mod. 403 .....	36
Figura 3.6. Tarjeta opto-acopladora.....	36
Figura 3.7. Diagrama de conexión de sistema eléctrico de control para cada eje. ....	37
Figura 3.8. Pieza diseñada y manufacturada para instalación del motor del eje Y .....	38
Figura 3.9. Pieza diseñada y manufacturada para instalación del motor del eje X .....	38
Figura 3.10. Pieza diseñada para el ensamble del reductor con el motor del eje Y.....	39
Figura 3.11. Montaje del motor SSC 23SMDC-LCSS en el eje Y.....	39
Figura 3.12. Montaje del motor Maxon 2260.885-73.216-200 en el eje X. ....	40
Figura 3.13. Instalación de elementos del sistema eléctrico de control. ....	40
Figura 3.14. Interfaz de usuario para controlador propio.....	41
Figura 3.15. Caso de estudio 1 .....	43
Figura 3.16. Caso de estudio 2 .....	44
Figura 3.17. Dinámica de movimiento teórica diseñada para controlador Galil.....	45
Figura 3.18. Dinámica de movimiento teórica diseñada para controlador Propio .....	45

Figura 3.19. PCB de tarjeta optoacopladora.....	46
Figura 3.20. Trayectoria de prueba del caso de estudio 4.....	47
Figura 3.21. Software Servo Design Kit .....	48
Figura 3.22. Esquema de sistema de control de posición con controlador Galil.....	49
Figura 3.23. Esquema de controlador de posición propio.....	50
Figura 4.1 a) 40 cuentas Galil eje “X”, b) 40 cuentas Galil eje “Y”. .....	53
Figura 4.2 a) 40 cuentas eje “X”, b) 40 cuentas eje “Y”.....	54
Figura 4.3 a) 30 cuentas Galil eje “Y”, b) 30 cuentas FPGA eje “Y”, c) 30 cuentas Galil eje “X”, d) 30 cuentas FPGA eje “X”. .....	55
Figura 4.4. Dinámica de movimiento obtenida con controlador Galil DMC-1832.....	56
Figura 4.5. Dinámica de movimiento obtenida con controlador propio basado en FPGA. ..	56
Figura 4.6. Prueba de caso de estudio 4 con controlador Galil DMC-1832. ....	58
Figura 4.7. Prueba de caso de estudio 4 con controlador propio basado en FPGA.....	58
Figura 4.8. Gráfica del error en el seguimiento de la trayectoria con controlador Galil. ....	59
Figura 4.9. Gráfica del error en el seguimiento de la trayectoria con controlador Propio....	59

## Índice de Tablas

Tabla 3-1. Motores seleccionados. ....	35
--	----

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad para que una empresa mantenga su lugar dentro de la competencia global necesita de una constante mejora en su productividad, acortando los tiempos de producción, disminuyendo el costo y mejorando la calidad del producto, para lo cual se necesitan grandes inversiones para mejorar las líneas de producción. Esta situación puede no ser un problema para las grandes empresas ya que cuentan con los recursos suficientes, sin embargo lo es para las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), las cuales no cuentan con los medios económicos para la renovación de maquinaria y en muchos casos su maquinaria es obsoleta para la fabricación de sus productos, siendo imposible el competir con las empresas extranjeras.

En este trabajo se realizará la primera etapa de la automatización de una máquina de montaje de componente de chip obsoleta, desarrollando el control de movimiento de sus ejes basado en un sistema de arquitectura abierta implementado en un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA, Field Programmable Gate Array) lo que permitirá la reprogramabilidad del mismo para incorporar nuevos módulos para su total automatización en trabajos futuros.

El contenido de este trabajo se divide en 5 capítulos. En el capítulo I titulado Introducción, se abordan los antecedentes que dieron lugar a este trabajo, objetivos a alcanzar, justificación del proyecto y un panorama general que muestra de manera resumida el desarrollo del mismo. En el capítulo 2 titulado Revisión de literatura se desarrolla una recopilación de información de diversas publicaciones necesaria para la ejecución del proyecto siendo herramientas útiles para la comprensión y elaboración del mismo. En el capítulo 3 se describe detalladamente la metodología mediante la cual se llevo a cabo el proceso para el desarrollo del trabajo. En el capítulo 4 llamado “Pruebas y Resultados” se presentan las pruebas a las que fue sometido el sistema automatizado y se realiza un análisis de los resultados obtenidos, en el capítulo 5 de Conclusiones se mencionan los logros alcanzados con el trabajo y por último se adiciona una sección de referencias.

## 1.1 Antecedentes

El constante desarrollo tecnológico existente trae consigo el problema de la obsolescencia de maquinaria. Esto tiene como consecuencia que se requiera el desarrollo de sistemas más eficientes a los adquiridos en un tiempo determinado y la necesidad en las empresas de realizar una renovación de maquinaria para poder ser competitivos dentro de su área de producción. Este problema afecta principalmente a las pequeñas y medianas empresas (PYMES), quienes no cuentan con grandes recursos para invertir en nueva maquinaria, optando la mayoría de veces por la automatización y reconversión de su maquinaria convencional para conseguir un mayor desempeño con poca inversión.

La reconversión puede consistir tanto en el cambio de componentes mecánicos, como en la actualización de los sistemas de control, siendo el último el más empleado, ya que existe un mayor desarrollo tecnológico en el área de control que en cuanto a la parte mecánica. Para la actualización del sistema de control, las empresas adquieren e instalan controladores comerciales, los cuales tienen elevados precios y generalmente son de arquitectura cerrada, es decir, solo muestran el controlador como una caja negra que realiza cierta acción de control. Mientras que los controladores de arquitectura abierta hacen posible la realización de sistemas de manufactura modulares y reconfigurables.

En la Universidad Autónoma de Querétaro se han realizado diferentes trabajos relacionados con la automatización de maquinaria, así como de desarrollo de tarjetas de control de posición. Castellanos (2001) diseñó y construyó una tarjeta de control de arquitectura abierta programada en lenguaje C, en ella utilizó un procesador de señales digitales (DSP, Digital Signal Processor) teniendo como objetivo proveer una opción económica y modular a las empresas para automatizar sus máquinas convencionales. Otro caso es el trabajo de Alanís (2003) quien instrumentó y controló una máquina herramienta de dos ejes (torno) buscando una solución para modernización de máquinas herramienta, teniendo como plataforma base una computadora personal utilizando arquitectura abierta, siendo importante mencionar que la tarjeta de la botonera tuvo como base un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA, Field Programmable Gate Array).

También está el trabajo de Ríos (2005) quien construyó una tarjeta controladora de servomotores utilizando una computadora personal (PC, Personal Computer) implementando un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) en lenguaje C++ y utilizó una interfaz ISA para comunicarse con la tarjeta, la tarjeta utilizaba un dispositivo lógico programable complejo (CPLD, Complex Programmable Logic Device) para la lectura del encoder, la decodificación a través del bus ISA y el manejador para el convertidor digital analógico (DAC, Digital-Analog-Converter); esto teniendo como objetivo un primer paso hacia un controlador de movimiento que permitiera una disminución de costo en relación con las tarjetas comerciales.

Todos estos trabajos se realizaron con la intención de ofrecer una alternativa a las empresas para la automatización y reconversión de maquinaria a un costo menor que el de los controladores comerciales. Desafortunadamente el introducir una PC al ambiente industrial presenta limitaciones importantes, aparte de la robustez de la misma están los problemas relacionados con el sistema operativo el que por lo regular no opera en tiempo real y el manejo de múltiples tareas, al igual que se tiene problema con la seguridad ya que no se tiene la certeza del que el sistema no fallará por alguna colisión de datos.

Por otro lado en la Universidad Autónoma de Querétaro se han tenido desarrollos que por su innovación tienen alcance internacional tal es el caso de Osornio (2004) quien realizó la implementación de una tarjeta de control de movimiento para tres servomotores sustituyendo los algoritmos de control que generalmente son desarrollados en base a un procesador digital de señales (DSP), implementándose ahora en un FPGA. El controlador tiene su base teórica en un módulo PID. Por otro lado Morales (2007) desarrolló una unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas, implementada en un FPGA; su objetivo fue generar los módulos de hardware y software en tecnología de bajo costo de arquitectura abierta para apoyar el uso de máquinas CNC. Como resultado obtuvo la integración robusta y flexible de la interfaz USB, el regulador PID y el generador de perfiles integrados en un FPGA. Morales (2010) desarrolló una plataforma de hardware y software basada en FPGA para aplicaciones industriales. Debido a la importancia en la dinámica del movimiento, han sido propuestas

diferentes técnicas de generación de trayectorias enfocadas a mejorar la calidad de los acabados y reducción del tiempo de maquinado, Osornio et al. (2007) presentaron una metodología novedosa para la generación de perfiles de aceleración-desaceleración sobre la base de polinomios en el dominio de tiempo discreto destacando como principal aportación que dicho método fue computacionalmente eficiente y fácil de implementar en la mayoría de las tecnologías de sistemas digitales disponibles, demostrando que la propuesta de la parametrización de la generación de perfiles con base polinomial requiere la mitad de operaciones a ser calculadas, comparado con las metodologías para la evaluación polinomial directa disponibles en ese momento. Osornio et al. (2008) desarrollaron un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) basado en FPGA aplicado a una fresadora de alta velocidad para alcanzar los tiempos de actualización en el controlador del servosistema. Osornio et al. (2009) presentaron la implementación bajo FPGA de perfiles polinomiales de movimiento en el que se reportó control en los picos de jerk durante el proceso de maquinado. Rivera (2010) mejoró la dinámica de movimiento en máquinas-herramientas CNC mediante el eficiente control de las variables de velocidad, aceleración y jaloneo.

Con el desarrollo de tarjetas de control de movimiento propias de calidad se puede ofrecer la alternativa de reconversión de máquinas a las empresas, siendo esta una solución para lograr un mejor rendimiento con tecnología propietaria.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos General**

Reconvertir los ejes de una máquina de montaje de componentes RX-4A y aplicar un controlador basado en FPGA, para dar inicio con la generación de un sistema de arquitectura abierta enfocado al control de dicha máquina.

### **1.2.2 Objetivos Particulares**

- Reconvertir los ejes en la máquina de montaje de chip RX-4A, mediante la instalación de servomotores, servoamplificadores y los ajustes mecánicos necesarios para el control de éstos.
- Instalar un controlador comercial Galil para probar la funcionalidad de la reconversión electromecánica.
- Instalar y programar un controlador de posición propio basado en FPGA en los ejes de la máquina RX-4A para mejorar el desempeño de la máquina.
- Desarrollar una interfaz gráfica en C++ para el control de los ejes de la máquina RX-4A.
- Ejecutar pruebas funcionales para evaluar el desempeño del sistema mediante rutinas de posicionamiento en los ejes de la máquina (combinación de ejes).

### **1.3 Justificación**

Como se observa en los antecedentes existe la necesidad de proporcionar sistemas de control reconfigurables que permitan realizar una continua modernización industrial en maquinaria sin la necesidad de realizar altas inversiones en la compra de nueva maquinaria o adquisición de sistemas de control comerciales (seguramente de arquitectura cerrada), por lo que el desarrollo de tarjetas de control propias y módulos de control que permitan dar a las empresas la opción de reconversión para su maquinaria es una importante área de oportunidad.

En este trabajo se realizará la reconversión y control de los ejes de una máquina ensambladora de componentes electrónicos RX-4A considerada obsoleta, propiedad de la empresa Clarion, instalando un controlador de posición basado en FPGA desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual cuenta con la implementación de un filtro PID y un generador de un perfil polinomial de sexto grado en posición que permitirá tener control en la dinámica de movimiento de la máquina.

Además, ya que el controlador es de arquitectura abierta se tendrá como ventaja la reprogramabilidad, teniendo la opción de expandir el sistema para nuevos procesos que se presenten en un futuro, siendo esto fundamental para el trabajo que se realizará, ya que es solo la primera etapa para la automatización de la máquina, siendo necesaria la integración de nuevos módulos para su completa automatización. Otra ventaja importante del controlador es la portabilidad, ya que puede ser transportado a cualquier tecnología FPGA disponible y no está sujeto a un chip en específico. Una comparativa de desempeño contra un controlador comercial será realizada para validar el funcionamiento del sistema propuesto.

#### **1.4 Planteamiento general.**

El contar con un controlador de posición propio de calidad permite ofrecer soluciones a las empresas en cuanto a la automatización y reconversión de maquinaria, en este trabajo se realizará una reconversión en los ejes de una máquina ensambladora RX-4A, desarrollando el control de movimiento en sus ejes X,Y.

El desarrollo de este trabajo consta de varias etapas las cuales son: el levantamiento de la zona a reconvertir, una reconversión electromecánica que consiste principalmente en la instalación de nuevos actuadores (servomotores), servoamplificadores y ajustes mecánicos necesarios para habilitar el movimiento de los ejes, realizar pruebas de posicionamiento en los ejes de la máquina para evaluar el funcionamiento de la reconversión, primeramente instalando un controlador comercial en el sistema y obtener resultados, programar una interfaz gráfica que permita controlar los ejes de la máquina con el controlador propio, desarrollar pruebas con un controlador propio, obtener resultados y realizar una comparativa de desempeño con el controlador comercial para validar el sistema. En la figura 1.1 se muestra un diagrama del trabajo en forma general.

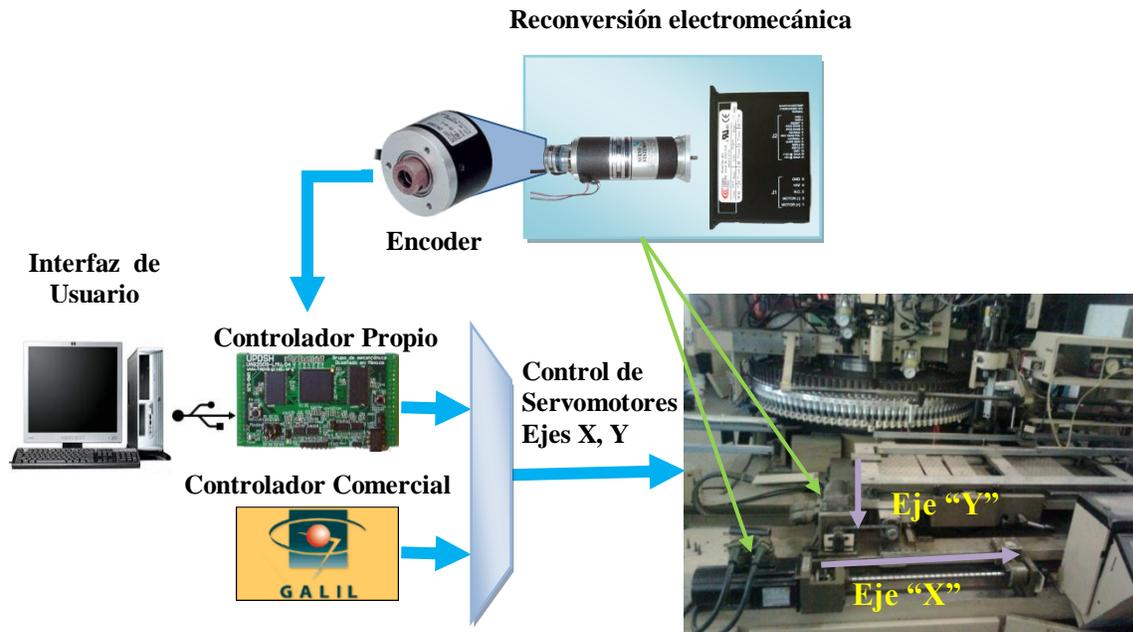


Figura 1.1. Diagrama general del proyecto

## **2 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Estado del arte.**

El desarrollo de la electrónica trajo consigo la producción a gran escala de circuitos impresos para la fabricación de aparatos eléctricos, para lo cual fue necesaria la invención de máquinas que dieran un tiempo de producción pequeño y gran precisión. Las primeras máquinas ensambladoras de tarjetas aparecieron en los años 50's. Hasta la fecha esta necesidad continúa siendo clave para la competición global que obliga a los fabricantes a tener una continua renovación de maquinaria al tiempo de los avances tecnológicos. Actualmente los módulos electrónicos que se ensamblan son de tamaño cada vez más pequeño lo que requiere un ensamble con gran precisión con mínimo de errores y en un tiempo corto.

### **2.2 Servoamplificadores**

Los servoamplificadores se utilizan ampliamente en los sistemas de control de movimiento donde un control preciso de la posición y/o velocidad se requiere. El amplificador básicamente traduce las señales de referencia de baja energía del controlador en señales de alta energía (voltaje del motor y corriente). Estas señales de referencia pueden ser de naturaleza analógica o digital. Una señal analógica de  $+/-10$  VDC es la más común. Esta señal puede representar un par motor o la velocidad de la demandada.

Para la selección de un servoamplificador primeramente se considera el tipo de alimentación del motor a utilizar CA o CD, en el caso de los motores de CD el tipo de motor con escobillas o sin escobillas. Se toman en cuenta el voltaje de alimentación y la corriente que consume el motor, los cuales deben estar dentro del rango de operación del servoamplificador.

Los amplificadores pueden ser configurados de diferentes formas afectando así su operación. El modo de operación más común es el de transconductancia o modo de corriente, donde la corriente de salida  $I$ , es directamente proporcional al voltaje de entrada

V. El factor proporcional  $K_a$ , es conocido como la ganancia del amplificador cuyas unidades son de amperio por voltio. La relación anterior se muestra en (2.1).

$$I = K_a V \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Servoamplificador de motores con escobillas

Estos servoamplificadores son diseñados para usarse con motores de DC con escobillas. La construcción de este tipo de servoamplificadores es básicamente un puente H para una fase como se muestra en la figura 2.1 Utilizando una señal PWM (Pulse Width Modulation) controla la corriente de salida variando el ciclo de trabajo de la salida de la etapa de potencia.

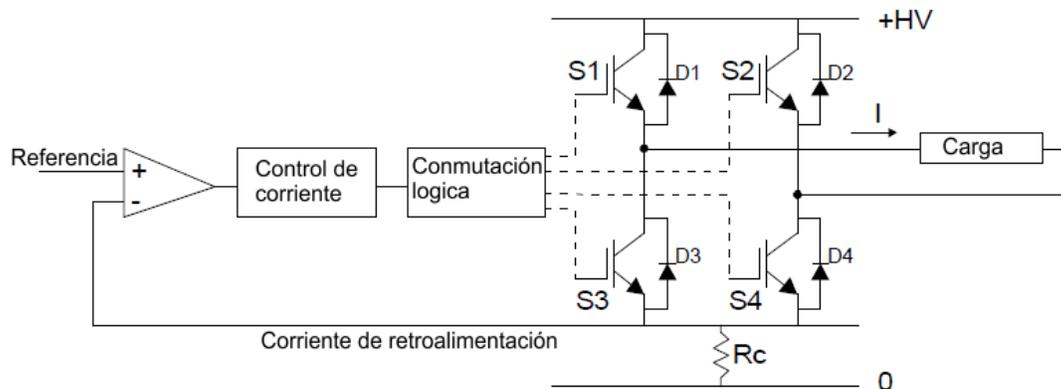


Figura 2.1. Esquema de control de servoamplificador de motores con escobillas.

### 2.2.2 Servoamplificador de motores sin escobillas

Estos servoamplificadores son diseñados para su uso con motores de DC sin escobillas, los cuales tienen tres devanados sobre el estator, por lo que se requiere una salida más que con los servoamplificadores de motores con escobillas. En la figura 2.2 se puede ver una configuración de un sistema típico servoamplificador y un motor sin escobillas.

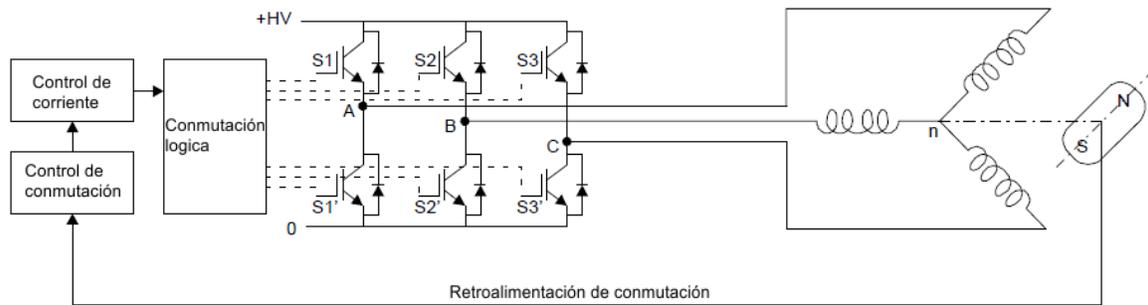


Figura 2.2 Sistema de control de motor sin escobillas

## 2.3 Servomotores

Un motor con un dispositivo de retroalimentación se le conoce como servomotor y por lo tanto es operado en un sistema de lazo cerrado. Los servomotores convencionales utilizan un motor de corriente directa y un sistema de engranajes reductores que brinda al motor mayor fuerza y baja inercia. Las características de los servomotores de DC son que carece de vibraciones, tienen rango de velocidad amplio y buen torque de baja velocidad. Para un funcionamiento óptimo, es obligatorio un buen controlador de motor con un algoritmo PID (Tapia, 2010).

Algunas características fundamentales de los servomotores son las siguientes:

- 1) El torque de salida del motor es más o menos proporcional a la tensión de control aplicada (provista por el amplificador como respuesta a la señal de error).
- 2) El sentido del torque es determinado por la polaridad (instantánea) de tensión de control.
- 3) Los servomotores por sus características son ideales para el control de posición y velocidad, se fabrican para corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), en el caso de CC existen con y sin carbones, de estos tres tipos los más económicos son los de CC con carbones, estos tienen la desventaja de requerir mantenimiento por el desgaste natural de los carbones.

Cuando una corriente  $I$  es aplicada al motor, esta genera un torque proporcional  $T_g$  con un factor proporcional  $K_t$  como se muestra en (2.2). La constante  $K_t$  es conocida como la constante de torque y sus unidades son unidad de torque por ampere.

$$T_g = K_t I \quad (2.2)$$

La generación de torque acelera el motor en un intervalo  $\alpha$  de acuerdo con la segunda ley de Newton. Si el momento total de inercia del motor y de la carga es  $J$  y además se define a  $T_f$  como la fricción opuesta, esto se muestra en (2.3).

$$J\alpha + T_f = T_g \quad (2.3)$$

La posición del motor es la segunda integral de la aceleración, esta relación es expresada por la función de transferencia mostrada en (2.4).

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{1}{s^2} \quad (2.4)$$

Combinando ahora las ecuaciones (2.2) a (2.4) para encontrar una función de transferencia, la cual relacione el efecto de la entrada de corriente  $I$  en la posición del motor  $\theta$ , ignorando el efecto de  $T_f$ , se obtiene la ecuación mostrada en (2.5).

$$\frac{\theta}{I} = \frac{K_t}{Js^2} \quad (2.5)$$

Para la selección de un motor se consideran los siguientes parámetros: torque máximo requerido, voltaje de alimentación, corriente máxima y velocidad.

## 2.4 Identificación

Para sintonizar el controlador adecuado para el sistema es necesario tener un modelo matemático que describa de la manera más aproximada la dinámica del sistema. Debido a

que en el comportamiento del sistema interfieren un número considerable de factores si se toman en consideración todos ellos se tiene como resultado una expresión bastante compleja, por lo que se deben tomar suposiciones que simplifiquen el modelo.

El término “identificación de procesos” es adoptado en la década de los sesentas en las áreas de ingeniería en sistemas y automatización, este término puede ser definido como el conjunto de estudios, teorías y algoritmos que permiten la obtención de la estructura y los parámetros de un modelo matemático generalmente dinámico, que reproduce con suficiente exactitud, para los fines deseados de control automático, las variables de salida del proceso o sistema real bajo estudio ante el mismo conjunto de variables de entrada (Aguado, 2000).

El método de mínimos cuadrados (MMC) es un algoritmo ampliamente utilizado en ingeniería para la identificación de procesos; como menciona Aguado (2000) las propiedades del MMC y sus variantes son de especial interés y simplicidad para el uso en sistemas de control. En general, el proceso de identificación se realiza en las etapas siguientes:

a) Recopilación de información experimental: A partir de la excitación del sistema a identificar mediante referencias de entrada determinadas, se obtiene la cuantificación de la salida correspondiente, obteniendo entonces vectores de datos tanto de entrada como de salida.

b) Identificación de la estructura: Partiendo de las relaciones físico-químicas del proceso a identificar y atendiendo a la salida del sistema observada en la recopilación de información experimental, se deduce la estructura del sistema a identificar (características de la función de transferencia a aproximar).

c) Identificación de los parámetros: Definida la estructura del sistema, se obtiene a través de diversas técnicas de aproximación, los valores de los parámetros del sistema.

d) Validación: Se realiza una comparación entre las respuestas del modelo obtenido y el real ante una o diferentes entradas, determinando de esta manera si la expresión propuesta puede representar al sistema en estudio (Aguado, 2000).

Para sistemas lineales es posible modelar cualquier planta como la función de transferencia (2.6) la cual se puede traducir a la ecuación en diferencias de (2.7)

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_n z^{-n}} \quad (2.6)$$

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^m b_j u(k-j) \quad (2.7)$$

Siguiendo el procedimiento de Aguado (2002) se define el vector de coeficientes P en (2.8). En (2.9) se define la matriz de entradas y salidas en la que se basa el método.

$$\hat{P} = (Z \cdot Z^T)^{-1} Z \cdot y^T = [b_0 a_1 b_1 \dots a_n b_n]^T \quad (2.8)$$

$$Z^T(K) = [u^T(k) \ y^T(k-1) \ u^T(k-1) \ \dots \ y^T(k-n) \ u^T(k-n)] \quad (2.9)$$

Donde

$\hat{P}$ : Coeficientes estimados

$u(k)$ : Vector de entradas  $k=0,1\dots N$

$y(k)$ : Vector de salidas  $k=0,1\dots N$

$a_i$ : Coeficientes del denominador  $i=1,2\dots n$

$b_j$ : Coeficientes del numerador  $j=1,2\dots m$

N: Tamaño del muestras

La solución de mínimos cuadrados está dada por (2.10) donde con solo las entradas y las salidas del sistema es posible estimar los parámetros que forman la función de transferencia de la planta.

$$\hat{P} = [Z^T(k)Z(k)]^{-1}[Z^T(k) + (k)] \quad (2.10)$$

## 2.5 Controladores

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control se denomina sistema en lazo cerrado. Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción correctora se denominan sistemas en lazo abierto (Ogata, 2006).

El controlador es el elemento encargado de procesar la señal de error y generar una señal encargada de disminuir el valor de dicha señal de error con el objetivo de lograr la máxima precisión posible del sistema de control, en la figura 2.3 se muestra un diagrama de un sistema de control de lazo cerrado donde se puede ver la ubicación del controlador. El procedimiento por medio del cual un controlador genera la señal de control se denomina acción de control.

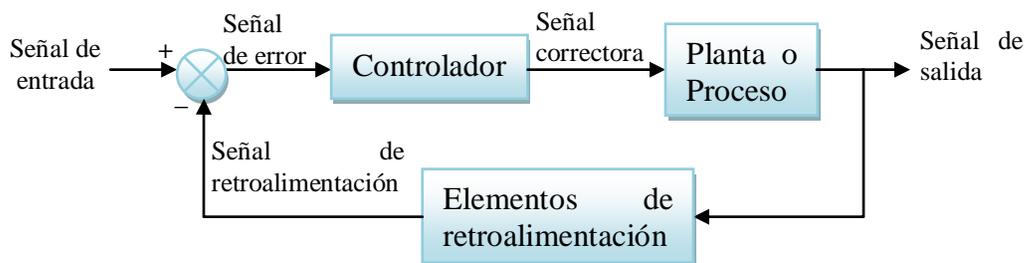


Figura 2.3. Sistema de control en lazo cerrado

### 2.5.1 Controladores clásicos

Los controladores pueden clasificarse de acuerdo a su acción de control como:

1. Controladores de dos posiciones o encendido-apagado
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales
4. Controladores proporcionales integrales
5. Controladores proporcionales derivativos
6. Controladores proporcionales integrales derivativos

### **2.5.1.1 Controlador de dos posiciones**

Este tipo de controladores tiene solo dos posibles salidas dependiendo del valor de su entrada el comportamiento del controlador se puede mostrar de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll} m(t)=M_1 & \text{para } e(t) > 0 \\ m(t)=M_2 & \text{para } e(t) < 0 \end{array}$$

Donde  $m(t)$  es la salida del controlador,  $e(t)$  es la señal de error actuante,  $M_1$  y  $M_2$  son constantes.

### **2.5.1.2 Controlador proporcional**

El controlador proporcional genera en su salida una señal de control que es proporcional a la señal de error. De este modo se tiene que su función de transferencia está determinada por (2.11).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \tag{2.11}$$

Donde  $U(s)$  es la salida del controlador,  $E(s)$  es la señal de error y  $Kp$  es la ganancia proporcional.

### 2.5.1.3 Controlador integral

La acción de control integral genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error, tiene como función de transferencia la indicada por (2.12).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s} \quad (2.12)$$

Donde  $U(s)$  es la salida del controlador,  $E(s)$  es la señal de error y  $Ki$  es la ganancia integral.

La característica más importante de este tipo de control es que la acción correctora se efectúa mediante la integral del error, ello permite decir que el control integral proporciona una señal de control que es función de la propia 'historia' de la señal de error, permitiendo obtener una señal de control diferente de cero aunque la señal de error sea cero (Spartacus, 2001).

### 2.5.1.4 Controlador proporcional integral

La acción de control proporcional integral (PI) genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción integral conjuntamente. Su función de transferencia se representa en (2.13).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s} + Kp \quad (2.13)$$

Donde  $U(s)$  es la salida del controlador,  $E(s)$  es la señal de error,  $Kp$  es la ganancia proporcional y  $Ki$  es la ganancia integral.

El control proporcional integral combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral; la acción integral elimina el error estacionario, mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que conlleva la introducción de la propia acción integral (Spartacus, 2001).

### 2.5.1.5 Controlador proporcional derivativo

La acción de control proporcional derivativa (PD) genera una señal que combinación de la acción proporcional y la acción derivativa conjuntamente. Su función de transferencia se representa en (2.14).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kds + Kp \quad (2.14)$$

Donde  $U(s)$  es la salida del controlador,  $E(s)$  es la señal de error,  $Kp$  es la ganancia proporcional y  $Kd$  es la ganancia derivativa.

El control proporcional derivativo proporciona al sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobreimpulso. Sin embargo, cuando la influencia del control es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta.

### 2.5.1.6 Controlador proporcional integral derivativo

La acción de control proporcional integral derivativa (PID) genera una señal resultado de la combinación de la acción proporcional, la acción integral y la derivativa conjuntamente siendo este el más utilizado para los problemas de control en la industria. En (2.15) se presenta la función de transferencia de este controlador.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{kds^2 + kps + ki}{s} \quad (2.15)$$

Donde  $U(s)$  es la salida del controlador,  $E(s)$  es la señal de error,  $Kp$  es la ganancia proporcional, y  $Ki$  es la ganancia integral y  $Kd$  es la ganancia derivativa.

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. La

mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y un valor de sobreimpulso máximo pequeños (Spartacus, 2001).

## **2.5.2 Controladores digitales**

En años recientes se ha incrementado el uso de controladores digitales en sistemas de control. Los controladores digitales se utilizan para alcanzar el desempeño óptimo por ejemplo en la forma de productividad máxima, beneficio máximo, costo mínimo o la utilización mínima de energía (Ogata, 2006).

Un control digital o discreto es un sistema procesador diseñado para que el sistema de control logre las especificaciones requeridas. Este sistema trabaja u opera en instantes de tiempo predeterminados, múltiplos del periodo de muestreo y es, por tanto, un sistema síncrono. La operatividad del sistema o su funcionamiento de procesado queda caracterizada plenamente mediante su ecuación en diferencias.

Recientemente la aplicación de control por computadora ha hecho posible el movimiento inteligente de robots industriales, la optimización de economía de combustible en automóviles y el refinamiento en la operación de enseres y máquinas de uso doméstico, tales como hornos de microondas y máquinas de coser entre otros. La capacidad en la toma de decisiones y la flexibilidad en los programas de control son las mayores ventajas de los sistemas de control digital. La tendencia actual de controlar los sistemas dinámicos en forma digital en lugar de analógica, se debe principalmente a la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y a las ventajas de trabajar con señales digitales en lugar de señales en tiempo continuo (Ogata,2006).

La función matemática del controlador puede ser expresada como una función continua o digital. Generalmente el modelo del sistema es continuo, se necesita un método para convertir un modelo de digital a continuo y viceversa. Si se supone que un controlador tiene una función de transferencia continua  $F(s)$ , y que el mismo controlador tiene una función de transferencia digital  $D(z)$ : Las dos funciones describen la misma operación y además son equivalentes. Si una de las funciones es conocida, es posible encontrar la

segunda función correspondiente. Para encontrar la función digital  $D(z)$  cuando  $F(s)$  es conocida, simplemente se recurre al mapeo conforme mediante la transformada bilineal que se indica en (2.16) (Ogata,2006).

$$s = \frac{2(z - 1)}{T(z + 1)} \quad (2.16)$$

De manera similar, para convertir  $D(z)$ ; con un período de muestreo  $T$ , a  $F(s)$  se realiza mediante (2.17) que es la derivada de la transformación bilineal.

$$z = \frac{\frac{1 + Ts}{2}}{\frac{1 - Ts}{2}} \quad (2.17)$$

El siguiente paso es aplicar la transformada  $z$  inversa para obtener la ecuación en diferencias.

Para el caso de este trabajo se utilizará el controlador PID ya que conjunta las tres acciones de control combinando las ventajas de cada una de ellas. La ecuación de diferencias del PID se presenta en (2.18) y los coeficientes están determinados por (2.19), se utilizará un módulo de la implementación del controlador siendo parte este del sistema de control de posición a utilizar.

$$y(k) = a_0x(k) + a_1x(k - 1) + a_2x(k - 2) + b_1y(k - 1) + b_2y(k - 2) \quad (2.18)$$

$$a_0 = k_p + k_i + k_d \quad (2.19a)$$

$$a_1 = -(k_p + 2k_d) \quad (2.19b)$$

$$a_2 = k_d \quad (2.19c)$$

$$b_1 = 1 \quad (2.19d)$$

$$b_0 = 0 \quad (2.19e)$$

### **2.5.3 Controlador comercial**

En la actualidad están disponibles una gran variedad de controladores en el mercado. Los dos principales fabricantes de controladores de movimiento para aplicaciones industriales son PMAC y Galil Motion, que controlan solamente la dinámica de movimiento hasta la velocidad dejando la aceleración y el jaloneo con severos problemas dinámicos (Rivera, 2007). Algunos modelos disminuyen parcialmente este problema pero a un costo elevado. Los controladores comerciales están basados en DSP's y microcontroladores para la ejecución de todos los algoritmos necesarios para el control de movimiento.

## **2.6 Perfiles de movimiento**

El movimiento de todo sistema mecánico está sujeto a efectos físicos que influyen directamente en su comportamiento dinámico, estos efectos pueden ser analizados a través del comportamiento en posición, velocidad, aceleración y jaloneo que en conjunto se definen como la dinámica de movimiento del sistema mecánico. La forma en que se realiza el movimiento se le conoce como perfil de movimiento (Rivera, 2007).

El perfil de movimiento es un punto vital para una buena dinámica en el control de movimiento de una máquina.

### **2.6.1 Perfiles convencionales**

El Perfil trapezoidal de velocidad es uno de los perfiles más usados en los controladores comerciales consiste en un periodo de aceleración, seguido de un periodo de velocidad constante y terminando con un periodo de desaceleración, sin embargo, en este tipo de perfiles se tienen tasas de aceleración que cambian bruscamente de cero al valor máximo. La aceleración discontinua resulta en jaloneo, provocando vibraciones en el sistema y por lo tanto desgaste, en la figura 2.4 se muestra la dinámica de movimiento para un perfil trapezoidal de velocidad.

Otro de los perfiles de movimiento utilizados en los controladores comerciales es el trapecoidal de aceleración propuesto para limitar el jaloneo, si bien los valores máximos de jaloneo se pueden controlar, presenta discontinuidades y es imposible definir la dinámica de movimiento en una forma arbitraria.

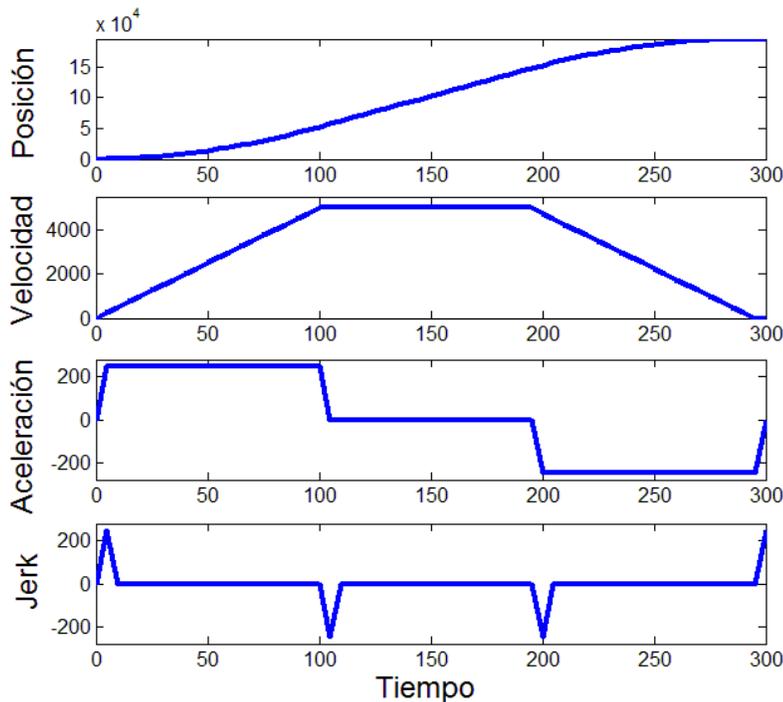


Figura 2.4. Dinámica de movimiento para un perfil trapecoidal en velocidad.

## 2.6.2 Perfiles polinomiales

Para una dinámica mucho más suave que disminuya las vibraciones e incremente el tiempo de vida de los sistemas se utilizan los perfiles polinomiales, los cuales entre mayor es el grado del polinomio mayor es el control de la dinámica de movimiento. Tienen como desventaja que conforme se incrementa el grado del polinomio también lo hace la carga computacional, creciendo casi exponencialmente (Rivera, 2007), siendo un problema su evaluación en tiempo real. Algunas veces se evalúa el polinomio antes de ejecutar el perfil, lo cual se denomina evaluación fuera de línea, y los datos obtenidos se guardan en una memoria para después accederla.

Los perfiles polinomiales son generalmente definidos en varios trazos por lo general en tres: un intervalo de aceleración, un intervalo donde la velocidad permanece constante y un intervalo de desaceleración, permitiendo que los intervalos de aceleración y desaceleración sean diferentes en la figura 2.5 se muestran la dinámica de movimiento de un perfil polinomial, donde se puede ver que el comportamiento es suave aun en aceleración y jerk.

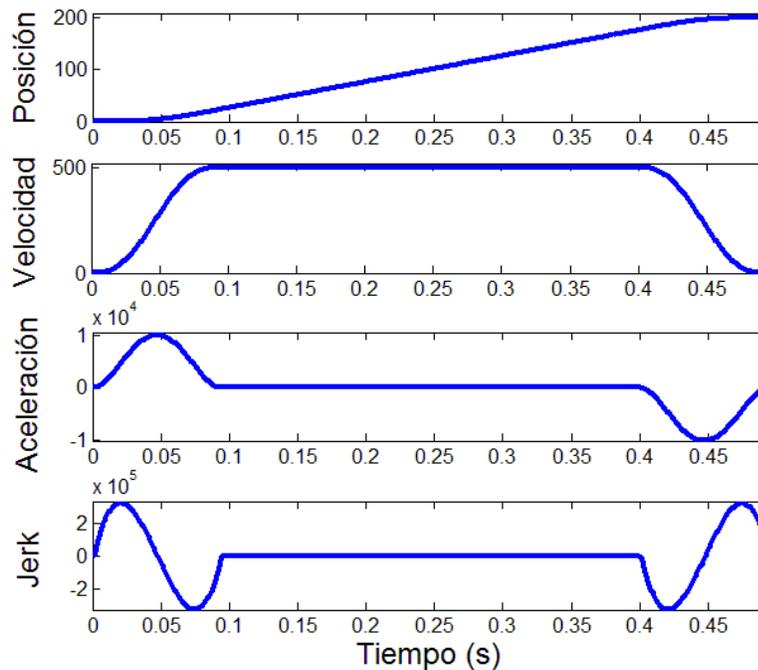


Figura 2.5. Dinámica de movimiento para un perfil polinomial de movimiento

### 2.6.3 Perfil polinomial de sexto grado en posición

En este trabajo se utilizará el modulo del generador de perfiles polinomiales desarrollado por Jaen (2011), el cual genera un perfil de posición de sexto grado en posición esta definición se fundamenta en que tanto las regiones de aceleración como de desaceleración están descritas por un polinomio de 6° grado adicionalmente se encuentra una región de velocidad constante en la parte media del perfil, en la figura 2.6. se muestra el perfil de sexto grado en posición Los parámetros para el diseño del perfil son posición final del perfil completo ( $X_f$ ), la velocidad final alcanzada en el periodo de velocidad constante ( $V_f$ ), la aceleración máxima ( $A_m$ ) y la desaceleración máxima ( $D_m$ ).

Después de la parametrización de las curvas del perfil de velocidad, se expresa como una función definida a trozos (2.20), donde la expresión para el perfil de posición se obtiene integrando por partes la función  $y_v(t)$ .

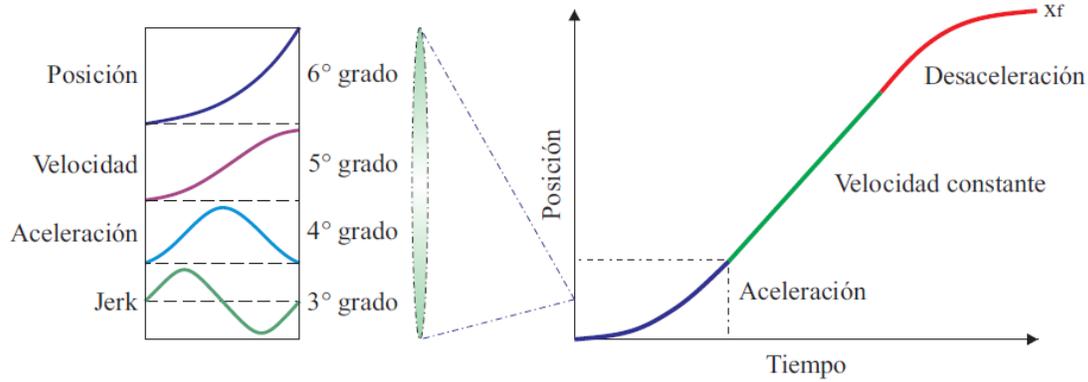


Figura 2.6. Perfil polinomial de sexto grado en posición

El perfil obtenido está definido únicamente por los parámetros de diseño  $Xf$ ,  $Vf$ ,  $Am$  y  $Dm$  con los cuales se definen todos los tiempos.

$$y_v(t) = \begin{cases} \frac{16}{5\tau_a^4}Amt^5 - \frac{8}{\tau_a^3}Amt^4 + \frac{16}{3\tau_a^2}Amt^3 & 0 \leq t \leq \tau_a \\ Vf & \tau_a \leq t \leq \tau_a + \tau_c \\ Vf + \frac{16}{5\tau_d^4}Dm(t - \tau_a - \tau_c)^5 - \frac{8}{\tau_d^3}Dm(t - \tau_a - \tau_c)^4 + \frac{16}{3\tau_d^2}Dm(t - \tau_a - \tau_c)^3 & \tau_a + \tau_c \leq t \leq \tau_a + \tau_c + \tau_d \end{cases} \quad (2.20)$$

Donde,

$$\tau_a = \frac{15Vf}{8Am}$$

$$\tau_d = -\frac{15 Vf}{8Dm}$$

$$\tau_c = \frac{Xf}{Vf} - \frac{\tau_a}{2} - \frac{\tau_d}{2}$$

Debido a que se implementará la generación del perfil para poder ser calculado fácilmente para curvas paramétricas de tipo BSplines y NURBS se considera que el perfil esta normalizado es decir ( $Xf = 1$ ), lo único que varia son las aceleraciones ( $Am$  y  $Dm$ ) y la velocidad final  $Vf$  que son seleccionados por el usuario, sin embargo, esto implicaría que al escalar la curva esta se generaría en el mismo tiempo sin importar el grado de la curva modificando los parámetros de diseño, para evitar este problema se debe considerar la longitud de curva ( $L$ ) por lo que se hace  $Xf = L$ . El perfil  $y_v(t)$  se reescribe como (2.21) donde se ha normalizado para cumplir con los requerimientos establecidos por las curvas paramétricas.

$$y_v(t) = \begin{cases} Ka_3 t^3 (Ka_2 t^2 + Ka_1 t + 5) & 0 \leq t \leq \tau_a \\ Kv & \tau_a \leq t \leq \tau_{ac} \\ Kv + Kd_3 (t - \tau_{ac})^3 (Kd_2 (t - \tau_{ac})^2 + Kd_1 (t - \tau_{ac}) + 5) & \tau_{ac} \leq t \leq \tau_{acd} \end{cases} \quad (2.21)$$

Donde:

$$\tau_a = \frac{15 Vf}{8Am}$$

$$\tau_d = -\frac{15 Vf}{8Dm}$$

$$\tau_c = \frac{L}{Vf} - \frac{\tau_a}{2} - \frac{\tau_d}{2}$$

$$\tau_{ac} = \tau_a + \tau_c$$

$$\tau_{acd} = \tau_a + \tau_c + \tau_d$$

$$Ka_3 = \frac{16 Am}{15\tau_a} \frac{L}{L} = \frac{1024 Am^3}{3375 LVf^2}$$

$$\begin{aligned}
Ka_2 &= \frac{3}{\tau_a^2} = \frac{64Am^2}{75Vf^2} \\
Ka_1 &= -\frac{15}{2\tau_a} = -\frac{4Am}{Vf} \\
Kv &= \frac{Vf}{L} \\
Kd_3 &= \frac{16}{15\tau_a} \frac{Dm}{L} = \frac{1024 Dm^3}{3375 LVf^2} \\
Kd_2 &= \frac{3}{\tau_a^2} = \frac{64Dm^2}{75Vf^2} \\
Kd_1 &= -\frac{15}{2\tau_a} = -\frac{4Dm}{Vf}
\end{aligned}$$

El perfil de velocidad (2.21) se discretiza para ser implementado en un sistema digital. El usuario determina el periodo de muestreo  $T_s$  donde  $t = kT_s$ , una vez obteniendo  $y_v(kT_s)$  se puede obtener el perfil de posición realizando la sumatoria del perfil de velocidad (2.22) por el periodo de muestreo.

$$y_x(kT_s) = \sum_{j=0}^k y_v(jT_s) \times T_s \quad (2.22)$$

Debido a que  $T_s$  no depende de  $k$  se agrega a las constantes que determinan el perfil  $y_v(t)$ , obteniendo la función normalizada y escalada para realizar la suma acumulada para obtener  $y_x(kT_s)$ .

## 2.7 Sensores

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, entrega una señal de salida transductible que es en función de la variable medida (Pallás, 2003). En este trabajo se utilizarán sensores que permiten medir el desplazamiento entregando una señal digital.

## 2.7.1 Encoder

Son de los dispositivos de retroalimentación más comúnmente utilizados en sistemas de control de posición, los cuales se acoplan al motor y al girar entregan una señal proporcional al desplazamiento realizado. Existen dos tipos básicos de encoder: incremental y absoluto.

### 2.7.1.1 Encoder incremental

El encoder incremental también conocido como encoder de cuadratura, proporciona ya sea pulsos o dos señales de salida sinusoidal con el desplazamiento angular del eje del motor, la información del desplazamiento se obtiene con el conteo de la señal obtenida. Existen encoder incrementales para desplazamiento lineal y angular.

Un encoder incremental está compuesto de un disco que se desplaza con la pieza de cuya posición se desea determinar, dicho elemento posee dos tipos de zonas o sectores con una propiedad que las diferencia, dispuestas de forma alternativa y equidistante tal como se muestra en la figura 2.7. De este modo un incremento de posición produce un cambio definido en la salida si se detecta dicha propiedad cambiante con la posición mediante un dispositivo o cabezal de lectura fijo (Pallás 2003).

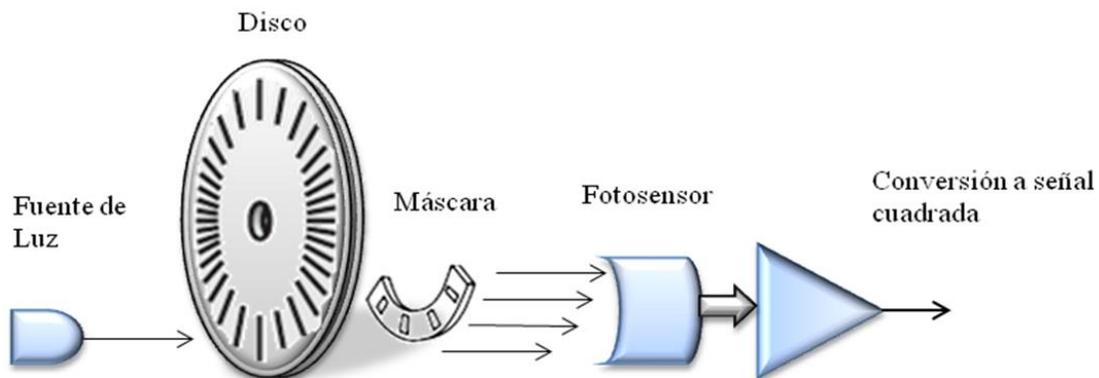


Figura 2.7 Principio de funcionamiento de los codificadores incrementales angulares

Los discos de los encoder incrementales ópticos están contruidos con líneas opacas. Una fuente de luz envía un rayo a través de los segmentos hacia un fotosensor el cual entrega una salida sinusoidal. Los encoder de más alta resolución utilizan una máscara fija

que permite una mejor transmisión de la luz. Una vez que el disco está alineado con la máscara la luz pasa a través de los foto-detectores. Finalmente mediante un proceso electrónico, esta señal se transforma en un tren de pulsos de onda cuadrada las cuales se muestran en la figura 2.8. Las dos formas de onda de salida están desfasadas 90 grados como se muestra en la figura 2.4 de ahí que se le da el nombre de cuadratura.

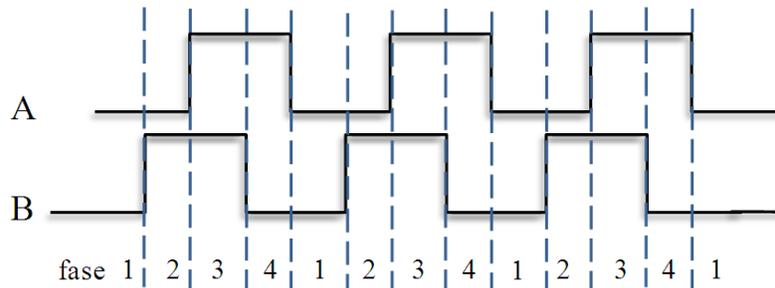


Figura 2.8 Señales obtenidas de un encoder incremental

Para realizar un posicionamiento absoluto es necesario un encoder incremental de dos salidas A y B que permita conocer el sentido de giro y un contador bidireccional. Las señales A y B deben ser decodificadas para producir un pulso de conteo y generar la señal que le indique el sentido de conteo al contador bidireccional, la puesta a cero se hace mediante una tercera señal a la salida del encoder, consistente en un pulso por cada vuelta, la cual es útil para situar de nuevo al contador cuando a fallado la alimentación.

Para la selección de un encoder incremental se consideran principalmente las siguientes características:

Voltaje de alimentación: Comúnmente 5V, 12V y 24 V.

Resolución: La resolución de un encoder se mide en el número de pulsos que entrega por revolución N, es importante ya que de esto depende la exactitud del movimiento.

Fases de salida: Es el número de señales que entrega el encoder, los más comunes son de 3 fases canal A, canal B e Índice, también existen encoder que entregan las tres señales mencionadas y sus complementos

### 2.7.1.2 Encoder absoluto

Los encoder absolutos ofrecen a su salida una señal codificadora correspondiente a la posición de un elemento móvil, regla o disco con respecto a una referencia interna. Para ello el elemento móvil dispone de zonas con una propiedad que las distingue, y a las que se asigna un valor binario “0” o “1”. Pero a diferencia de los encoder incrementales hay varias pistas con zonas diferenciadas y están agrupadas de tal forma que el sistema de lectura obtiene directamente, en cada posición del elemento móvil, el número codificado que da su posición. Cada pista representa un bit de salida, siendo la pista más interior la correspondiente al bit de mayor peso (Pallas,2003).

El encoder absoluto proporciona una señal específica para cada posición del eje en 360 grados. Este tipo de encoder emplea sistemas de detección de posición ya sea por contacto o sin él y puede diseñarse para proporcionar datos de posición absoluta en distintos códigos como código binario natural, código Gray o BCD (Binary Coded Decimal). Siendo el código Gray el más utilizado ya que en cada posición contigua solo cambia uno de los bits evitando el problema del código binario de que si los elementos de lectura están un poco desalineados en la transición de una posición a otra el código resultante pueda corresponder a una posición muy distinta de la real por ejemplo en un sistema de 8 bits con código binario natural al pasar de la posición 3 a 4 que vienen dadas por:

Posición 3      0 0 0 0 0 1 1

Posición 4      0 0 0 0 0 1 0 0

Si los primeros dos elementos de lectura están un poco adelantados al pasar de la posición 3 a 4 puede que en un instante dado la lectura de salida sea 00000000.

Los sistemas de contacto incorporan un ensamble para hacer el contacto directo con los patrones eléctricamente conductivos del disco codificada para leer la información de la dirección. Los sistemas sin contacto utilizan detección fotoeléctrica para medir la posición. Estos últimos normalmente requieren de N elementos de fuentes de luz, uno por bit. Esta

luz pasa en ángulo recto a través del disco y es recibida por un correspondiente arreglo lineal de N detectores de luz en el lado opuesto del disco. En la figura 2.9 se muestra el principio de funcionamiento de un encoder absoluto. El número de pistas en el disco puede ser incrementado hasta conseguir la resolución deseada (Tapia, 2010).

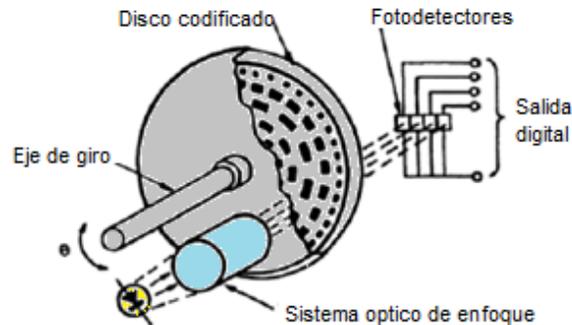


Figura 2.9 Principio de funcionamiento de codificadores absolutos

Ya que la información de la posición está directamente sobre el disco codificado, un fallo en la alimentación no causará la pérdida de información. Además, no se requiere regresar a la posición de inicio (home) cada vez que se re-energiza el sistema (Baldor Motors and Drives, 1998).

## 2.8 Máquinas de montaje de componentes de chip

Antes que los circuitos impresos y por un tiempo después de su invención, la conexión punto a punto era la más usada. Originalmente, cada componente electrónico tenía patas de alambre, y el circuito impreso tenía orificios taladrados para cada pata del componente. Las patas de los componentes atravesaban los orificios y eran soldadas a las pistas del circuito impreso. Este método de ensamblaje es llamado through-hole. En 1949, Moe Abramson y Stanilus F. Danko, de la United States Army Signal Corps desarrollaron el proceso de Autoensamblaje, en donde las patas de los componentes eran insertadas en una lámina de cobre con el patrón de interconexión, y luego eran soldadas. Con el desarrollo de la laminación de tarjetas y técnicas de grabados, este concepto evolucionó en el proceso estándar de fabricación de circuitos impresos usado en la actualidad. La

soldadura se puede hacer automáticamente pasando la tarjeta sobre un flujo de soldadura derretida, en una máquina de soldadura por ola.

Sin embargo, las patas y orificios son un desperdicio. Es costoso perforar los orificios, y el largo adicional de las patas es eliminado. En vez de utilizar partes through-hole, a menudo se utilizan dispositivo de montaje superficial.

Aunque son varias las máquinas requeridas para la realización de tarjetas electrónicas de forma automática, el corazón del montaje es la máquina que coloca los componentes en la tablilla antes de ser soldadas. Estas máquinas generalmente constituyen cerca del 50% del costo total de la línea de producción.

Las máquinas ensambladoras usan herramientas de levantamiento por vacío para sostener los componentes, y muchas otras también proveen visión asistida de alineamiento.

Una máquina de ensamble requiere de la capacidad de colocación con destreza y precisión con pasos finos de 0.5mm. Algunas de estas máquinas cortan y forman los pines del componente al tiempo de la colocación para evitar el daño de estas debido a un mal manejo. El número de máquinas necesarias para un ensamble adecuado depende de los tipos de componentes a ser ensamblados y el rendimiento deseado por la empresa. La versatilidad y flexibilidad en la habilidad del equipo para manejar una variedad de diferentes componentes reduce la velocidad y eficacia de la máquina por realizar las necesidades del proceso de ensamblado (Prasad, 1997).

### 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el proceso de desarrollo del proyecto realizado. Este trabajo se dividió en varias etapas, las cuales se muestran en el diagrama a bloques de la figura 3.1, se comenzó con el levantamiento de la zona a reconvertir y controlar, el cual consistió en el desalojo del equipo que constituía el sistema de posicionamiento de los ejes de la máquina para disponer del espacio necesario para trabajar con el sistema propio.

La siguiente etapa consistió en una reconversión electromecánica para habilitar el movimiento de los ejes de la máquina, siendo necesaria la instalación de motores, servoamplificadores, sensores de límite y la elaboración de tarjetas de opto-acoplamiento.

Se continuó con la programación de una interfaz gráfica de usuario de para realizar las pruebas con el controlador propio, posteriormente se realizó el diseño de los casos de estudio, en el cual se definieron las pruebas a realizar para evaluar el desempeño de los controladores.

En la última etapa se instalaron ambos controladores y se desarrollaron las pruebas propuestas, comenzando con el controlador comercial, con el cual se probó la funcionalidad de la reconversión realizada, posteriormente se realizaron las pruebas con el controlador propio utilizando la interfaz gráfica diseñada para tal fin y por último se realizó una comparativa de desempeño entre ambos controladores.

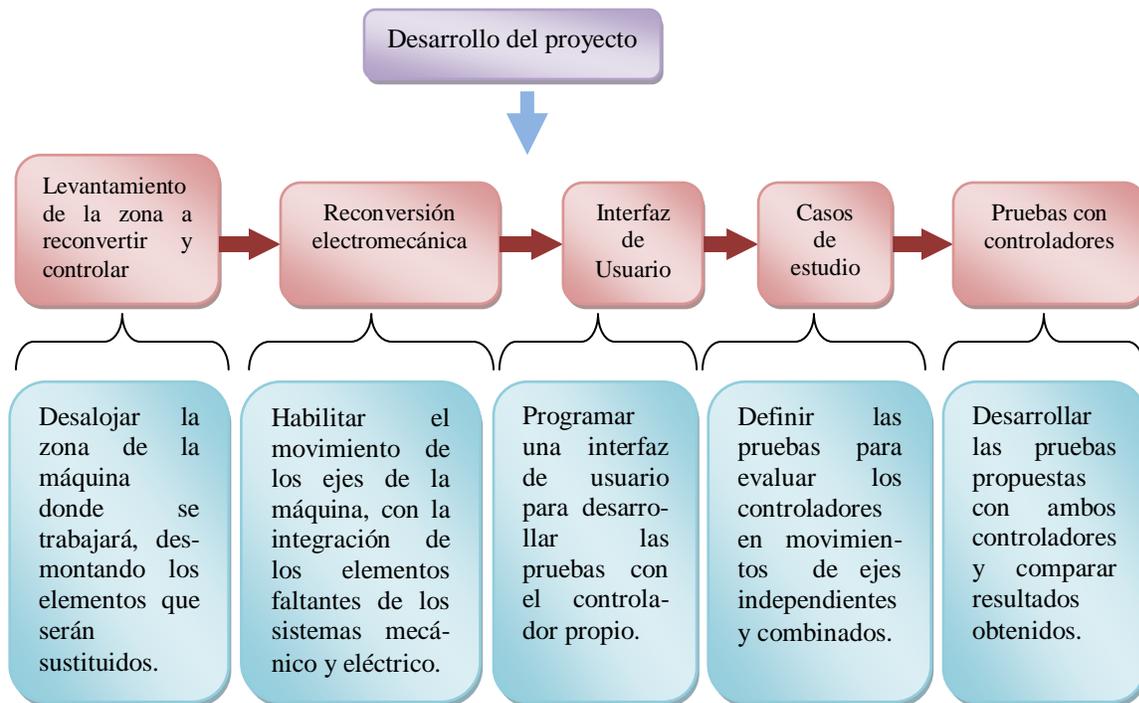


Figura 3.1. Diagrama general del desarrollo del proyecto

### 3.1 Levantamiento de la zona que se reconvertirá y controlará de la máquina RX-4A

La máquina RX-4A contaba originalmente con un sistema de control de posición para sus ejes, en el cual dos motores OKUMA BL-S10E-30S se encargaban de generar el movimiento, estos motores requerían de una gran cantidad de señales para su control, además son alimentados a un voltaje de 150 volts, el cual es diferente al estándar de nuestro país, la figura 3.2 muestra la máquina antes de comenzar el trabajo, el sistema de control de posición instalado en la máquina era bastante amplio y complejo por la tecnología obsoleta de sus elementos, en la figura 3.3 se puede ver el sistema de control que era utilizado para el control de uno de los motores Okuma. Para el desarrollo de este trabajo se decidió cambiar los motores y desalojar el sistema de control de la máquina para de esta manera disponer del espacio para la instalación del sistema a ocupar.

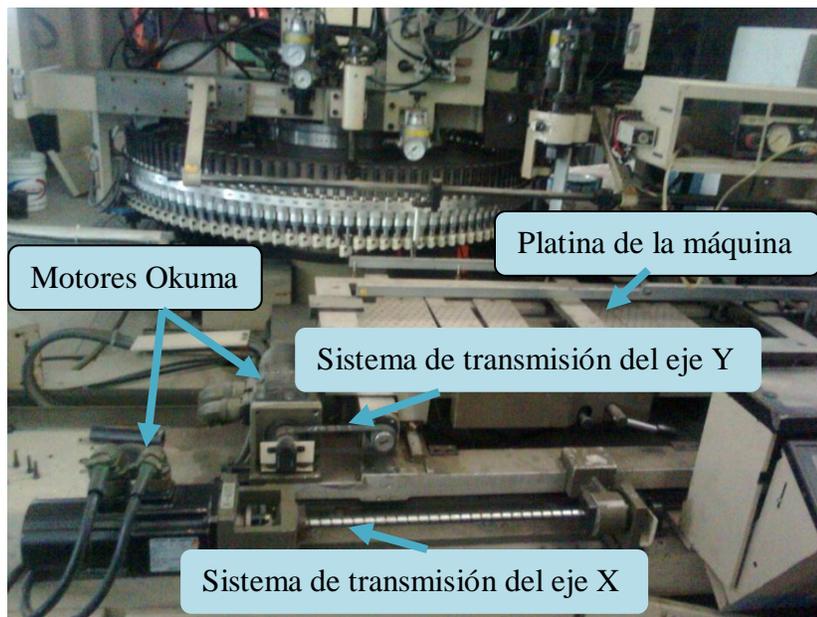


Figura 3.2 Máquina RX-4A sin modificaciones.

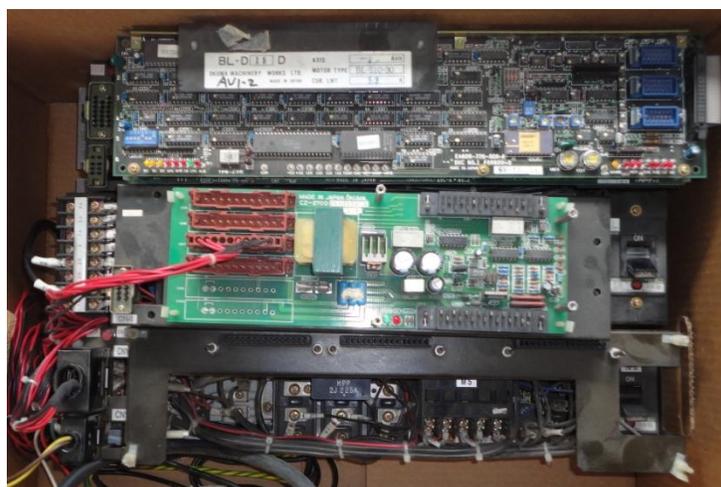


Figura 3.3 Sistema de control para cada eje de la máquina RX-4A

### 3.2 Reconversión electromecánica

Para conseguir habilitar el movimiento de los ejes de la máquina fue necesaria una reconversión, la cual se dividió en dos etapas eléctrica y mecánica. La etapa eléctrica

consistió en el desarrollo del sistema eléctrico de control, para el cual fue necesario la selección de algunos de los elementos (motores, servoamplificadores) y la elaboración de otros (Tarjetas optoacopladoras).

En la etapa mecánica se fabricaron las piezas mecánicas necesarias para el montaje de los motores en los ejes de la máquina, así como las piezas para la activación de los sensores de límite.

### 3.2.1 Etapa eléctrica.

En esta etapa se desarrollo el sistema eléctrico de control, el cual está constituido por los siguientes elementos: PC, controlador, tarjetas optoacopladoras, sensores de límite, encoder, servoamplificador y el servomotor que es el dispositivo que genera la variable a controlar (Actuador), en la Figura 3.4 se muestra un diagrama del sistema eléctrico de control necesario para cada uno de los ejes, se utiliza la misma PC y tarjeta de control para los dos ejes.

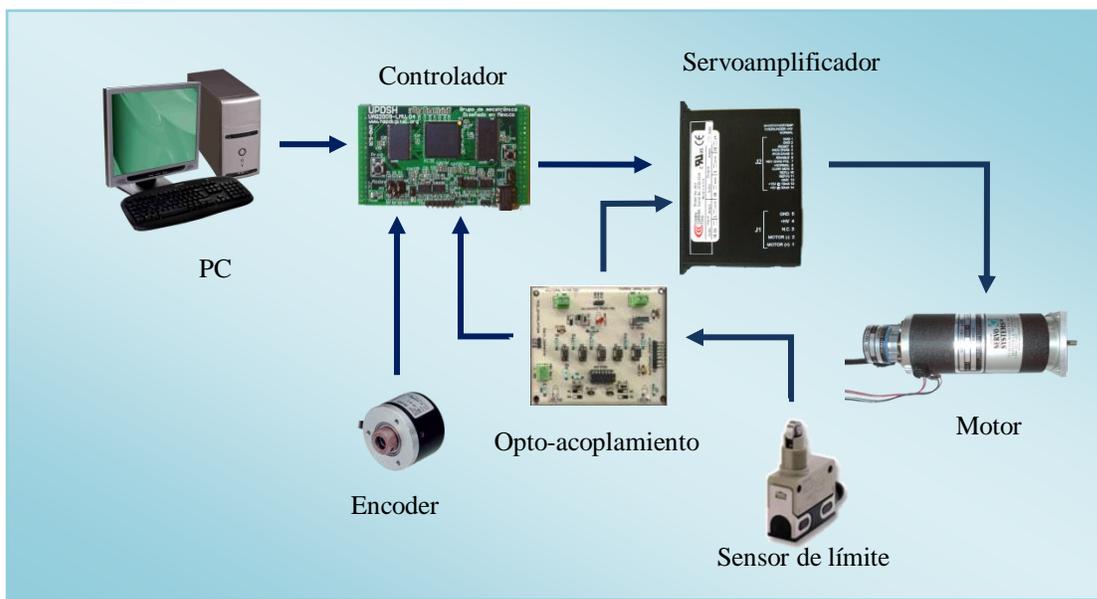


Figura 3.4 Sistema eléctrico de control

El primer paso fue la selección de motores, para lo cual se tomaron como referencia los motores que estaban originalmente instalados en los ejes de la máquina, los cuales

tienen un torque de 10 Kg-cm, los servomotores seleccionados cumplen tal requisito ya que cuentan con un reductor planetario que aumenta su torque, en la tabla 3.1 se muestran los motores seleccionados y su descripción, como se puede ver en la tabla 3.1 los motores seleccionados son de CD y no de CA como los motores sustituidos. En el Apéndice A se muestran las hojas de datos de los motores y reductores seleccionados.

Descripción	Motor
<p>Maxon DC Motor 2260.885-73.216-200            Voltaje nominal: 24 VDC            Corriente continua máxima: 3.33 Amperes            Torque de salida: 305.9 kg-cm (30 N-m)            Reductor planetario con relación 5.2:1            Encoder incremental 1000 PPR.</p>	
<p>Copley Control Mod: SSC 23SMDC-LCSS            Voltaje nominal: 24 VDC            Corriente continua máxima: 4 Amperes            Torque de salida: 505.8 kg-cm (439 in-lb)            Reductor planetario con relación 5.5:1            Encoder incremental 1000 PPR.</p>	

Tabla 3-1. Motores seleccionados.

Para el control de los motores es necesario el uso de servoamplificadores, los cuales acondicionan la señal de control a magnitudes de potencia adecuadas para la manipulación de los actuadores (servomotores). Para la selección se tomaron en cuenta los siguientes requerimientos: la corriente continua máxima, la cual debe ser mayor a la requerida por los motores, el voltaje de alimentación de los motores debe estar dentro del rango que maneja el amplificador, en la figura 3.5 se muestra el servoamplificador Copley Control Modelo 403 seleccionado y sus características.



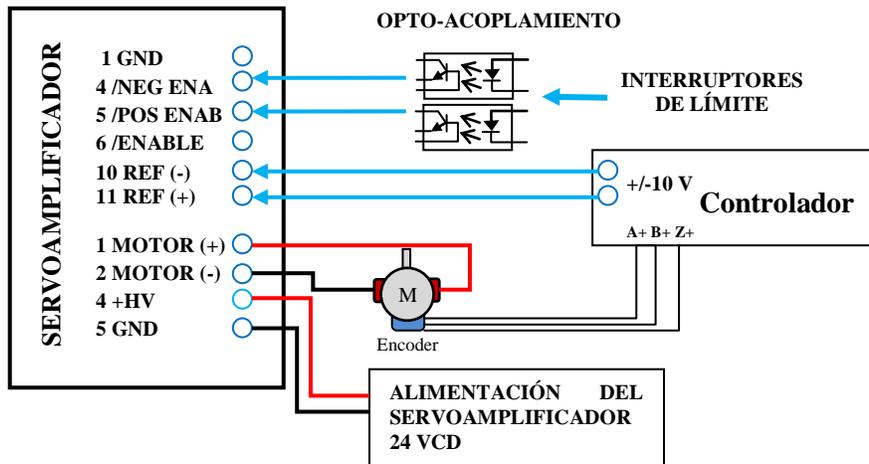


Figura 3.7. Diagrama de conexión de sistema eléctrico de control para cada eje.

### 3.2.2 Etapa mecánica

Para la instalación de los nuevos servomotores se diseñaron y fabricaron piezas mecánicas necesarias para la instalación de los motores sobre la máquina y para el accionamiento e instalación de los sensores de límite, en las figuras 3.8-3.10 aparecen las piezas principales maquinadas con su diseño. El método utilizado para la manufactura de las piezas fue de arranque por viruta utilizando las máquinas-herramienta torno, fresadora y taladro de banco.

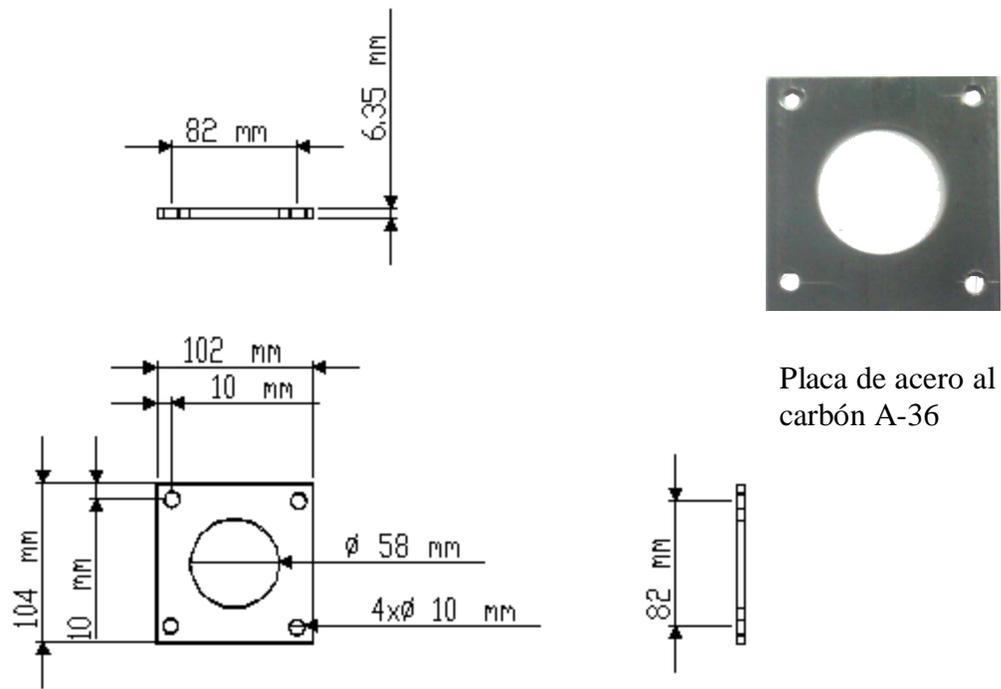


Figura 3.8. Pieza diseñada y manufacturada para instalación del motor del eje Y

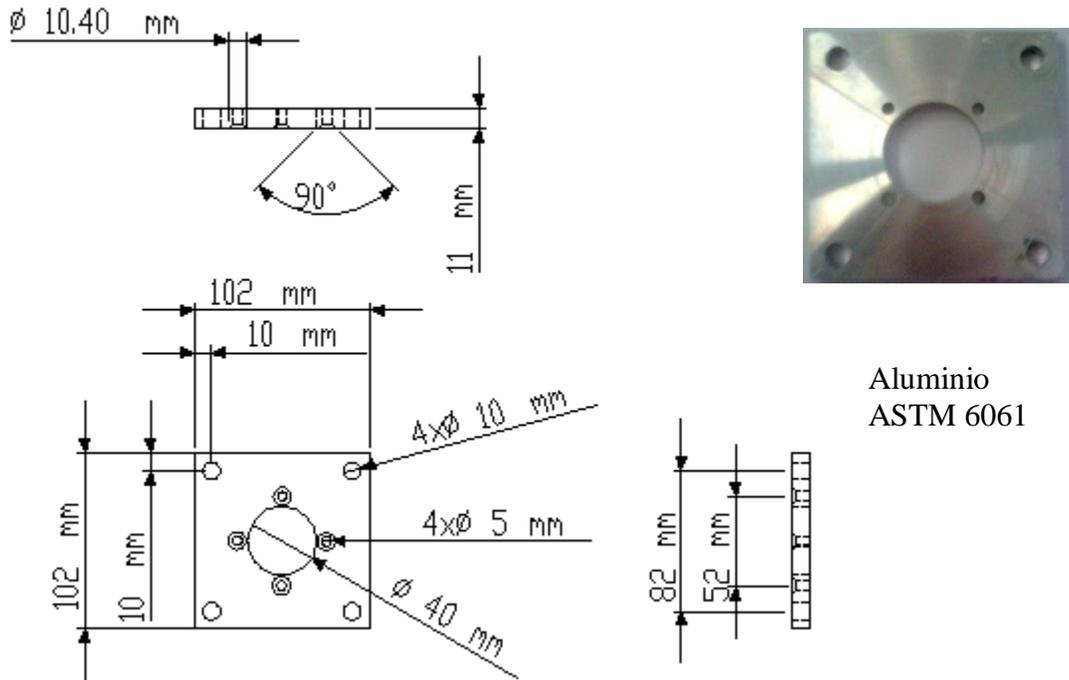


Figura 3.9. Pieza diseñada y manufacturada para instalación del motor del eje X

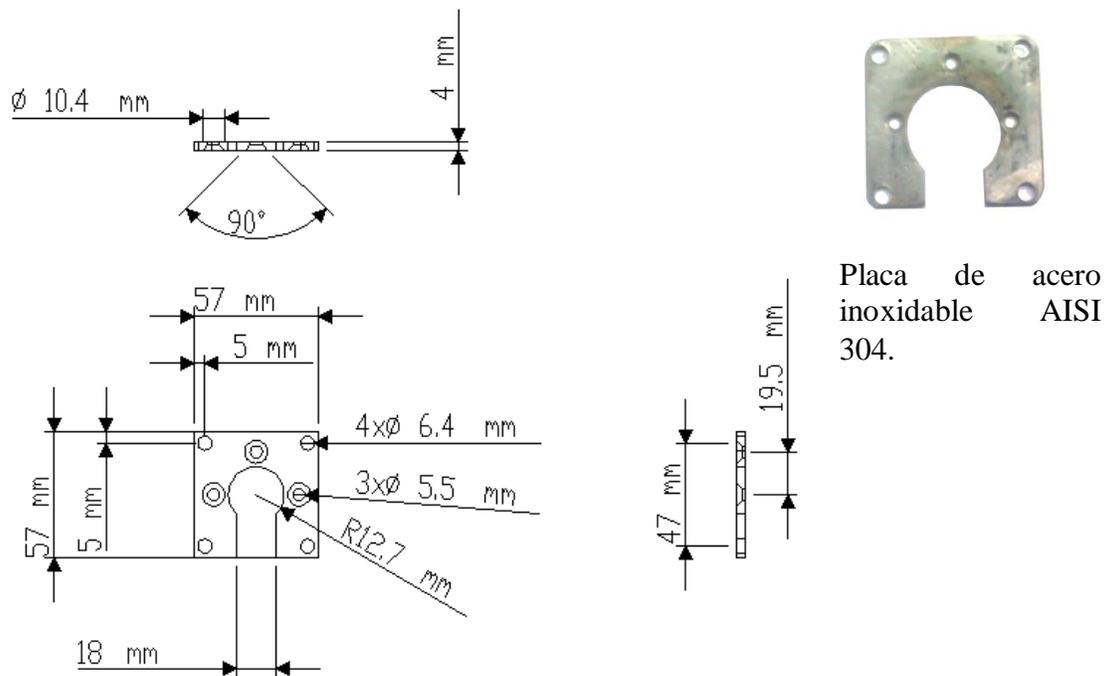


Figura 3.10. Pieza diseñada para el ensamble del reductor con el motor del eje Y.

El montaje del equipo adquirido utilizando los componentes maquinados se muestran en las figuras 3.11-3.13, en la figura 3.11 se muestra el motor SSC 23SMDC-LCSS instalado en el eje Y, se utilizaron espárragos con rosca M8x1.25 de 12 cm de longitud. En la figura 3.12 se muestra el motor Maxon DC 2260.885-73216-2000 instalado en el eje X, el motor se fija a la pieza de la figura 3.9 por medio de 4 tornillos M5x0.8 cabeza plana, la pieza se atornilla a la vez a una base que esta fija a la máquina con cuatro tornillos M8x1.25 de 30 mm de largo uno en cada esquina.



Figura 3.11. Montaje del motor SSC 23SMDC-LCSS en el eje Y.



Figura 3.12. Montaje del motor Maxon 2260.885-73.216-200 en el eje X.

Como se mencionó anteriormente fue necesario desalojar el sistema eléctrico de control de los ejes de la máquina. En la figura 3.13 se muestra el montaje de algunos de los elementos del sistema eléctrico de control, como lo son las tarjetas optoacopladoras y los servoamplificadores, los cuales fueron instalados en el área desocupada.



Figura 3.13. Instalación de elementos del sistema eléctrico de control.

De acuerdo a las características mecánicas de la platina, la relación de los reductores y los sensores (encoder) utilizados, se puede calcular una resolución de diseño del sistema de posicionamiento por (3.1).

$$Resolución = \frac{Movimiento\ lineal\ del\ tornillo\ guía\ por\ revolución}{Cuentas\ de\ encoder\ por\ revolución \times relación\ del\ reductor} \quad (3.1)$$

El movimiento lineal del tornillo guía realizado por revolución o paso del tornillo es de 15mm, los encoder utilizados tienen una resolución de 1000 ppr (pulses per revolution) o bien 4000 cuentas por revolución, para el caso del eje X el motor tiene acoplado un reductor con relación de 5.2:1 por lo que la resolución de diseño es de  $0.721\mu\text{m}$  por cuenta de encoder, en caso del eje Y el motor tiene acoplado un reductor con relación 5.5:1 por lo que la resolución de diseño es de  $0.681\mu\text{m}$  por cuenta de encoder. Debido a las no linealidades del sistema como el juego mecánico y la fricción estática, la resolución práctica difiere de la resolución de diseño.

### 3.3 Interfaz de usuario

La interfaz gráfica utilizada se programó en lenguaje C++ con gtkmm que es un envoltorio de C++ para Gtk+ una biblioteca usada para crear interfaces gráficas de usuario, el protocolo utilizado para el envío de datos entre el software (Interfaz gráfica de usuario) y el hardware (controlador) fue desarrollado por Morales (2010).

La interfaz está formada por diferentes widgets (elementos gráficos que permiten mostrar información y la interacción con el usuario) como lo son botones con funciones específicas y las entradas de texto. En la figura 3.14 se muestra una imagen de la interfaz.

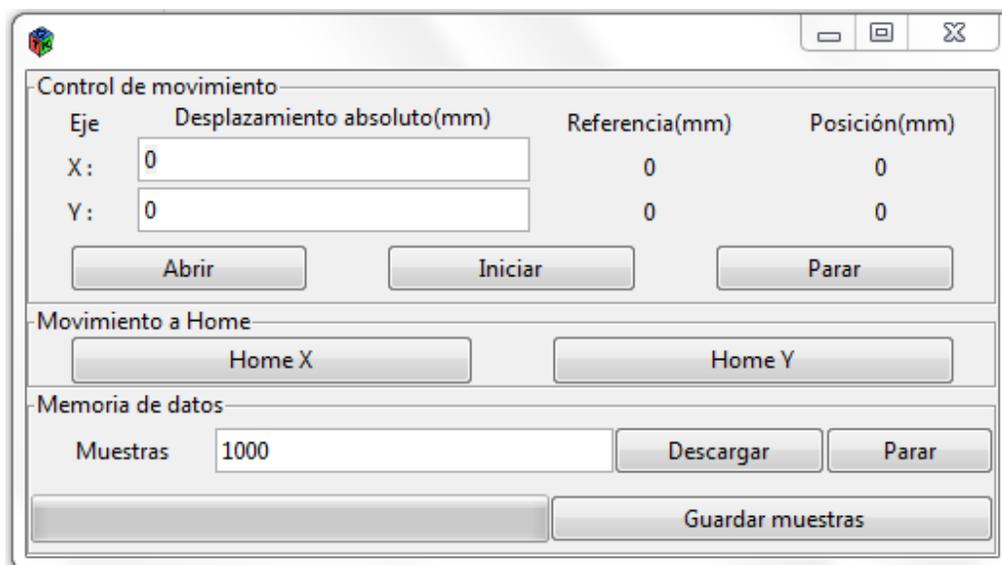


Figura 3.14. Interfaz de usuario para controlador propio.

La sección control de movimiento de la interfaz sirve para monitorear y ordenar el movimiento. Los movimientos se pueden ordenar de dos formas, la primera es introduciendo la coordenada en *mm* del eje X y del eje Y del punto al que se desea mover en las entradas de texto y oprimiendo el botón “Iniciar” para ejecutar el movimiento, la otra forma es mediante la lectura de un archivo .txt que contiene las coordenadas de una trayectoria por medio de dos columnas, la primera especifica la coordenada en el eje X y la segunda en el eje Y, para esto se oprime el botón “Abrir” el cual abre una ventana para acceder a la dirección del archivo, se selecciona el archivo y se oprime el botón abrir de la ventana, las coordenadas son guardadas en una lista enlazada, para comenzar el movimiento se oprime el botón “Iniciar” realizando la trayectoria definida por las coordenadas guardadas.

Ya que se trabaja con un sistema de coordenadas absolutas se requiere de una coordenada de origen, para lo cual se tienen dos botones el “HomeX” y “HomeY”, los cuales al ser seleccionados inician un movimiento del motor del eje seleccionado en sentido inverso hasta detectar el interruptor de límite, después se realiza un movimiento hacia adelante hasta detectar un pulso de la señal índice del encoder, de esta manera se tiene una referencia constante.

En la sección memoria de datos de la interfaz, se tiene la opción de descargar los datos que fueron guardados en la memoria DRAM de la tarjeta UPDSH durante el movimiento (señal de encoder y señal de referencia), para esto se introduce el número de muestras requeridas en la entrada de texto ubicada delante de la etiqueta “Muestras”, considerando que la frecuencia de muestreo es de 1000 Mps, para empezar la descarga se oprime el botón “Descargar”, la barra progresiva de la parte inferior izquierda indica el progreso de la descarga de datos, cuando la descarga ha terminado se continúa guardando los datos en un archivo de texto, para esto se presiona el botón “Guardar”, el cual abre una ventana en la cual se selecciona la ubicación y el nombre del archivo con que se desea guardar.

### 3.4 Casos de estudio

Para la evaluación del desempeño del controlador de movimiento basado en FPGA y su comparación con un controlador comercial Galil, se diseñaron cuatro casos de estudios, tres con movimientos independientes de cada eje y uno con movimientos de ejes combinados.

#### 3.4.1 Caso de estudio 1: Parámetros de respuesta

Este caso de estudio consiste en un movimiento de ejes independientes, donde se realiza dos veces un movimiento de 40 cuentas en una dirección y regreso a la posición inicial, como se muestra en la figura 3.15, esto permite observar parámetros de la respuesta como lo son: el sobrepaso que presenta el sistema, el error en estado estacionario y además permite observar el comportamiento del sistema al moverse en ambos sentidos.

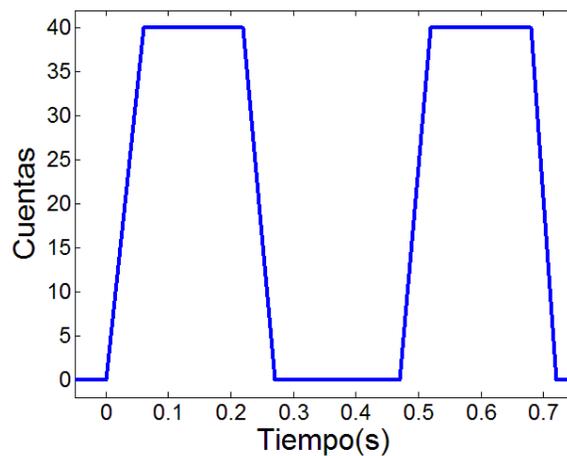


Figura 3.15. Caso de estudio 1

#### 3.4.2 Caso de estudio 2: Repetitividad

El caso de estudio 2 es una prueba de ejes independientes que consiste en cuatro escalones de 30 cuentas realizados consecutivamente de manera ascendente en 10 segundos como se muestra en la figura 3.16, esto permite evaluar la repetitividad del controlador, ya que se realiza 4 veces el mismo movimiento.

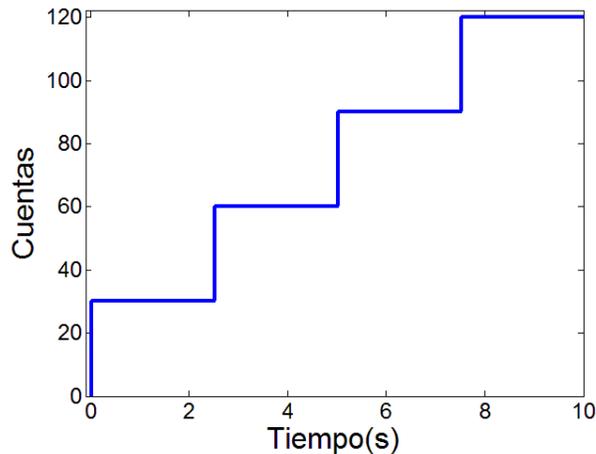


Figura 3.16. Caso de estudio 2

### 3.4.3 Caso de estudio 3: Dinámica de movimiento.

Este caso de estudio tiene como finalidad observar las ventajas que se obtienen al utilizar el generador de perfil polinomial de movimiento del controlador propio, la prueba consiste en realizar una comparación de la dinámica de movimiento obtenida con el controlador propio y un controlador Galil en un desplazamiento de 500 cuentas, la señal de posición se obtiene por medio de las cuentas adquiridas durante el movimiento, para obtener las graficas de velocidad, aceleración y jerk, se deriva consecutivamente la posición.

En el caso del controlador Galil se utiliza un perfil trapezoidal simétrico de velocidad, siendo esta la opción que ofrece el controlador, el perfil es diseñado con una velocidad máxima de 1000 cuentas/s y una aceleración de 25000 cuentas/s<sup>2</sup>, la dinámica de movimiento teórica esperada se muestra en la figura 3.17.

Para la prueba con el controlador propio se utiliza un perfil polinomial simétrico de sexto grado en posición, con los siguientes parámetros de diseño: velocidad máxima de 1000 cuentas/s y aceleración máxima de 20000 cuentas/s<sup>2</sup>, la dinámica de movimiento teórica esperada se muestra en la figura 3.18.

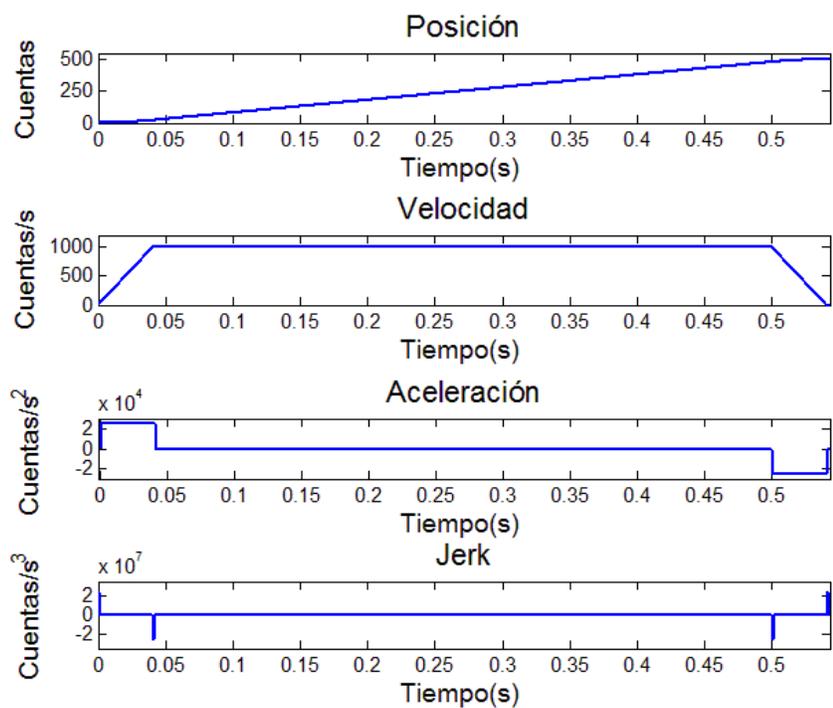


Figura 3.17. Dinámica de movimiento teórica diseñada para controlador Galil

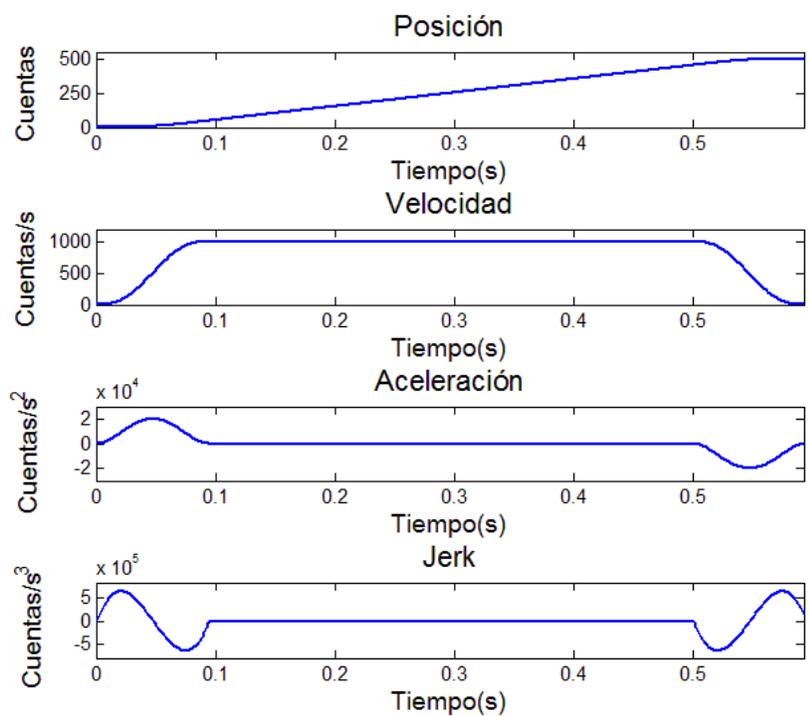


Figura 3.18. Dinámica de movimiento teórica diseñada para controlador Propio



que los tipos de elementos son colocados es señalado con un número del 1 al 11 del mismo color de la trayectoria del tipo de elemento.

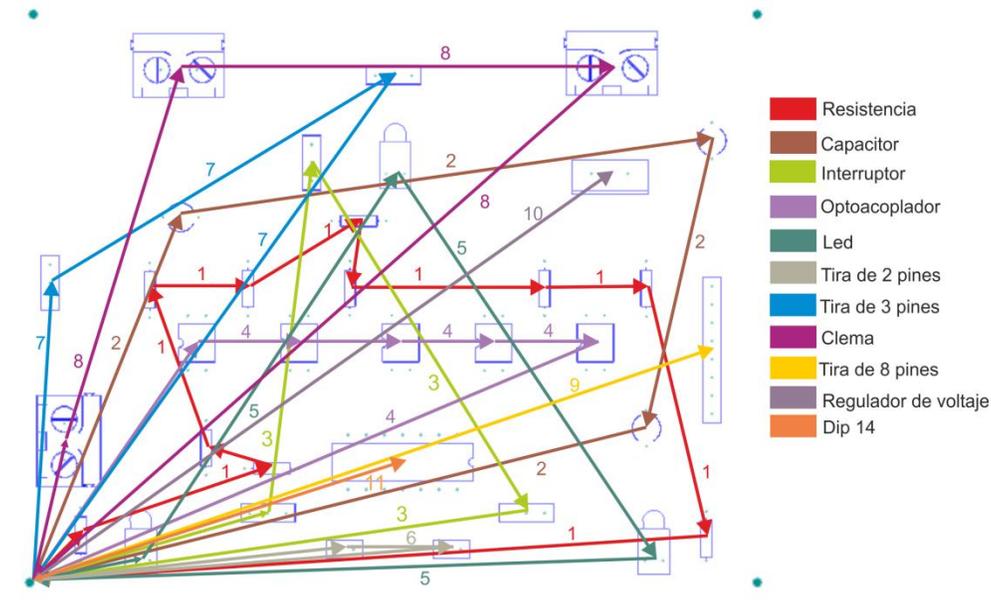


Figura 3.20. Trayectoria de prueba del caso de estudio 4

### 3.5 Control

En esta etapa se desarrollan las pruebas definidas en los casos de estudio para evaluar el desempeño de ambos controladores, el propio basado en FPGA y el comercial, primeramente instalando el controlador comercial Galil y desarrollando los casos de estudio, siendo con el controlador comercial con el cual se evalúa primeramente la funcionalidad de la reconversión electromecánica, posteriormente se instala y programa el controlador propio basado en FPGA en la máquina RX-4A y se desarrollan los casos de estudio, posteriormente se realiza la comparativa el desempeño entre ambos controladores.

#### 3.5.1 Controlador comercial

Uno de los controladores más utilizados actualmente son los fabricados por la compañía Galil Motion Control, la serie DMC-18x2 son controladores de movimiento los cuales se instalan en el bus PCI de una PC, son diseñados para aplicaciones de múltiples

ejes que van de 1 a 4 ejes, proporciona características avanzadas tales como compensación PID con feedforward de velocidad y aceleración, memoria multitareas para correr simultáneamente hasta 8 programas y no comprometidas E/S para sincronizar el movimiento con eventos externos (8 entradas y 8 salidas TTL). Los modos de movimiento incluyen la colocación de punto a punto, interpolación lineal y circular, contornear, engranaje electrónico, y ECAM. Las tarjetas DMC-18x2 tienen como unidad de procesamiento principal un microprocesador Motorola 68331 de 32 bits con 2 MB de memoria RAM y una memoria flash EEPROM de 2 MB. La parte de interfaz de comunicación con la PC contiene una FIFO bidireccional de alta velocidad. Para los servomotores estándar el controlador genera una señal analógica de +/- 10 volts a través de un DAC de 16 bits de resolución. Al igual que todos los controladores de Galil, los controladores DMC-18x2 utilizan un lenguaje sencillo que consta de comandos intuitivos de dos letras referidos a palabras en inglés.

Para la realización de pruebas con el controlador Galil se hace uso del software DMC Smart Terminal para realizar movimientos y del software Servo Design Kit mostrado en la figura 3.21 para realizar la sintonización del controlador para ambos motores y la adquisición de datos (cuentas de encoder) del movimiento.



Figura 3.21. Software Servo Design Kit

Un diagrama del sistema de control de posición realizado con el controlador Galil se muestra en la figura 3.22. Por medio de una PC en la cual está instalado el controlador se envía la referencia, el controlador recibe la señal de retroalimentación del encoder para realizar la comparación con la referencia y aplicar el controlador previamente sintonizado, el DAC de la tarjeta convierte la señal digital a una señal analógica que es enviada al servoamplificador, el cual acondiciona la señal de control a una señal de potencia suficiente para alimentar el motor y generar el movimiento, el cual es sentido por el encoder.

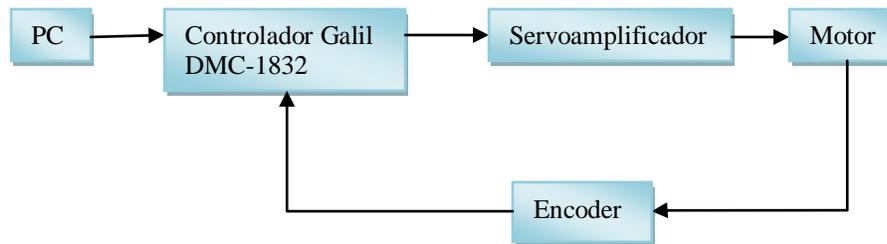


Figura 3.22. Esquema de sistema de control de posición con controlador Galil

### 3.5.2 Controlador de posición propio basado en FPGA

Un diagrama de la arquitectura del controlador propio se muestra en la figura 3.23, el cual consta de un conjunto de bloques descritos en lenguaje VHDL programados en una tarjeta UPDSH desarrollada por Morales (2010), la cual contiene un FPGA Spartan-3E1600 y sirve como unidad de procesamiento de señales del controlador, en el apéndice B.1 se muestra su hoja de datos, una tarjeta DAS1612 sirve como sistema de adquisición de datos, en el apéndice B.2 se muestra su hoja de datos. Una interfaz gráfica de usuario programada en C++ permite el manejo del sistema de control, por la cual se pueden realizar movimientos lineales con coordenadas absolutas o se puede realizar una trayectoria descrita por un conjunto de coordenadas contenidas en un archivo .txt.

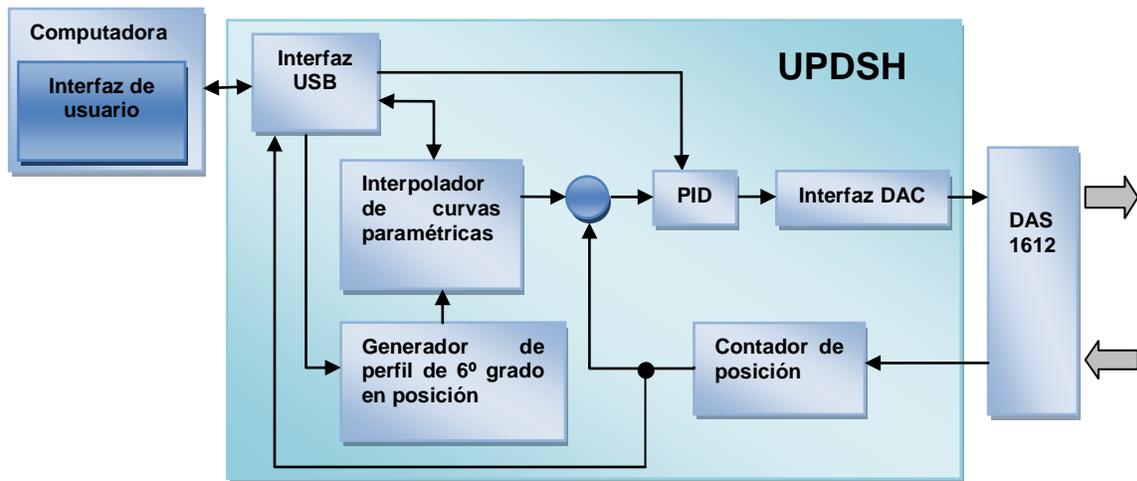


Figura 3.23. Esquema de controlador de posición propio

Los bloques que conforman el sistema son los siguientes:

**Interfaz USB:** Este bloque implementa el protocolo de comunicación USB y es el medio de comunicación entre el controlador y la interfaz grafica de usuario, sirve para enviar por medio de la interfaz de usuario las contantes requeridas por los bloques del controlador y enviar del controlador la señal de encoder y de referencia a la interfaz para monitorear el movimiento.

**Generador de perfil de posición de sexto grado:** en este bloque se implementa el algoritmo desarrollado por Jaen (2011) para un perfil de posición de sexto grado cuyas ecuaciones se muestran en el capítulo dos en la sección 2.6.3, el cual permite tener control en los parámetros de posición, velocidad y aceleración y tener movimientos más suaves con menos sobrepaso, el perfil esta normalizado por lo que tiene una salida que va de 0 al iniciar el movimiento a 1 al completarlo, este dato es enviado al interpolador de curvas el cual lo utiliza para la reconstrucción de la curva, los parámetros de diseño del perfil son enviados al controlador mediante el módulo USB.

**Interpolador de curvas paramétricas:** En este bloque se implementa un algoritmo para la construcción de curvas Bspline y NURBS, lo cual permite desarrollar trayectorias curvas de manera suave, para el cálculo de los puntos de la curva se requieren de puntos de

control y knots, en el caso de este trabajo se realizarán solo movimientos lineales, sin embargo este módulo será útil para una mayor precisión del movimiento, este bloque proporciona la referencia variable que debe hacer seguir el controlador PID.

**PID:** El bloque controlador PID se encarga de aproximar a cero el error entre la referencia proporcionada por el interpolador de curvas paramétricas y la posición real proporcionada por el contador de posición, las constantes de la ecuación de diferencias del PID son enviadas al controlador mediante el modulo USB, con una previa sintonización de la planta, la salida del PID es enviada al bloque interfaz DAC.

**Interfaz DAC:** Este bloque se encarga de manejar las señales para el funcionamiento del DAC 7565 de la tarjeta DAS1612 y de esta manera transformar el dato digital de salida del módulo PID a una señal analógica enviada al servoamplificador.

**Contador de posición:** Este bloque procesa los pulsos del encoder para encontrar la posición en que se encuentra la máquina.

**DAS 1612:** Es el sistema de adquisición de datos del controlador, fue desarrollado por el grupo HSP digital de la UAQ (2007), cuenta con un Convertidor Digital Analógico (DAC ,Digital to Analog Converter,) y un Convertidor Analógico Digital (ADC, Analog to Digital Converter,) de 12 bits, en este trabajo solo se hace uso de el DAC el cual transforma la señal digital del controlador a una señal analógica la cual es amplificada para obtener una señal de +/- 10 volts que se envía a los servoamplificadores, la DAS 1612 alimenta los encoder y recibe las señales generadas por éstos, también recibe las señales de los interruptores de limite .

## 4 RESULTADOS

En esta sección se reportan los resultados de los casos de estudio planteados en la sección 3.6, desarrollados con un controlador comercial y el controlador propio. El controlador comercial utilizado fue la Galil DMC-1832, para las pruebas realizadas con este controlador se realizó la sintonización de ambos ejes con el algoritmo de auto sintonización Auto Crossover Frequency desarrollado por el fabricante, en el caso del controlador propio se usó la sintonización por margen de fase.

### 4.1 Resultados de caso de estudio 1.

Como se menciona anteriormente, en este caso de estudio se realiza un movimiento de ejes independientes que consta de desarrollar dos veces consecutivas un movimiento de 40 cuentas y retorno a la posición de origen, teniendo como finalidad observar los parámetros de sobrepaso máximo y error en estado estacionario que presentan ambos controladores.

Para la realización de esta prueba con el controlador DMC-1832 se realizó la adquisición de datos con la herramienta del software del fabricante Storage Scopes, con un periodo de muestreo de 2 ms y con el sistema de adquisición de datos del controlador propio, para comprobar si ambos controladores reciben de la misma forma las señales de encoder.

En la Figura 4.1 se muestran las respuestas obtenidas con el controlador Galil DMC-1832 en los dos ejes. En las figuras 4.1a y 4.1b se observan respectivamente las respuestas en el eje “X” y en el eje “Y”, en estas figuras se grafica tanto los datos adquiridos por el controlador Galil como los adquiridos por el controlador propio, se puede ver que los datos registrados por ambos controladores son muy parecidos, significando que procesan la señal de encoder de la misma manera.

Como se puede ver en la Figura 4.1, la respuesta es buena en ambos ejes con un sobrepaso de 2 cuentas y sin error en estado estacionario al llegar a las cuentas de

referencia, en el caso del eje X se tiene un sobrepaso de 2 cuentas al regresar a su posición de origen, mientras que el eje Y no presenta sobrepaso al regresar a su posición de origen.

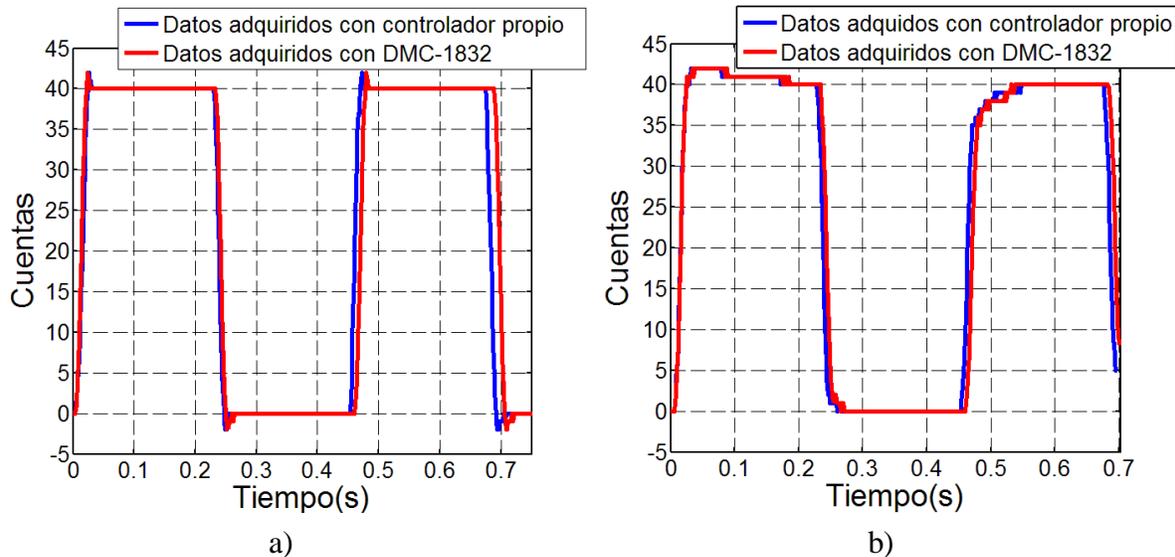


Figura 4.1 a) 40 cuentas Galil eje “X”, b) 40 cuentas Galil eje “Y”.

En las figuras 4.2a y 4.2b se pueden ver las respuestas obtenidas con el controlador propio basado en FPGA en el eje “X” y eje “Y” respectivamente, para el eje X se tiene un sobrepaso de una cuenta al alcanzar las cuentas de referencia, sin error en estado estacionario y un sobrepasó de una cuenta al regresar a su posición original. En el caso del eje Y como se puede ver en la figura 4.2b se tiene un sobrepaso de una cuenta al alcanzar las cuentas de referencia, sin error en estado estacionario y sin sobrepaso al regresar a su posición original.

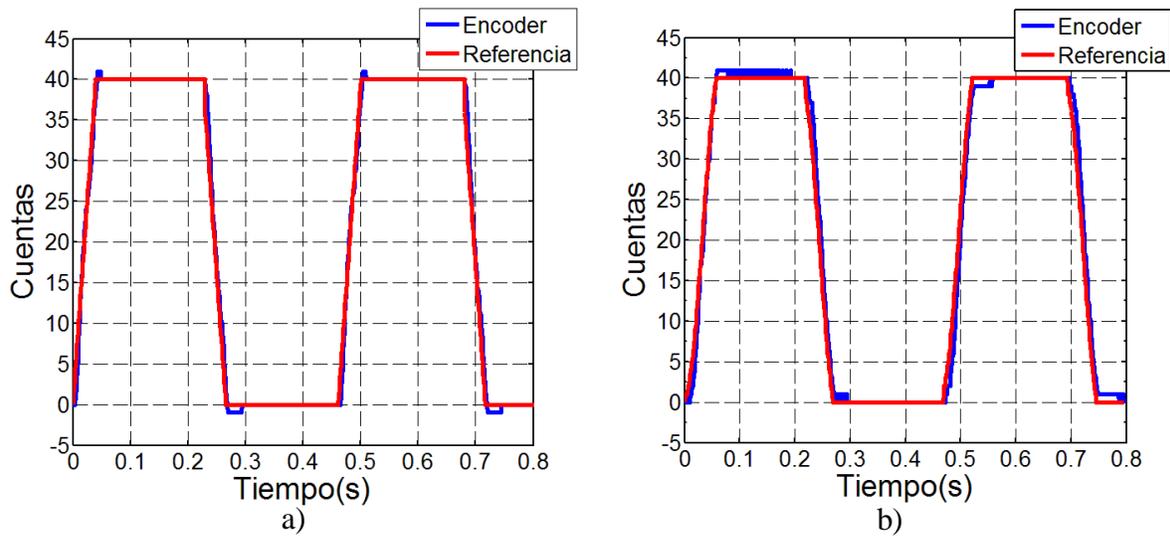


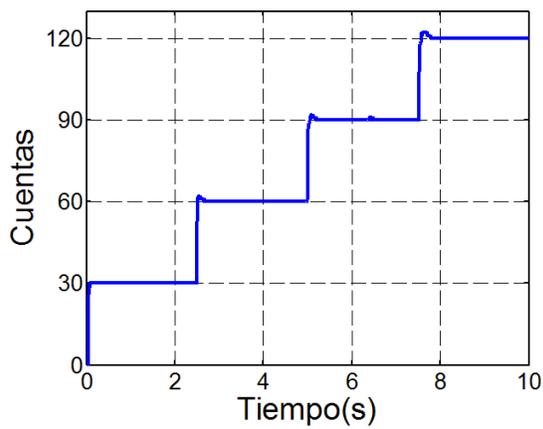
Figura 4.2 a) 40 cuentas eje “X”, b) 40 cuentas eje “Y”.

## 4.2 Resultados de caso de estudio 2.

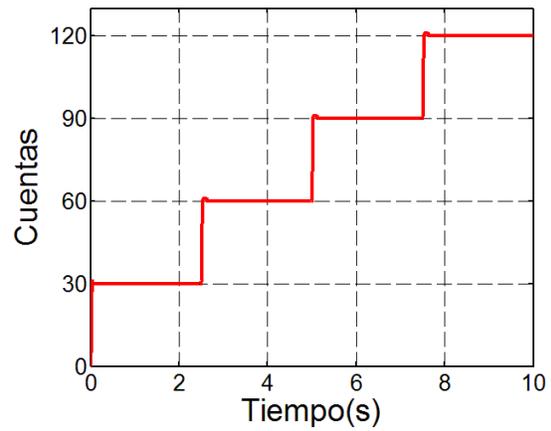
En este caso de estudio se evalúa la repetitividad de ambos controlares realizando un movimiento de ejes independientes que consiste en 4 escalones de 30 cuentas en 10 segundos.

Los resultados obtenidos con ambos controladores se muestran en la figura 4.3. Las pruebas realizadas con el controlador Galil DMC-1832 se muestran en las figuras 4.3 a) y 4.3 c) para el eje “Y” y “X” respectivamente, en el caso del eje “Y” se tiene un comportamiento parecido en cada paso con un sobrepaso máximo de 2 cuentas a excepción del primer escalón donde no presento sobrepaso y presenta una variación de una cuenta en el tercer escalón, alcanzando las 30 cuentas en todos los escalones. En el caso del eje “X” se tiene un sobrepaso máximo de 2 cuentas y alcanzando las 30 cuentas en cada escalón.

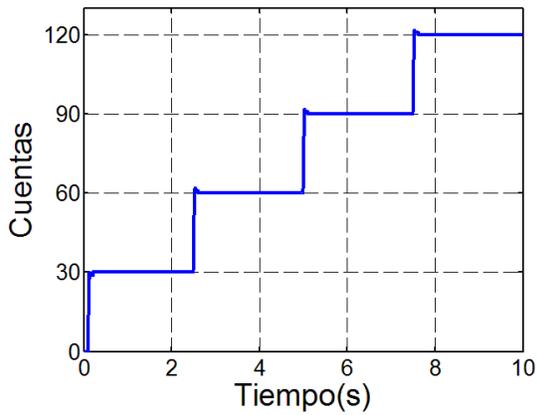
Las pruebas realizadas con el controlador propio basado en FPGA se muestran en las figuras 4.3 b) y 4.3 d) para el eje “Y” y “X” respectivamente, como se puede ver la respuesta es muy similar en cada escalón mostrando buena repetitividad, con un sobrepaso de 1 cuenta y sin error en estado estacionario para ambos ejes.



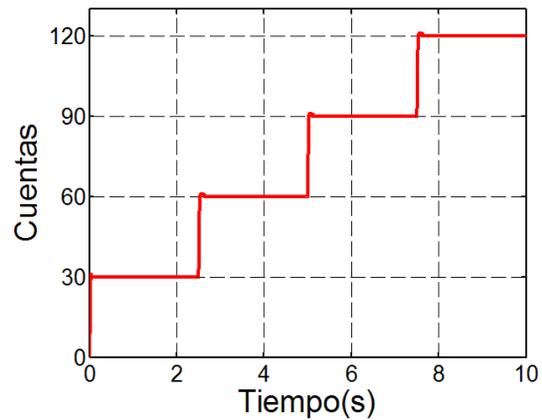
a)



b)



c)



d)

Figura 4.3 a) 30 cuentas Galil eje “Y”, b) 30 cuentas FPGA eje “Y”, c) 30 cuentas Galil eje “X”, d) 30 cuentas FPGA eje “X”.

### 4.3 Resultados de Caso de estudio 3

Como se presento en la sección casos de estudio en esta prueba se realiza una comparación entre la dinámica de movimiento obtenida con el controlador Galil y el controlador propio. Los resultados obtenidos del movimiento planteado utilizando los perfiles de movimiento diseñados para cada controlador, se muestran en las figuras 4.4 y 4.5 para el controlador Galil y el controlador propio respectivamente, recordando que los

perfiles de velocidad, aceleración y jerk se obtuvieron derivando consecutivamente la señal de posición.

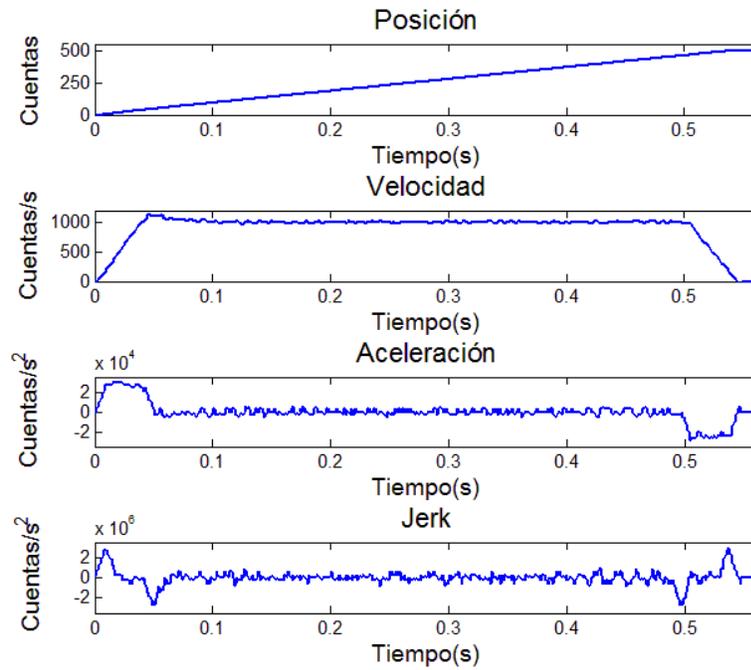


Figura 4.4. Dinámica de movimiento obtenida con controlador Galil DMC-1832.

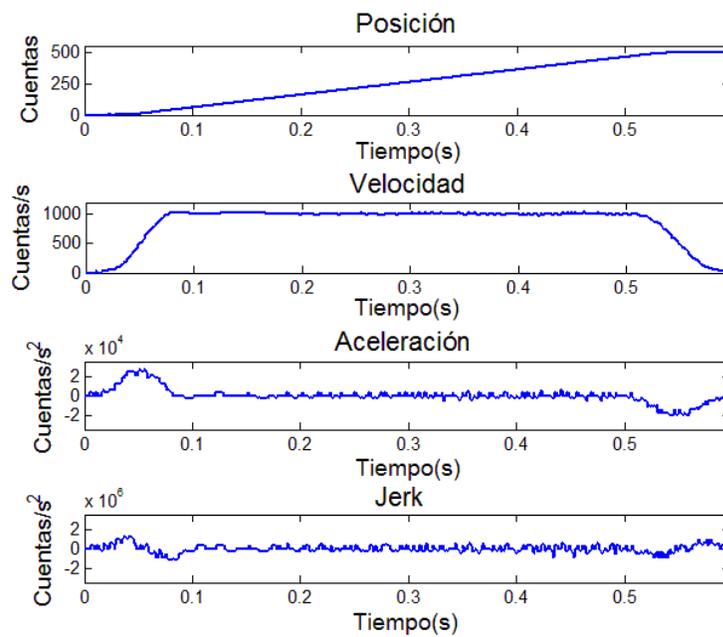


Figura 4.5. Dinámica de movimiento obtenida con controlador propio basado en FPGA.

Comparando la dinámica de movimiento obtenida con el controlador DMC-1832 y el diseño teórico mostrado en la figura 3.17, se observa un comportamiento similar en el perfil de posición, en el perfil de velocidad obtenido se muestra un sobrepaso al llegar a la velocidad máxima y un comportamiento similar al teórico en el resto del perfil, en cuanto al perfil de aceleración se observa en el perfil obtenido que la aceleración máxima no es alcanzada inmediatamente como se muestra en el perfil teórico, sin embargo tiene una tasa de crecimiento alta, esto se refleja en el perfil del jerk obtenido alcanzando una magnitud alta, que en el perfil teórico tiende a infinito.

Comparando la dinámica de movimiento obtenida con el controlador propio y el diseño teórico mostrado en la figura 3.18, se observa un comportamiento similar en el perfil de posición, el perfil de velocidad obtenido se muestra similar al teórico con un pequeño sobrepaso al llegar a la velocidad máxima manteniendo un comportamiento suave, en cuanto al perfil de aceleración se observa parecido al teórico con pequeñas variaciones pero con un comportamiento suave, en el perfil del jerk se puede observar la buena dinámica del movimiento obtenido un comportamiento suave y una magnitud menor a la obtenida con el controlador DMC-1832.

Comparando la dinámica de ambos controladores se aprecia como con el controlador propio se obtienen movimientos más suaves que con el controlador DMC-1832, esto debido a que el controlador propio incluye un generador de perfil polinomial de movimiento.

#### **4.4 Resultados de caso de estudio 4**

Esta prueba consiste en desarrollar un movimiento de ejes combinados realizando el posicionamiento de los puntos de una trayectoria que simula el ensamble de los elementos de la tarjeta optoacopladora utilizada en este trabajo, en la figura 4.6 se muestra la trayectoria obtenida con el controlador Galil DMC-1832 y en la figura 4.7 la trayectoria obtenida con el controlador propio basado en FPGA, en las graficas aparece la referencia del movimiento en color azul y el seguimiento en color rojo, el tamaño de las figuras es aproximadamente igual al tamaño real de la tarjeta.

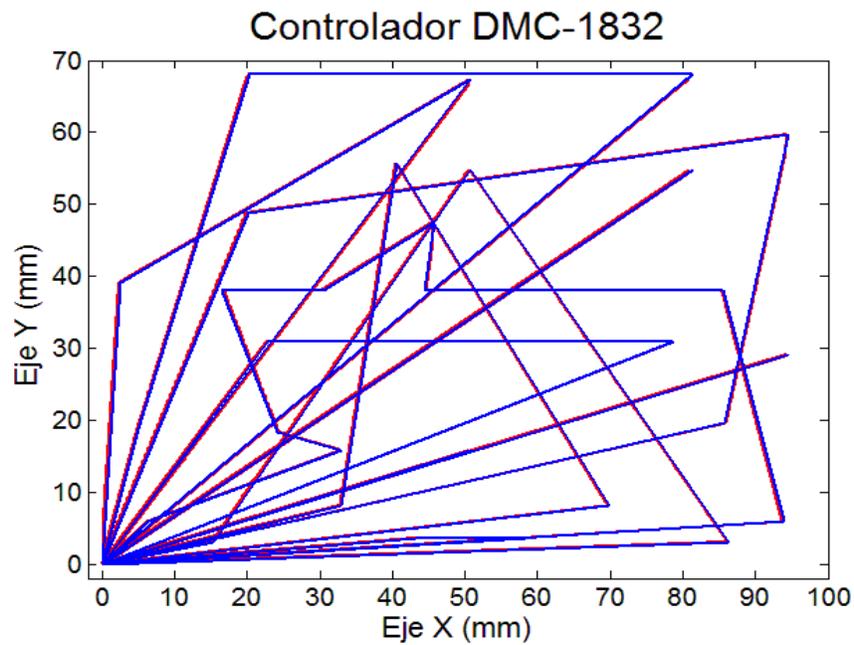


Figura 4.6. Prueba de caso de estudio 4 con controlador Galil DMC-1832.

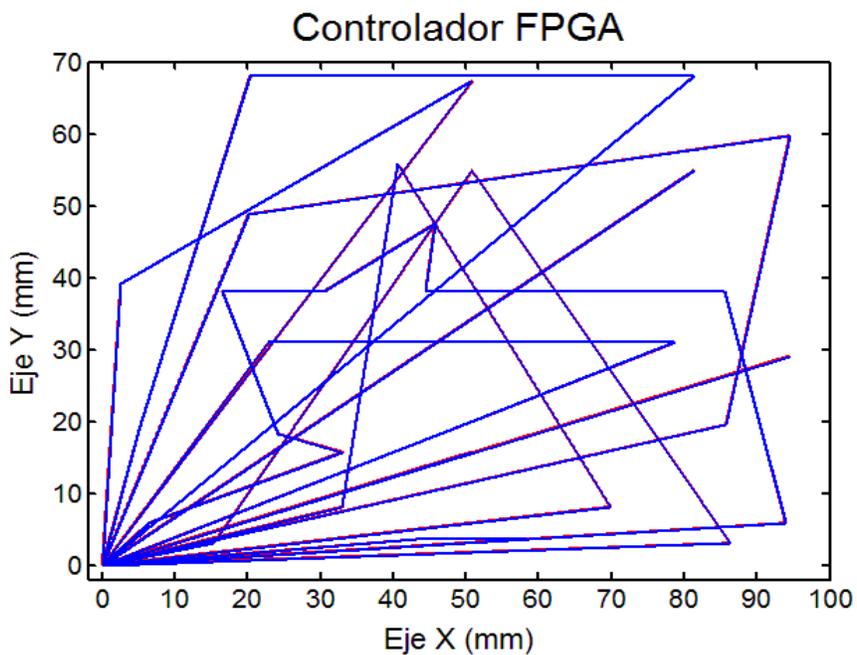


Figura 4.7. Prueba de caso de estudio 4 con controlador propio basado en FPGA.

Como se puede ver a simple vista, el seguimiento del controlador propio basado en FPGA es mucho mejor que el del controlador Galil, en las figuras 4.8 y 4.9 se muestran las

gráficas del error en el seguimiento con el controlador Galil y con el controlador propio respectivamente, el controlador Galil presenta un error máximo de 0.3054 mm, mientras que el controlador propio basado en FPGA presenta un error máximo de 0.0289 mm, el cual es menos de la décima parte del error obtenido con el controlador Galil.

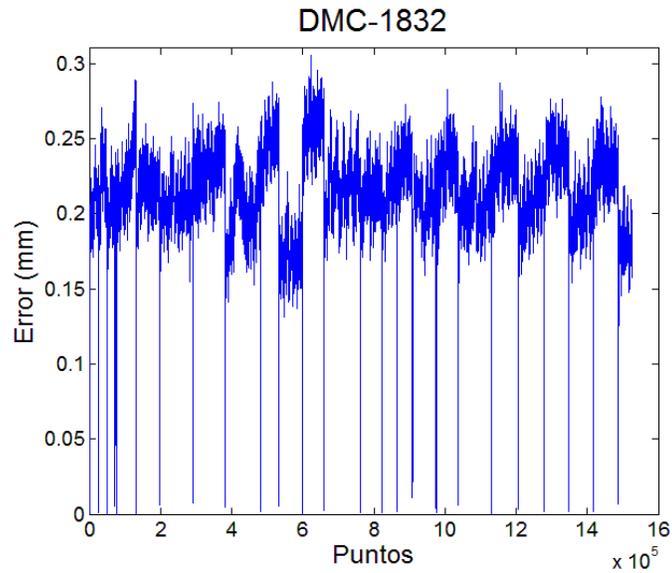


Figura 4.8. Gráfica del error en el seguimiento de la trayectoria con controlador Galil.

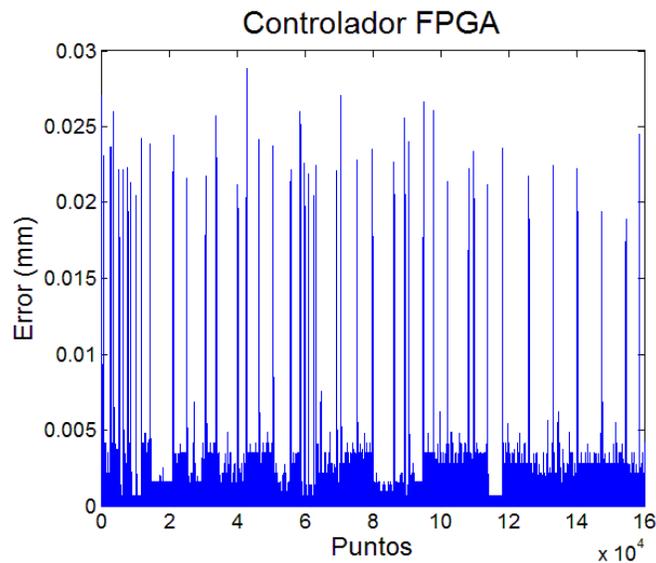


Figura 4.9. Gráfica del error en el seguimiento de la trayectoria con controlador Propio.

## 5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Con el desarrollo de este trabajo se realizó el primer paso hacia el control total de una máquina ensambladora de componentes de chip considerada obsoleta, desarrollando el control en dos de sus ejes, utilizando un controlador propio de movimiento basado en FPGA, el cual tiene una estructura de arquitectura abierta que permitirá la adición de los módulos requeridos para trabajos futuros.

Evaluando el desempeño del sistema en cada una de las etapas de desarrollo del trabajo se obtuvieron buenos resultados, comenzando por la reconversión electromecánica, en la cual se habilitó el movimiento de los ejes con la integración de los elementos faltantes de los sistemas eléctrico y mecánico en los ejes de la máquina, la funcionalidad del sistema fue probada al realizar pruebas de posicionamiento de la platina de la máquina.

La utilización del controlador propio basado en FPGA demostró tener un mejor desempeño que el obtenido con el controlador Galil al evaluar los casos de estudio. En los casos de estudio 1 y 2 se obtuvo un desempeño muy parecido con ambos controladores, siendo mejor el controlador propio.

En el caso de estudio 4 se demostró que el generador del perfil polinomial de sexto grado en posición permite tener un sistema de control con dinámica controlada del movimiento de los ejes de la máquina, pudiendo establecer los valores de velocidad y aceleración máxima. Además al desarrollar la comparativa de la dinámica de movimiento entre el controlador propio y el controlador Galil, se pudo ver que utilizando un perfil polinomial de posición se obtienen movimientos más suaves que producen magnitudes menores en jerk debido al comportamiento suave que presenta en su dinámica, esto en comparación con un perfil convencional como el trapezoidal en velocidad, que por lo regular utilizan los controladores comerciales como el caso de Galil.

En el caso de estudio 4 se observó un mejor desempeño con el controlador propio en movimientos de ejes combinados, obteniendo un error máximo de 0.0289 mm en el

seguimiento de una trayectoria, mientras que con el controlador Galil DMC-1832 se obtuvo un error máximo de 0.3054 mm.

Un punto importante de mencionar es que con el controlador propio se tiene buen control en movimientos de ejes combinados a altas velocidades, contrario al caso del controlador comercial, el cual presentó problemas en la prueba del caso de estudio 4 utilizando velocidades mayores a 10000 cuentas/s, perdiendo el control del motor del eje X a la mitad de la rutina, posiblemente por no poder sintonizar el controlador adecuado para el motor. Como prospectivas se tiene el desarrollo total del sistema de control de la máquina, integrando el control de los ejes desarrollado en este trabajo, siendo necesario desarrollar el control del carrusel encargado de colocar los elementos en la tarjeta y la programación de un software (interfaz de usuario) que permita la operación completa de la máquina a través de una pantalla, en la cual puede ser incluida la interfaz de usuario desarrollada en este trabajo.

## Referencias

Aguado, B. A. 2000. Temas de identificación y control adaptable. Instituto de cibernética, matemática y física Habana Cuba.

Alaniz Lumbreras, P.D. 2003. Instrumentación y control de una máquina herramienta de dos ejes. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Baldor Motors and Drives, Baldor Electric Company. 1998. Servo Facts A Handbook of the Basis of Motion.

Castellanos Galindo, J.J. 2001. Diseño y construcción de una tarjeta de control de arquitectura abierta. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Gomáriz S, Biel Solé C D, Matas Alcalá J, Reyes Moreno M. 2001. Teoría de control Diseño electrónico. Alfaomega.

Hernández Vargas, M. 2006. Diseño para implementación en hardware de un control PID. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Jaen Cuellar, Arturo Y. 2011. Desarrollo de perfiles polinomiales 3D basado en FPGA para control de posición en máquina fresadora CNC. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Morales Velásquez, L. 2007. Unidad de USB de Control de Posición y Generación de Perfiles para un Intercambiador Automático de Herramientas. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Morales Velásquez, L. 2010. Diseño de plataforma hardware-software para el desarrollo de aplicaciones industriales basadas en FPGA. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Moreno Tapia, S.V. 2010. Sistema de control para microprocesamiento basado en FPGA aplicado a muestreo Metalografico. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Ogata Katsuhiko. 2000. Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall, tercera edición.

Osornio Ríos, R.A. 2004. Diseño y construcción de una tarjeta controladora de 3 ejes. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Osornio Ríos R. A, Romero Troncoso R. de J, Herrera Ruiz G, Castañeda Miranda R., Computationally efficient parametric analysis of discrete-time polynomial based

acceleration–deceleration profile generation for industrial robotics and CNC machinery. *Mechatronics*, Elsevier, Vol. 17, 2007, 511-523.

Osornio Ríos R. A., Romero Troncoso R. de J., Herrera Ruiz G., Castañeda Miranda R., The application of reconfigurable logic to high speed CNC milling machines controllers. *Control Engineering Practice*, Elsevier, Vol. 16, 2008, pp 674-684.

Osornio Ríos R. A, Romero Troncoso R. J., Herrera Ruiz G and Castañeda Miranda R. 2009. FPGA implementation of higher degree polynomial acceleration profiles for peak jerk reduction in servomotors. *Robot Cim-Int Manufac*, 25:379-392.

Prasad Ray P. 1997. *Surface Mount Technology*. Kluber Academic Pub, 2ª Edición.

Pallás Areny, Ramón. 2003. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo. 4º Edición.

Ríos Moreno, José G. 2005. *Diseño y construcción de una tarjeta controladora de servomotores mediante el bus ISA*. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

Rivera Guillén, Jesús R. 2007. *Perfiles Polinomiales de Movimiento para Máquinas CNC*. Tesis Maestría. Universidad de Guanajuato. FIMEE.

Rivera Guillén, Jesús R. 2010. *Algoritmos óptimos en FPGA para controlar la dinámica de movimiento en maquinaria CNC*. Tesis Doctorado Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

## Apéndice A

### Actuadores y reductores.

En este apéndice se muestran las hojas de datos de los servomotores seleccionados y reductores.

#### A.1 Motor Copley Control Mod: SSC 23SMDC-LCSS

ELECTROCRAFT BRUSH TYPE DC SERVO MOTOR SPECIFICATIONS	
<b>MOTOR RATINGS</b>	
<b>Continuous Stall Torque</b>	55 oz-in.
<b>Peak Torque</b>	400 oz-in.
<b>Max. Terminal Voltage</b>	60VDC
<b>Max. Operating Speed</b>	6000 RPM
<b>MECHANICAL DATA</b>	
<b>Rotor Inertia</b>	0008 oz-in. /sec/sec
<b>Damping Constant</b>	0.25 oz-in./KRPM
<b>Thermal Resistance</b>	4 Deg. C/Watt
<b>Max. Armature Temp</b>	155 Deg. C
<b>Max. Friction Torque</b>	3 oz-in.
<b>Max. Radial Load (1" from Bearing)</b>	10 lbs.
<b>Weight</b>	3.5 lbs. (motor only)
<b>ELECTRICAL DATA</b>	
<b>Torque Constant</b>	13.7 oz-in./amp
<b>Voltage Constant</b>	10.2 V./KRPM
<b>Terminal Resistance</b>	1.6 Ohms
<b>Electrical Time Constant</b>	2.6 msec.
<b>Mechanical Time Constant</b>	8.9 msec.
<b>Max. Continuous Current</b>	4 Amps



<b>Armature Inductance</b>	4.1 mH.
<b>Max. Peak Current</b>	34 Amps
<b>PRICING &amp; OPTIONS</b>	
<b>Motor with Dual Shaft - P/N 23SMDC-LCSS/Stock No. RDM-103: \$189.00</b>	
<b>H.P. 500 PPR Single Ended Modular Encoder Mounted - P/N HEDS-5640-A06/Stock No. ADC-244: \$82.00</b>	
<b>1000 PPR Line Driver Output Modular Incremental Encoder with 18" Shielded Cable - P/N SSC DA15-1000-5VLD Encoder/Stock No. ADC-256D: \$110.00</b>	
<b>NEMA 23 Mount: \$30.00</b>	

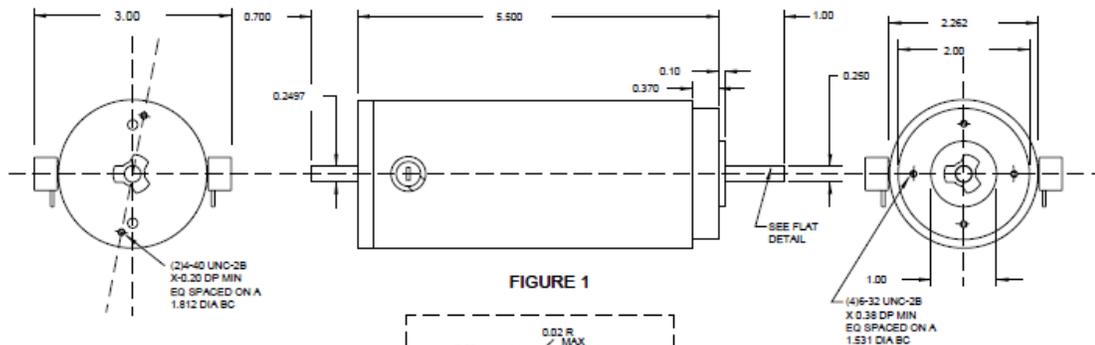
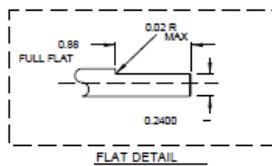
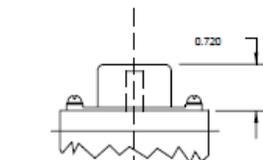


FIGURE 1



FLAT DETAIL



ENCODER SPECS.	
INPUT .....	5 VDC
OUTPUT .....	5V TTL
CHANNELS .....	A,B,Z
RESOLUTION .....	500 PPR
TERMINATION .....	PINS*

\*MATING CONN. SUPPLIED

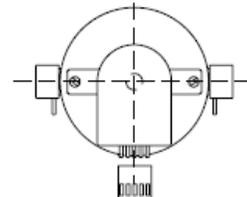


FIGURE 2



4 HOLES EQUALLY SPACED COUNTERSINK ON A 1.531 DIA. BC..

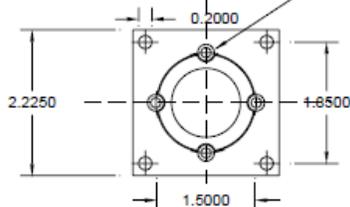
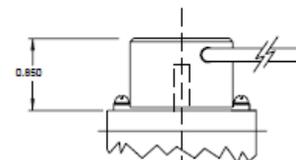


FIGURE 3



ENCODER SPECS.	
INPUT .....	5 VDC
OUTPUT .....	5V LINE DRIVER
CHANNELS .....	A,B,Z WITH COMP.
RESOLUTION .....	1000 PPR
TERMINATION .....	3FT CABLE

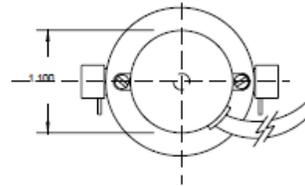


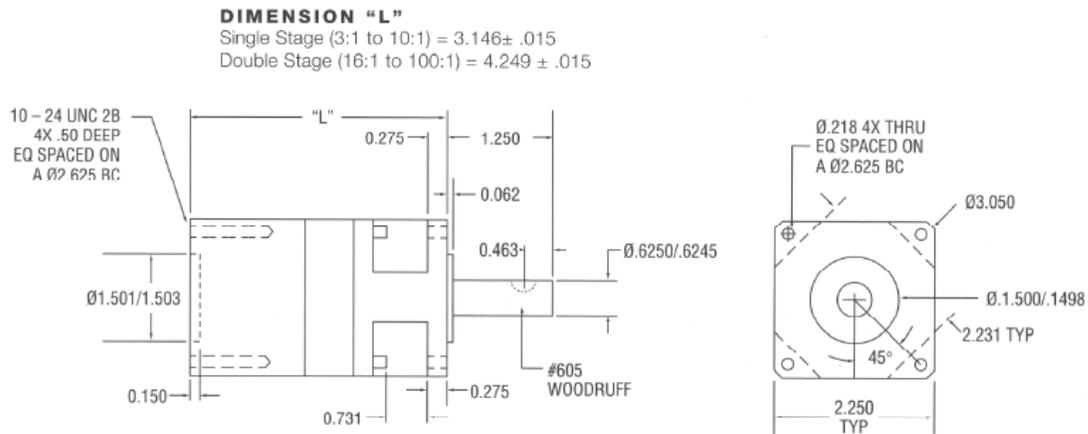
FIGURE 4

## A.2 Reductor de engrane planetario Carson para Motor de eje Y

### SERVO SYSTEMS CO.

#### Carson Mfg. Gearheads

#### Size 23 Precision Planetary Dimensions

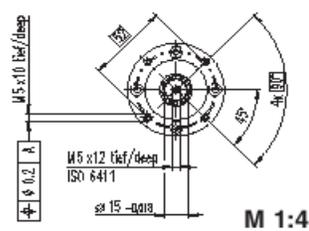
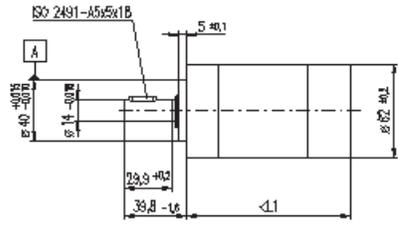




# A.4 Reductor de engrane planetario Maxon para Motor de eje X

## Planetary Gearhead GP 62 A Ø62 mm, 8 - 50 Nm

maxon gear



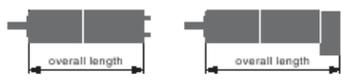
Technical Data	
Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	steel
Bearing at output	ball bearing
Radial play, 7 mm from flange	max. 0.08 mm
Axial play	max. 1 mm
Max. permissible axial load	120 N
Max. permissible force for press fits	1000 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 3000 rpm
Recommended temperature range	-30 ... +140°C
Number of stages	1 2 3
Max. radial load, 24 mm from flange	240 N 360 N 570 N

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

### Order Number

110499	110501	110502	110503	110504	110505	110506	110507	110508
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Gearhead Data		110499	110501	110502	110503	110504	110505	110506	110507	110508
1 Reduction		5.2 : 1	19 : 1	27 : 1	35 : 1	71 : 1	100 : 1	139 : 1	181 : 1	236 : 1
2 Reduction absolute		$\frac{57}{11}$	$\frac{3081}{187}$	$\frac{3249}{121}$	$\frac{1539}{44}$	$\frac{236235}{3178}$	$\frac{204807}{2057}$	$\frac{185193}{1531}$	$\frac{87723}{484}$	$\frac{4153}{176}$
3 Max. motor shaft diameter	mm	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4 Number of stages		1	2	2	2	3	3	3	3	3
5 Max. continuous torque	Nm	8	25	25	25	50	50	50	50	50
6 Intermittently permissible torque at gear output	Nm	12	37	37	37	75	75	75	75	75
7 Max. efficiency	%	80	75	75	75	70	70	70	70	70
8 Weight	g	950	1250	1250	1250	1540	1540	1540	1540	1540
9 Average backlash no load	°	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
10 Mass inertia	gcm <sup>2</sup>	109	100	105	89	104	105	102	88	89
11 Gearhead length L1	mm	72.5	88.3	88.3	88.3	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2



maxon Modular System														
+ Motor	Page	+ Sensor	Page	Brake	Page	Overall length [mm] = Motor length + gearhead length + (sensor / brake) + assembly parts								
RE 50, 200 W	83					180.6	196.4	196.4	196.4	212.3	212.3	212.3	212.3	212.3
RE 50, 200 W	83	HEDS 5540	267			201.3	217.1	217.1	217.1	233.0	233.0	233.0	233.0	233.0
RE 50, 200 W	83	HEDL 5540	269			201.3	217.1	217.1	217.1	233.0	233.0	233.0	233.0	233.0
RE 50, 200 W	83	HEDL 9140	272			243.0	258.8	258.8	258.8	274.7	274.7	274.7	274.7	278.7
RE 50, 200 W	83			AB 44	322	243.0	258.8	258.8	258.8	274.7	274.7	274.7	274.7	278.7
RE 50, 200 W	83	HEDL 9140	272	AB 44	322	256.0	271.8	271.8	271.8	287.7	287.7	287.7	287.7	287.7
EC 45, 250 W	157					216.6	232.4	232.4	232.4	248.3	248.3	248.3	248.3	248.3
EC 45, 250 W	157	HEDL 9140	271			232.2	248.0	248.0	248.0	263.9	263.9	263.9	263.9	263.9
EC 45, 250 W	157	Res 26	277			216.6	232.4	232.4	232.4	248.3	248.3	248.3	248.3	248.3
EC 45, 250 W	157			AB 28	319	224.0	239.8	239.8	239.8	255.7	255.7	255.7	255.7	255.7
EC 45, 250 W	157	HEDL 9140	271	AB 28	319	241.0	256.8	256.8	256.8	272.7	272.7	272.7	272.7	272.7

## Apéndice B

### Tarjetas del controlador.

En este apéndice se muestran las hojas de datos de las tarjetas que componen el controlador

#### B.1 UPDSH

##### UPDSH

DM0002-v1

---

##### Unidad de Procesamiento Digital de Señales en Hardware

---

###### Características

- Contiene un FPGA de la familia Spartan-3E
- Acepta Spartan-3E-/500/1200/1600
- Contiene una RAM estática IS61LV5128AL de 4Mb
- Contiene una RAM dinámica MT48LC16M16A2 de 256 Mb
- Requiere alimentación de 5V
- Incluye interfaz de programación JTAG
- Incluye la memoria flash de programación para el FPGA

###### Descripción

Este sistema tiene como objetivo servir de procesador digital de señales en hardware, contando con los elementos básicos para utilizar el FPGA. El sistema contiene dos memorias, una RAM estática pensada para el uso como buffer gráfico y otra RAM dinámica para el procesamiento de señales. Además los conectores están basados en el formato de pines de salida de la tarjeta Spartan-3, lo que permite reutilizar tarjetas ya desarrolladas.

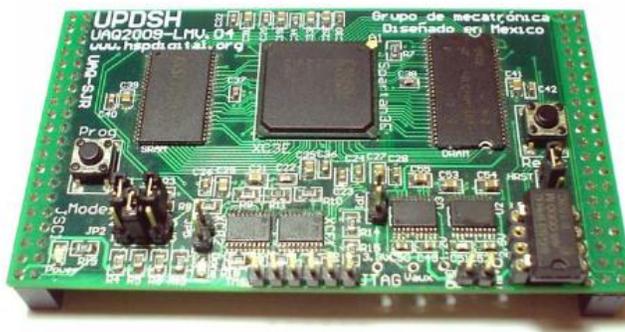


Figura 1 Diseño PCB del sistema UPDSH

## Terminales del sistema UPDSH

El sistema tiene dos conectores principales JSC1 y JSC2, ambos conectores son tipo receptáculo, debe tenerse cuidado de no insertar el módulo al revés en la tarjeta de aplicación.

El módulo esquemático del sistema se muestra en la Figura 2, cuenta con 2 partes. La parte A contiene las terminales del conector JSC1. La parte B contiene las terminales del conector JSC2. Ambas partes contienen 37 I/O libres y corresponde a un conector tipo tira de pines para la tarjeta de aplicación. Tanto el conector JSC1 como el JSC2 están estandarizados al formato de pines de la tarjeta Spartan-3.

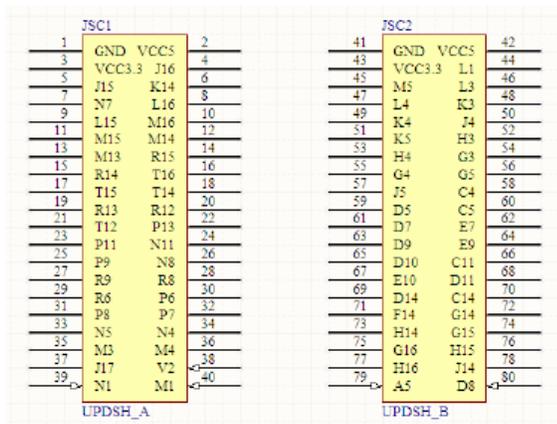


Figura 2 Módulo esquemático de la unidad UPDSH desde el punto de vista de la tarjeta de aplicación.

La nomenclatura de los pines en el esquemático corresponde a la terminal del FPGA conectada a cada terminal.

La terminal del oscilador montado en la tarjeta es B8 y el reset montado en la tarjeta corresponde al A15.

La terminal K2 está pensada para un reset general desde el backplane. Las terminales M3, M4, y J17 están pensadas para una interfaz SPI o I2C y las terminales M1, N1 y V2 como identificadores del slot donde se asigna la dirección de los tres bits menos significativos en el bus.

```
NET "CLK" LOC = "B8" ;
NET "RST" LOC = "A15" | PULLDOWN ;
```

SRAM

DRAM

Nombre	FPGA pin	SRAM pin
D0	T18	9
D1	R16	10
D2	R18	13
D3	P17	14
D4	V12	31
D5	R11	32
D6	V9	35
D7	U9	36
A0	L2	3
A1	P1	4
A2	P2	5
A3	R2	6
A4	T1	7
A5	N18	16
A6	M18	17
A7	L17	18
A8	L18	19
A9	K15	20
A10	T17	26
A11	U18	27
A12	U15	28
A13	V15	29
A14	V13	30
A15	T5	38
A16	U5	39
A17	R3	40
A18	R5	41
CE	T2	8
OE	T8	37
WE	P18	15

Nombre	FPGA pin	DRAM pin
DQ0	C3	2
DQ1	A4	4
DQ2	B4	5
DQ3	A6	7
DQ4	B6	8
DQ5	C7	10
DQ6	A8	11
DQ7	C9	13
DQ8	E1	42
DQ9	E2	44
DQ10	F1	45
DQ11	F2	47
DQ12	H1	48
DQ13	H2	50
DQ14	J1	51
DQ15	J2	53
A0	B14	23
A1	B16	24
A2	A16	25
A3	C17	26
A4	H17	29
A5	F15	30
A6	F18	31
A7	F17	32
A8	D16	33
A9	D17	34
A10	A14	22
A11	C18	35
A12	C1	36
BA0	A13	20
BA1	B13	21
CS	E13	19
WE	B10	16
CAS	A11	17
RAS	B11	18
DQML	A10	15
DQMH	D2	39
CLK	D1	38
CKE	C2	37

Conector JSC1

FPGA pin	Conector JSC1		FPGA pin
N1	39	40	M1
J17	37	38	V2
M3	35	36	M4
N5	33	34	N4
P8	31	32	P7
R6	29	30	P6
R9	27	28	R8
P9	25	26	N8
P11	23	24	N11
T12	21	22	P13
R13	19	20	R12
T15	17	18	T14
R14	15	16	T16
M13	13	14	R15
M15	11	12	M14
L15	9	10	M16
N7	7	8	L16
J15	5	6	K14
Vcc3.3	3	4	J16
GND	1	2	Vcc5

Conector JSC2

FPGA pin	Conector JSC2		FPGA pin
A5	39	40	D8
H16	37	38	J14
G16	35	36	H15
H14	33	34	G15
F14	31	32	G14
D14	29	30	C14
E10	27	28	D11
D10	25	26	C11
D9	23	24	E9
D7	21	22	E7
D5	19	20	C5
J5	17	18	C4
G4	15	16	G5
H4	13	14	G3
K5	11	12	H3
K4	9	10	J4
L4	7	8	K3
M5	5	6	L3
Vcc3.3	3	4	L1
GND	1	2	Vcc5

## B.2 DAS1612

### DAS1612

DM0001

---

#### Sistema de adquisición de datos de 12 o 16 bits

---

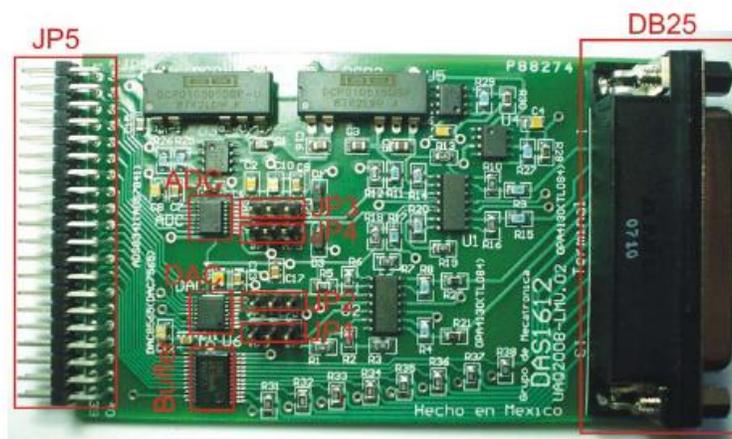
##### Características

- Disponible en 2 versiones: DAS1612a (12 bits) y DAS1612b (16 bits).
- 2 canales analógicos de entrada
- 2 canales analógicos de salida
- 8 entradas digitales
- Entradas y salidas analógicas estandarizadas ( $\pm 10V$ )
- Convertidor ADC a 50Ksmp por canal
- Convertidor DAC a 100Ksmp por canal



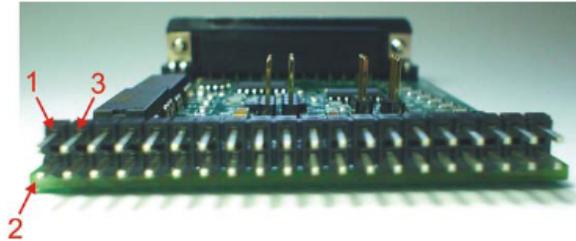
##### Descripción

El sistema DAS1612 está diseñado para su uso en sistemas de instrumentación y control con FPGA. El sistema es compatible con la tarjeta Spartan3 de Digilent-Xilinx.



## Asignación de terminales

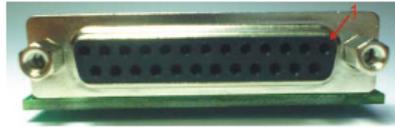
Conector JP5



Nombre	Pin	Spartan3			Opciones
		A1*	A2	B1	
GND	1				Tierra común
Vcc5V	2				Alimentación
Vcc3.3V	3				Alimentación
ENC_AX+	28	E4	A10	G15	
ENC_AX-	26	F4	A9	E16	
ENC_BX+	24	G4	B8	D16	
ENC_BX-	22	M10	B7	C16	
ENC_AY+	27	G5	B10	F15	
ENC_AY-	25	E3	A8	E15	
ENC_BY+	23	F3	A7	D15	
ENC_BY-	21	M7	B6	C15	
DAC_DIN	15	C2	D10	R7	SLEW = SLOW
DAC_LDAC	19	B1	B5	M6	SLEW = SLOW
DAC_RST	17	C1	B4	N6	SLEW = SLOW
DAC_SCLK	13	R5	D8	T7	SLEW = SLOW
DAC_SYNC	11	T5	D7	R10	SLEW = SLOW
ADC_DCLK	9	R6	D5	P10	SLEW = SLOW
ADC_BUSY	5	N7	E7	T3	SLEW = SLOW
ADC_DIN	7	T8	D6	N11	SLEW = SLOW
ADC_DOUT	4	N8	E6	C10	SLEW = SLOW

\* No usar este puerto si se usa la memoria SRAM de la tarjeta Spartan3.

*Conector DB25*

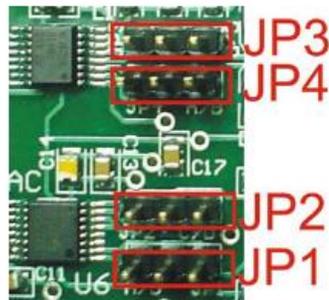


Nombre	Pin	Cable estandarizado
<b>Eje X</b>		
GND	1	
REF+	5	Naranja
REF-	17	Verde
ADC	3	Amarillo
AGND	15	Azul
VCC	18	Rojo
VCC	19	Rojo
GND	20	Negro
GND	21	Negro
A+	12	Café
A-	10	Blanco
B+	8	Morado
B-	6	Gris
<b>Eje Y</b>		
REF+	4	Naranja
REF-	16	Verde
ADC	2	Amarillo
AGND	14	Azul
VCC	22	Rojo
VCC	23	Rojo
GND	24	Negro
GND	25	Negro
A+	13	Café
A-	11	Blanco
B+	9	Morado
B-	7	Gris
GND	Shield	

### Configuración de la tarjeta

Ya que los convertidores son de 4 canales, solo se usan 2 a la vez, si por alguna razón alguna de las terminales se llega a dañar, es posible usar uno de los canales que no está en uso. La configuración de los canales se explica a continuación.

*Jumpers de configuración*



Terminal	Jumper	Configuración	Descripción
REF+ eje X	JP1	ChB <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ChA <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	La terminal REF+ toma el valor del DAC dependiendo de la posición del jumper.
REF+ eje Y	JP2	ChD <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> ChC <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	La terminal REF+ toma el valor del DAC dependiendo de la posición del jumper.
ADC eje X	JP3	Ch3 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Ch2 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	La terminal ADC se convierte en el canal seleccionado dependiendo de la posición del jumper.
ADC eje Y	JP4	Ch1 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Ch0 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	La terminal ADC se convierte en el canal seleccionado dependiendo de la posición del jumper.