INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETATO

REPORTE DE RESIDENCIA PROFESIONAL

CONTROL CON FPGA DE CONVERTIDORES RESOLVER/DIGITAL, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PCB´S PARA FRESADORA DE CNC DE ALTA VELOCIDAD DE 3 EJES.

Residente:

NESTOR FAUSTINO MORALES MAGDALENO

ING. ELECTRÓNICA

Responsable del Proyecto:

M.C. PERLA YAZMÍN SEVILLA CAMACHO

Asesor interno:

ING. ALVARO HERNÁNDEZ SOL

JULIO DE 2010; TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

CAPÍTULO PRIMERO:

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de manufactura con operación de corte se realizan a través de máquinas herramientas, sean parcial o totalmente automatizadas. Realizándose esta automatización por medio del Control Numérico por Computadora (CNC). Sin embargo, la efectividad de los equipos de alta velocidad de corte no ha sido la esperada, debido al desgaste que sufre la herramienta de corte durante el proceso, provocando así pérdidas tanto en la misma maquinaria como en la producción.

Los motores de las máquinas herramientas son controlados a través de servo amplificadores capaces de conmutar las fases de alimentación para proporcionar mayor torque y así dar una mayor precisión en el diseño que se desea realizar. Los servo amplificadores reciben señales de control del CNC con un lazo de retroalimentación proporcionado por los codificadores de posición angular para llevar a cabo un control lo más óptimo posible en los motores.

El control que se proporciona debe ser lo más preciso posible, ya que de ello depende su operación de corte en la pieza, de tal forma que se pueda reducir al mínimo los problemas que se puedan presentar en funcionamiento en la maquinaria o en la producción misma, sobre todo en las de alta velocidad de corte.

1.2 ANTECEDENTES

A través del tiempo se han ido desarrollando investigaciones respecto a las condiciones de las herramientas de maquinado tradicional, pero para los sistemas de maquinado de alta velocidad aun no se han realizado investigaciones sobre la ruptura en la herramienta de corte y poder dar solución tecnológicamente eficiente a este problema.

Para desarrollar la investigación sobre el diseño de sistemas de detección de las condiciones de las herramientas de corte en máquina-herramientas de alta velocidad por CNC, es necesario tener muestras de algunas señales durante el proceso de maquinado para poder realizar un análisis.

Sin embargo la máquina-herramienta cuenta con un sistema retroalimentado de control de posición independiente entre los ejes, además de que el sistema no cuenta con salida de monitoreo de corriente de los motores de avance, punto necesario para la adquisición de señales a procesar sin el uso de sensores, para la implementación de sistemas de detección de fallas en las herramientas de corte. También es importante mencionar que el manejo del sistema tiene complicaciones por su grado de de complejidad.

Debido a estas limitantes es necesaria realizar una reingeniería en su automatización, esto presentará grandes ventajas de reducción de costos para la implementación de una máquina-herramienta de CNC, facilitando el manejo y monitoreo del sistema y uniendo el control de los 3 ejes.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Algunas máquinas-herramientas presentan incompatibilidad en los sistemas de detección de la posición angular de los motores de los ejes, siendo esto un impedimento para su reingeniería de control. Es por ello que en este trabajo se pretende convertir las señales de posición angular de tipo resolver a tipo encoder para establecer una comunicación de posición y control entre cada uno de los ejes de la máquina y el controlador.

Con el desarrollo de este trabajo, los motores que contengan un sistema de detección de posición angular de tipo resolver ya no serán un impedimento para poder implementarlos en las máquinas herramientas debido a la incompatibilidad de ambos sistemas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Convertir las señales de posición angular de tipo resolver de cada uno de los ejes de la máquina-herramienta de alta velocidad a señales de tipo encoder, como parte fundamental de una futura reingeniería de control.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Corregir el cableado del panel de distribución de alimentación trifásica.
- Construir PCB's para los dispositivos oscilador y emulador de encoder.
- Diseñar en lenguaje VHDL un programa para la generación de señales de control e implementar el diseño en un FPGA.
- Realizar pruebas finales para verificar el funcionamiento de todo el sistema.

1.5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA

El proyecto se llevará a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en el laboratorio de Mecatrónica 2 del área de investigación y posgrado de la facultad de ingeniería. En dicho laboratorio se cuenta con el equipo necesario para realizar el proyecto, ya que será necesario un osciloscopio digital para observar las señales del encoder, del resolver y las señales de control del FPGA. Para la alimentación de las tarjetas de conversión será necesario el uso de una fuente simétrica de 5v, y un multimetro para verificar voltajes. Así como también una tarjeta de desarrollo (Spartan – 3A) y otros materiales básicos.

La máquina-herramienta de alta velocidad ubicada en el laboratorio de mecatrónica 2 y actualmente disponible en la UAQ para realizar esta investigación planteada fue proporcionada con fines de investigación por el centro de investigación por el Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro (CIATEQ).

1.6 PROBLEMAS A RESOLVER

Para la realización de este proyecto, este puede dividirse en tres secciones principales a resolver. A continuación se describen cada una de estas secciones:

Primeramente identificar los componentes que se encuentran en el tablero de distribución eléctrica para realizar una investigación sobre su conexión apropiada y poder realizar el cableado.

Investigar acerca del tipo de codificadores de posición angular y sus diferencias para comprender el porqué es necesaria la conversión R/D. Así como también investigar acerca de los dispositivos de conversión y generación de señal sinusoidal, realizar el diseño y construcción de los PCB´s y profundizar en el lenguaje VHDL para generar las señales de control de los convertidores R/D..

Y finalmente interconectar los diferentes sistemas utilizados y medir voltajes correspondientes en el tablero de distribución.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.7.1 Alcances

Se investigará acerca de los componentes del tablero de distribución y se realizará un diagrama de conexión para suministrar alimentación trifásica a los motores.

También se analizará el uso y la importancia del convertidor R/D y del oscilador para crear un PCB correspondiente para realizar la emulación de encoder para conocer la posición angular del motor.

Además se estudiará el lenguaje descriptivo de circuitos VHDL para crear un código que genere las señales de control necesarias para el funcionamiento del convertidor R/D, y dicho código se implementará en un FPGA.

Finalmente se interconectarán los sistemas construidos y se observará que efectivamente se pueden convertir las señales de resolver a encoder para conocer la posición del motor y de esta manera lograr la compatibilidad de los sistemas.

1.7.2 Limitaciones

El proyecto será válido en el periodo de tiempo determinado, siendo este periodo aproximadamente de 5 meses, así como se mencionó en el cronograma de actividades de la residencia profesional.

Parte de la información necesaria para el proyecto será proporcionada por la UAQ, al igual que algunos datos fundamentales, materiales básicos y el equipo, para cumplir satisfactoriamente su realización.

La decisión de la implementación del proyecto desarrollado, queda a discreción de la Facultad de Ingeniería.

1.8 METODOLOGIA DEL EXPERIMENTO

Se procederá a conocer el sistema que contiene la máquina-herramienta y determinar la problemática para después realizar una propuesta de solución y poder mejorar el sistema.

Después se buscará información acerca de los tableros de distribución trifásicos para determinar que conexión es la más adecuada, para nuestro sistema retroalimentado de control de posición de los motores de avance.

Una vez determinado el servo-driver adecuado para el control de los motores, se realizará la construcción de un PCB para hacer que el codificador de posición de tipo resolver sea compatible con el CNC.

Para que los convertidores de señales operen deben ser controlados a través de señales que se generarán en un FPGA, por medio de un algoritmo descrito en lenguaje VHDL.

Finalmente se conectará el codificador de posición del motor con su respectivo codificador controlado por el FPGA y se observarán las señales resultantes de dicha operación.

CAPÍTULO SEGUNDO:

FUNDAMENTO TEORICO

2.1 TABLEROS DE DISTRIBUCIÓN Y AUXILIARES

El tablero es un recinto que rodea o aloja un equipo eléctrico, con el fin de protegerlo contra las condiciones externas y prevenir a las personas de contacto accidental con partes vivas (energizadas). Las instalaciones interiores estarán protegidas y controladas según los casos por tableros de distribución y auxiliares.

Otra definición sería que son cajas que alojan los elementos de distribución y protección de los alimentadores y/o circuitos derivados de una instalación. Estos serán ubicados de acuerdo a las necesidades de carga de cada instalación. Las dimensiones estarán en función de los alimentadores y/o circuitos que se alojan en cada tablero.

Los tableros deberán tener como mínimo las siguientes características:

- Los tableros deberán ser de material incombustible y no higroscópico, en caso de plancha metálica su espesor debe ser suficiente para asegurar su rigidez con un mínimo de 1mm.
- Los tableros metálicos deberán tener base aisladora para el montaje de los diferentes dispositivos.
- La plancha metálica deberá tener conexión a tierra.
- Los tableros metálicos deben protegerse con dos capas de pintura, una anti oxidación y otra de acabado.

Las principales funciones de un tablero de distribución eléctrica son las siguientes:

1. Distribuir la energía eléctrica a diversos circuitos o ramales, según las necesidades del usuario.
2. Proteger en forma independiente cada circuito o ramal contra cortocircuitos y/o sobrecargas.
3. Proveer a cada instalación eléctrica de circuitos independientes para su conexión o desconexión, sin afectar a otro circuito de la misma red o instalación.

2.1.1 Principales Componentes de un Tablero de Distribución

Se presenta una descripción detallada del funcionamiento y características específicas de cada componente básico del tablero de distribución de CA de la máquina herramienta de alta velocidad.

Interruptores Termo magnéticos:

Poseen un sistema magnético de respuesta rápida ante subidas abruptas en la corriente (cortocircuitos), y una protección térmica que se desconecta ante una subida de la corriente más lenta como una sobrecarga.

Se usan para proteger cada circuito de la instalación, y evitar sobrecalentamientos en la misma. Se requiere un interruptor por circuito. Es por esto que se tiene uno principal como el se observa en la figura 2.1 y cuatro más para cada uno de los servomotores utilizados mostrado en la figura 2.2.

Interruptor termo magnético principal: Square D, VL250 de 600 VAC a 100 A.

Figura 2.1 Interruptor Termo magnético tripolar Principal.

Interruptor Termo magnético para cada uno de los servomotores: ABB, SG3 de 230VAC a 40 A.

Figura 2.2 Interruptor termo magnético tripolar para cada servomotor.

Contactores Principales:

Son contactos instantáneos cuya función específica es establecer o interrumpir el circuito principal, a través del cual se transporta la corriente desde la red a la carga, por lo cual deben estar debidamente calibrados y dimensionados para permitir el paso de intensidades requeridas por la carga sin peligro de deteriorarse. Por su función, son contactos únicamente abiertos. Las características del contactor que se muestra en la figura 2.3 son: SIRIUS 3R, SIEMENS de 440 VAC a 630 A.

Figura 2.3 Contactor Principal.

Contactores Auxiliares:

Son aquellos contactos cuya función específica es permitir o interrumpir el paso de corriente a las bobinas de los contactos o a los elementos de señalización, por lo cual están diseñados para intensidades débiles. Éstos actúan tan pronto se energiza la bobina a excepción de los retardos. Sus características son: CAWM4, WEG, bobina de 110 VAC a 20 A. Mostrado en la figura 2.4.

Figura 2.4 Contactor auxiliar para control e indicadores.

Reactores de Línea:

También conocidos como **Filtros de armónica**, estos elementos aumenta la impedancia de fuente para una carga individual (como un accionamiento de frecuencia variable). Se conectan en serie con una carga productora de armónicas, como un accionamiento de velocidad ajustable. Aumentando la impedancia de fuente, se puede reducir la magnitud de la distorsión armónica para la carga a la que se añade el reactor.

Los reactores de línea siempre se recomiendan para sistemas de accionamiento, puesto que reducen las armónicas justo en la entrada del accionamiento y, así, ayudan a reducir el coste de cualquier filtraje de armónicos corriente arriba que deba existir. Además, los reactores de línea protegerán los inversores de fuente de tensión de sobretensiones pasajeras que, de otra forma, podrían causar el disparo inadvertido o dañar los rectificadores de entrada. Las características del que se muestra en la figura 2.5 son: Reactor trifásico, BALDOR de 800 VAC a 12 A de 1.25mH.

Figura 2.5 Reactor de línea.

2.2 TABLERO DE CONTROL

En la industria como en sistemas residenciales es común centralizar el control y la visualización del sistema eléctrico en tableros que permiten simplificar la funcionalidad de operación.

Los tableros de control permiten ordenar, proteger y controlar su sistema eléctrico. Su diseño depende de las especificaciones del cliente y las especificaciones particulares de su sistema eléctrico, por las siguientes clasificaciones:

Descripción: Redes eléctricas, máquinas, motores y procesos industriales.

Aplicaciones: Espacio reducido, fácil montaje, orden, protección y control, fácil mantenimiento y un precio muy razonable.

También dependiendo de la aplicación o descripción es donde se puede valorar si su instalación es necesaria.

2.2.1 Elementos de un Tablero de Control de 3 Botones

El tablero de control de 3 botones se muestra en la figura 2.6, sus elementos y funciones son:

Figura 2.6. Tablero de control eléctrico de la máquina-herramienta.

- **Inicio de sistema**. Es el botón verde, el cual cuenta con luz interna que se activa para indicar su funcionamiento. Su modo de operación es normalmente abierto. La función de este botón es arrancar el suministro eléctrico a todo el sistema.
- **Paro del sistema.** Es el botón rojo, el cual cuenta con luz interna que se activa para indicar su funcionamiento. Su modo de operación es normalmente cerrado. La función de este botón es interrumpir el suministro eléctrico a todo el sistema.
- **Paro de emergencia.** Es el botón rojo más grande para facilidad de presión, no cuenta con luz interna. Su modo de operación también es normalmente cerrado. La función de este botón es interrumpir el suministro eléctrico a todo el sistema. Este paro puede ser accionado en caso de presentarse alguna irregularidad durante el proceso de maquinado.

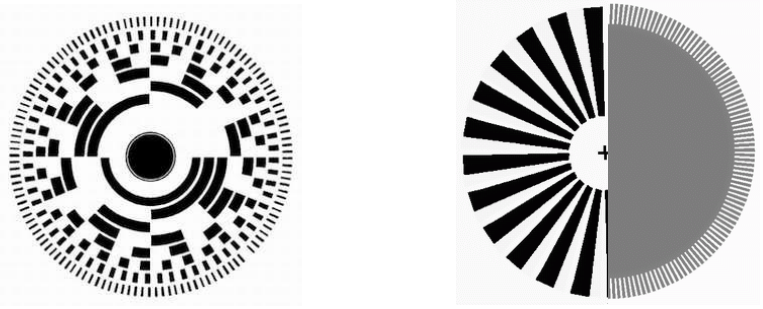
2.3 TRANSDUCTORES DE POSICIÓN ANGULAR

Los transductores de la posición angular de un eje son componentes fundamentales en la tecnología de control. Es difícil encontrar sistemas mecánicos industriales automatizados que no tengan varios ejes de movimiento angular o lineal. Utilizando un acoplamiento directo o algún tipo de acoplamiento mecánico que realice la adaptación, un codificador de la posición angular se puede utilizar en el monitoreo de cualquier tipo de desplazamiento.

Algunos tipos de transductores de posición angular de eje que son comunes en control industrial son potenciómetros, codificadores ópticos incrementales y absolutos y resolvers.

2.3.1 Codificadores Ópticos ó Encoders

El encoder óptico es un sensor que permite detectar el movimiento de rotación de un eje, convierte una magnitud (posición lineal y angular) en una señal digital, es decir, opera solidario al eje del elemento cuya posición se desea determinar y se dividen en 2 grupos, incrementales absolutos, a continuación se muestran en los incisos a y b de la figura 2.7.



a) Discos de codificador absoluto. b) Discos de codificador incremental.

Figura 2.7 Discos decodificadores.

Los encoders utilizan opto acopladores para obtener la medición y detecta la presencia o ausencia de luz a través de un disco solidario al eje, con ranuras radiales.

Por razones de precisión óptica, la codificación se suele hacer en una codificación llamada **código Gray**, que luego se traduce en el código binario estándar que utiliza una computadora para sus cuentas.

Dos desventajas de encoders incrementales son que al encender el sistema no se sabe la posición y que la interferencia eléctrica puede causar conteos falsos.

2.3.2 Resolvers

Esencialmente son transformadores rotativos diseñados de tal modo que su coeficiente de acoplamiento entre el rotor y el estator varía según sea la posición angular del eje.

En su diseño más simple, el resolver consta de dos bobinados en el estator, que detectan una señal senoidal de inducción, emitida por un tercer bobinado desde el rotor; una de las bobinas detectoras corresponde al seno y la otra al coseno (están ubicadas en posiciones separadas, por un ángulo de 90°), como se muestra en la figura 2.8.

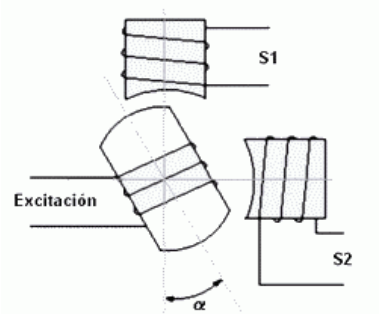


Figura 2.8 Representación básica del resolver.

La bobina excitadora del rotor es alimentada por una señal de corriente alterna senoidal que le llega a través de anillos de metal (contactos) ubicados sobre el eje, y escobillas. Este diseño tiene el inconveniente de que el mecanismo de escobillas sufre un desgaste continuo, lo que hace posible, pasado cierto tiempo de uso, que desde ahí se ingrese ruido en la señal. Tanto el rotor como el estator están construidos con un núcleo de hierro laminado.

Existe una solución de resolver sin escobillas, que está implementada por un transformador rotativo, con el primario sobre el estator y el secundario en el rotor. Donde también el rotor y el estator son núcleos de hierro laminado, mostrado en la figura 2.9

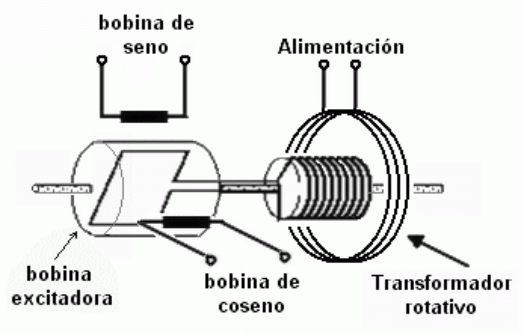


Figura 2.9 Servo motor sin escobillas con resolver.

Generalmente con una frecuencia del orden de los 400-500 Hz, y el otro es el secundario de un transformador por el que llega al rotor la señal de alimentación de la bobina excitadora. Esta configuración logra que el rotor no tenga escobillas, con lo que se evita un elemento que sufre desgaste, que es sensible a los impactos y vibraciones, y que sin duda introduciría ruidos que pueden causar errores. En una parte aislada del estator está el primario del transformador de alimentación de señal.

En ambos modelos, cuando la bobina excitadora del rotor recibe una alimentación de señal senoidal, cada una de las bobinas detectoras del estator es inducida con una señal cuyo voltaje de salida varía de acuerdo al seno de la posición del eje para una de ellas y el coseno de la posición del eje para la otra. Las señales de las bobinas detectoras del estator se llevan a un tipo especial de convertidor analógico digital, conocido como convertidor resolver a digital (R/D converter), siendo esta su mayor desventaja contra los decodificadores.

2.4 CONVERTIDOR DE RESOLVER A DIGITAL

EL dispositivo AD2S90 de la empresa Analog Devices es un convertidor R/D de entradas diferenciales para seno y coseno que acepta 2 Vrms con una frecuencia de 3 KHz – 20 KHz, y con una entrada de referencia para sincronización con una resolución de 12 bits de dato serial siendo su salida el pin 4 (DATA). El dispositivo

cuenta con dos salidas digitales pines 7(A) y 8(B) que producen continuamente señales equivalentes a un encoder de línea de 1024, y alimentación de ± 5 Vcd.

Este dispositivo estará encargado de emular de forma serial un encoder de 12 bits de resolución, a través de la conversión de la señal de entrada de resolver. Para que el dispositivo realice la operación es necesario el envío de señales de control a los pines 6 (CS) y 7 (SCLK), de acuerdo con el diagrama de tiempo de la figura 2.10.

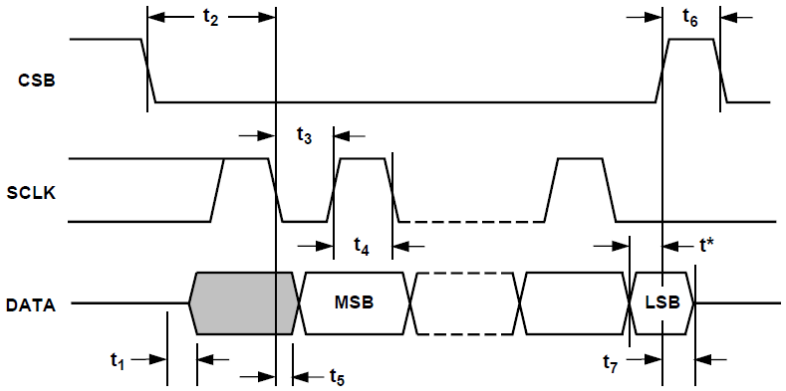


Figura 2.10. Diagrama de tiempo de la interface serial.

La señal SCLK permite la salida de datos en los pines A y B, tal como se muestra en la figura 2.11.

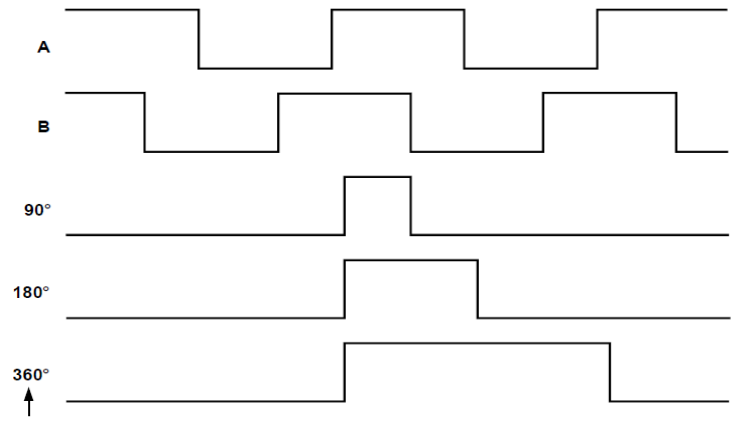


Figura 2.11. Diagrama de tiempo de la emulación de encoder.

Este dispositivo no cuenta con generación propia de señal de excitación para el devanado primario del resolver, ya que solo recibe las señales de los devanados secundarios (seno y coseno), es por ello que necesita un oscilador que genere dicha señal alterna y sincronicen las señales.

Las señales de control que se implementaran en el FPGA aparte de cumplir la secuencia que se muestra en el diagrama de tiempo de la figura 2.10, deben cumplir con los criterios que se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificación de los tiempos de la figura 2.10

Parámetros	AD2S90	Unidades	Condiciones de Prueba/Notas
t1	150	ns max	$\overline{CS}$ a Habilita a DATA
t2	600	ns min	$\overline{CS}$ a 1er Flanco Negativo SCLK
t3	250	ns min	Pulso Bajo de SCLK
t4	250	ns min	Pulso Alto de SCLK
t5	100	ns max	Flanco Negativo de SCLK Valida a DATA
t6	600	ns min	Amplitud de Pulso Alto de $\overline{CS}$
t7	150	ns max	DATA a $\overline{CS}$ Alto
Nota: SCLK solo se puede aplicar después de que haya transcurrido t2.			

2.5 OSCILADOR PROGRAMABLE

El dispositivo AD2S99 de la empresa Analog Devices, es un oscilador sinusoidal programable con un rango de frecuencia programable de salida de 2KHz - 20KHz, un voltaje de excitación de salida a la bobina primaria de 2 Vrms, un voltaje de señal cuadrada de 3 Vpp de sincronización de referencia con el AD2S90, y alimentación de ± 5 Vcd.

Como se puede apreciar la función de este dispositivo será entonces de proporcionar una señal de referencia con una frecuencia de 4.5 KHz y un voltaje de 2 Vrms a la bobina primaria. Este además deberá sincronizarse con el AD2S90 por

medio de una señal y a su vez se retroalimentará de las señales seno y coseno del resolver.

Para programar su frecuencia de salida se deben ajustar los pines 1(sel1) y 2(sel2). Conectando el sel1 a Vss y sel2 a GND se obtiene una frecuencia de 5KHz, la cual es la más cercana al valor de 4.5 KHz necesaria para la señal de referencia de los resolvers de cada motor. Luego para poder ajustar la frecuencia a este valor deseado se debe colocar una resistencia entre Vdd y el pin 3 (FBIAS). A través de una tabla en la hoja de datos se determina el valor necesario de la resistencia, la cual fue de 3.8 KΩ.

En el diagrama que se muestra en la figura 2.12, se puede observar las conexiones necesarias entre los dispositivos AD2S99 y AD2S90, y el resolver y la fuente de alimentación. En la sección de anexos se localizan las hojas de datos de ambos dispositivos y notas de aplicación acerca del uso y funcionamiento de los convertidores R/D.

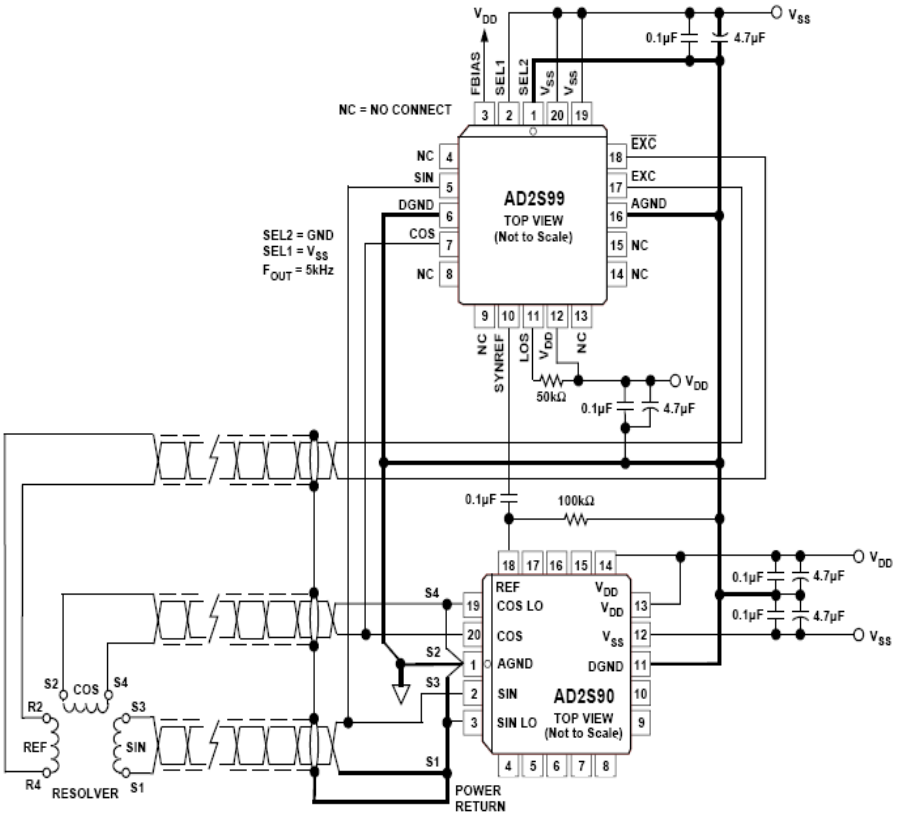


Figura 2.12 Diagrama de conexión de los dispositivos AD2S99 y AD2S90.

2.6 LENGUAJES DESCRIPTIVOS

Una de las herramientas más poderosas con las que se cuenta actualmente para el diseño de sistemas digitales es el uso de lenguajes descriptivos de circuitos que permiten jerarquizar las diferentes etapas de diseño para lograr una repartición óptima de trabajo.

Con los lenguajes descriptivos, se puede diseñar y simular el funcionamiento de cada uno de los niveles de abstracción, tratando a los sistemas como cajas negras y por lo tanto pueden ser desarrollados en forma paralela, es decir, al mismo tiempo se pueden definir las características de algún sistema, su arquitectura, su estructura funcional y su realización a nivel transistor de manera simultánea, disminuyendo tiempo de diseños. Esto se debe al uso de los elementos repetitivos en cada una de las partes, solamente se necesita especificar en cada nivel para que cuando se conjunte el diseño, se cumplan las expectativas originales.

A pesar de que existen diversos lenguajes descriptivos, el VHDL (Very high-speed integrated circuit Hardware Description Language, lenguaje descriptivo de circuitos integrados de muy alta velocidad) es el más popular y su uso es cada vez mayor, relegando a otros lenguajes a un segundo plano. Su popularidad se debe principalmente a que es un estándar 1164 del IEEE.

Los lenguajes descriptivos no son la solución del diseño digital, solamente son una herramienta para obtener soluciones de manera rápida y eficiente. Podemos ver al VDHL y a los diseñadores de sistemas digitales como el C y los programadores, ya que al igual que este ultimo permite dar soluciones más rápidas a los problemas de diseño.

2.6.1 VHDL

Las características principales que hacen del VHDL el lenguaje universal de descripción de circuitos son el ser un estándar definido como tal por el IEEE y que los proveedores del paquete tiene que seguir el estándar, haciendo que los diseños sean portátiles a cualquier plataforma.

Se deben diferenciar dos aspectos básicos importantes de las herramientas de diseño: el entorno grafico al usuario y el algoritmo de síntesis. El entorno grafico al

usuario son todos los elementos de desplegado, ayudas y ventanas para el manejo de los proyectos. El algoritmo de síntesis es la interpretación y ejecución del proyecto en sí. Dependiendo del proveedor del programa, el entorno puede cambiar de uno a otro, pero el algoritmo de síntesis es el mismo para todos.

Elementos básicos de VHDL:

El lenguaje descriptivo VHDL es un lenguaje estructurado y tiene ciertas similitudes con los lenguajes de programación PASCAL y ANSI C. Como todo lenguaje estructurado, éste consta de varios bloques de declaraciones, cada uno de ellos con una función particular. Los cuatro bloques de declaraciones en VHDL son:

- Bloque de declaración de librerías
- Declaración de terminales externas
- Descripción de la arquitectura de circuito
- Banco de pruebas

Un aspecto muy importante de este lenguaje y en el que difiere sustancialmente de los lenguajes de programación convencionales es que las asignaciones son concurrentes, es decir, ocurren al mismo tiempo mientras que los demás son de manera secuencial.

2.7 DESARROLLO DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS LÓGICOS PROGRAMABLES

Los primero circuitos integrados incorporaban complejidad equivalente a unas cuantas compuertas y funciones lógicas básicas, no llegando a superar los 100 transistores; este nivel de complejidad se conoció como pequeña escala de integración (SSI, Small Scale Integration).

Funciones más complejas se pudieron integrar, como algunas unidades aritméticas y registros, cuando la escala de integración aumento en un orden de magnitud dando llegada a los circuitos de mediana escala de integración (MSI). Los primeros procesos microprocesadores de 8 bits y sus circuitos periféricos pudieron

ser desarrollados gracias a la alta escala de integración con una complejidad de 1,000 a 10,000 transistores (LSI). En este punto se marco el inicio del cambio en el enfoque de diseño en electrónica ya que ahora es posible el contar con soluciones complejas con solo unos cuantos componentes. La tecnología no se detuvo y muy pronto se aumento el orden de magnitud de la integración dando cabida a los circuitos integrados de muy alta escala de integración (VLSI). Microprocesadores más rápidos y más poderosos pudieron diseñarse y el mundo de las microcomputadoras comenzó a extenderse con gran rapidez. También en este punto se comenzaron a introducir los primeros circuitos lógicos programables cuya finalidad era proporcionar la interfaz en los sistemas de microprocesadores.

El gran impulso en el desarrollo de la electrónica vino con los circuitos que incorporaban más de 10,000 transistores en un solo substrato y comenzaron a aumentar las complejidades de las funciones lógicas a ser realizadas por una sola pastilla, de esta manera se pudo contar con sistemas de microprocesadores más eficientes y con mucho menos componentes.

A partir de los 100,000 transistores en un solo substrato es cuando la electrónica digital comienza su auge, de tal manera que su uso se hace masivo e invade prácticamente los campos de aplicación. En este punto se desarrollan mayores y más complejos bloques lógicos programables y se hace necesario el desarrollo de áreas especializadas para su manejo y programación.

Al llegar, y superar, el millón de transistores encapsulados en una sola pastilla es claro que muchos problemas pueden ser resueltos con solo un modulo y el tamaño se reduce significativamente, disminuyendo los costos de producción.

Hay que tomar en cuenta que el diseño de un circuito integrado de aplicación específica (ASIC, Application Specific Integrated Circuit) pero mínimamente toma un año su lanzamiento al mercado. Entonces se lanzaron los circuitos programables tipo FPGA (Field Programable Gate Array, Arreglo de compuertas programables en campo) para disminuir esos tiempos de lanzamiento y a la par desarrollan el ASIC para reducir los costos una vez que el producto inicial se asienta en el mercado. Para evitar la duplicación del trabajo donde por un lado se diseña el sistema basado en lógica programable y por otro se desarrolla un diseño de aplicación especifica, se han desarrollado herramientas que pueden trasladar un diseño de FPGA a ASIC de manera automática.

En este momento ya existen circuitos integrados con más de mil quinientos millones de transistores. Estos niveles de complejidad permiten que la mayor parte de las aplicaciones de la electrónica puedan ser presentadas como un sistema en

una sola pastilla SOC (System On a Chip) la cual es la tendencia moderna del diseño.

Por otro lado, una cosa es contar con millones de transistores como recursos base y otra cuestión muy diferente es interconectarlos para realizar una función específica, así es que a la par con el incremento de los niveles de integración, también se han desarrollado diversas herramientas de diseño que le permiten al profesional manejar de manera eficiente y automática los recursos disponibles. Son herramientas conocidos como lenguajes descriptivos de hardware entre ellas la principal y ya mencionada es el VHDL.

2.7.1 FPGA

Con el objetivo de optimizar aun más los recursos de los bloques digitales disponibles en los dispositivos programables, una nueva familia de arreglos lógicos fue creada. Mientras que los circuitos tipo ROM son poco recomendables para la síntesis de funciones lógicas debido a su bajo nivel de utilización y que los circuitos PLD aun tienen grandes desperdicios de recursos, se busco una alternativa que permitiera el uso de una mayor cantidad de componentes y una eficiencia superior. Estos circuitos son conocidos por FPGA y se basan en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales, y una mucho mayor interconectividad que sus contrapartes. Mientras más pequeñas resultan las celdas, mayor aprovechamiento se pude tener de las mismas, aunque los retardos pueden aumentar.

Las celdas básicas de un FPGA son mucho más simples que las macro-celdas de un PLD, y dependiendo del proveedor de circuitos, esta será su constitución. Cada proveedor y cada familia de FPGA ofrecen una versión diferente de la celda básica y en el texto solo se presenta un ejemplo típico de las mismas. EL FPGA se compone de 3 celdas básicas: celdas lógicas, celdas de entrada/salida y celdas de distribución.

Las celdas lógicas son las que existen en mayor cantidad y son pequeños bloques lógicos de compuertas programables. Las celdas de entrada/salida están dedicadas a proporcionar la interconectividad entre el FPGA y el exterior. Finalmente, las celdas de distribución se encargan de manejar las señales de reloj hacia dentro del circuito. La interconectividad es el FPGA está restringida a celdas adyacentes exclusivamente. Con esto se permite un mucho menor consumo de potencia y por consiguiente, un mayor nivel de integración y se pueden contar con unidades que va desde las 50,000 hasta los 10’000,000 de compuertas lógicas equivalentes.

El FPGA presenta ventajas por su mayor densidad debido al bajo consumo de potencia, pero las frecuencias de operación es variables debido a los retardos de interconexión, pero aun así su nivel de utilización practica es cercana al 100%, mientras que los CPLD solo un 50%.

En la figura 2.13 se observa el modelo de la tarjeta de desarrollo que se procedió a utilizar (Spartan-3A). La Spartan-3A pertenece a la familia XILLIN y contiene un FPGA XC3S700A con 700 mil compuertas con un encapsulado tipo FG484.

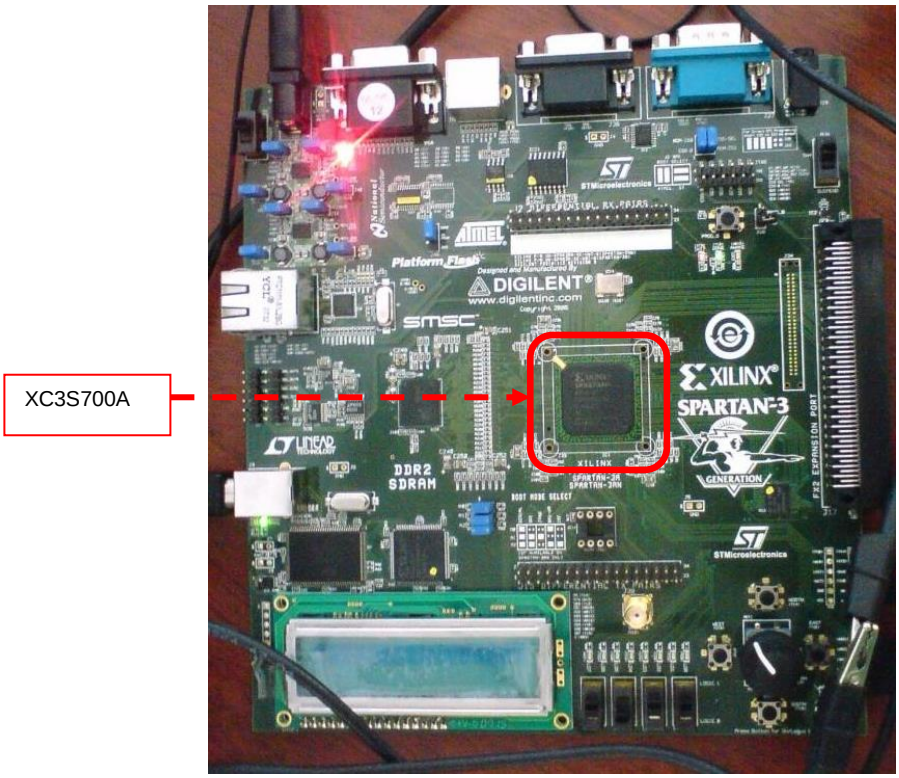


Figura 2.13 Spartan-3A, de la empresa Xillin.

CAPÍTULO TERCERO:

PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

En este capítulo se explica a detalle el proceso y actividades que se llevaron a cabo para la realización de este proyecto. Entre ellas se pueden mencionar el re-cableado del tablero de distribución y control; el diseño y construcción del PCB para los circuitos de conversión R/D (AD2S90 y AD2S99); la descripción de hardware en VHDL para generar las señales de control del dispositivo convertidor; y, finalmente, realizar pruebas finales para verificar el correcto funcionamiento de todo el sistema.

La fresadora de CNC de alta velocidad de 3 ejes (que es la máquina-herramienta con la cual se trabajó durante el desarrollo del proyecto de residencia), se puede apreciar en la figura 3.1.

Figura 3.1. Máquina-herramienta de alta velocidad.

La fresadora contaba con un sistema de control, con el que se podía controlar cada uno de los motores de manera independientemente (como se puede apreciar en el diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.2), complicando con esto su operación; además, el tablero de distribución de CA ya no se encontraba correctamente conectado y los servo-drivers no permitían el monitoreo de corriente, lo que impedía realizar investigaciones sobre daño o ruptura en la herramienta de corte de las máquinas herramientas de alta velocidad.

El sistema de control mostrado en la figura 3.2, requería un código en cada uno de los paneles de control de los servo-drivers, aunque se podía programar retardos para que funcionara de manera secuencial, además se necesitaba de mucha precisión sobre todo de la presencia del operador para supervisar la operación.

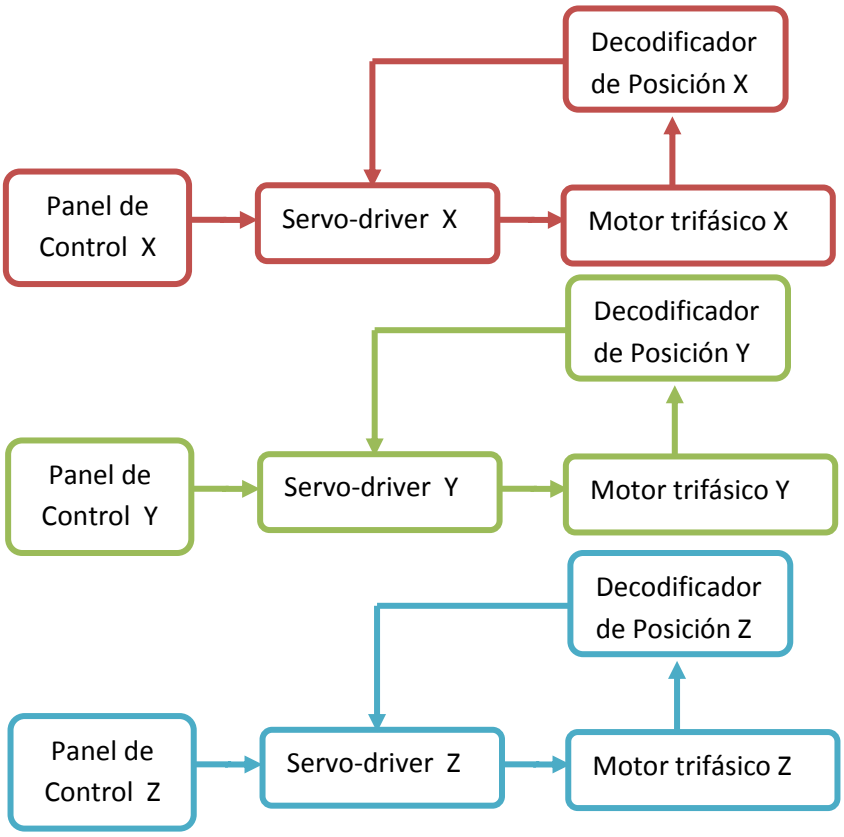


Figura 3.2. Sistema anterior de control de los motores

El manejo del sistema anterior no proporcionaba un maquinado óptimo por su falta de precisión, es por eso que al realizar el maquinado de las diferentes piezas era necesario rediseñar el código en cada uno de los paneles de control.

Los servo-drivers que contenía anteriormente la máquina-herramienta, no se podía monitorear el consumo de corriente que los motores solicitaban al maquinar la pieza de metal, por lo tanto era imposible realizar una investigación sobre la falla o ruptura en la herramienta de corte.

El sistema que se propone (se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.3) soluciona los problemas de control de los motores, facilita el manejo de los servo drivers debido a que se realiza por medio de la PC, ejecuta los programas de manera automática programando rutinas y es un sistema más preciso debido al tipo de decodificación de posición angular; por lo tanto hace que sea un sistema mucho más eficiente.

Los algoritmos de control numérico programados en la computadora (CNC) permiten un control más óptimo sobre los servo-drivers, ya que la computadora transmite señales para la conmutación específica de las fases, para proporcionar velocidad y torque sobre el motor.

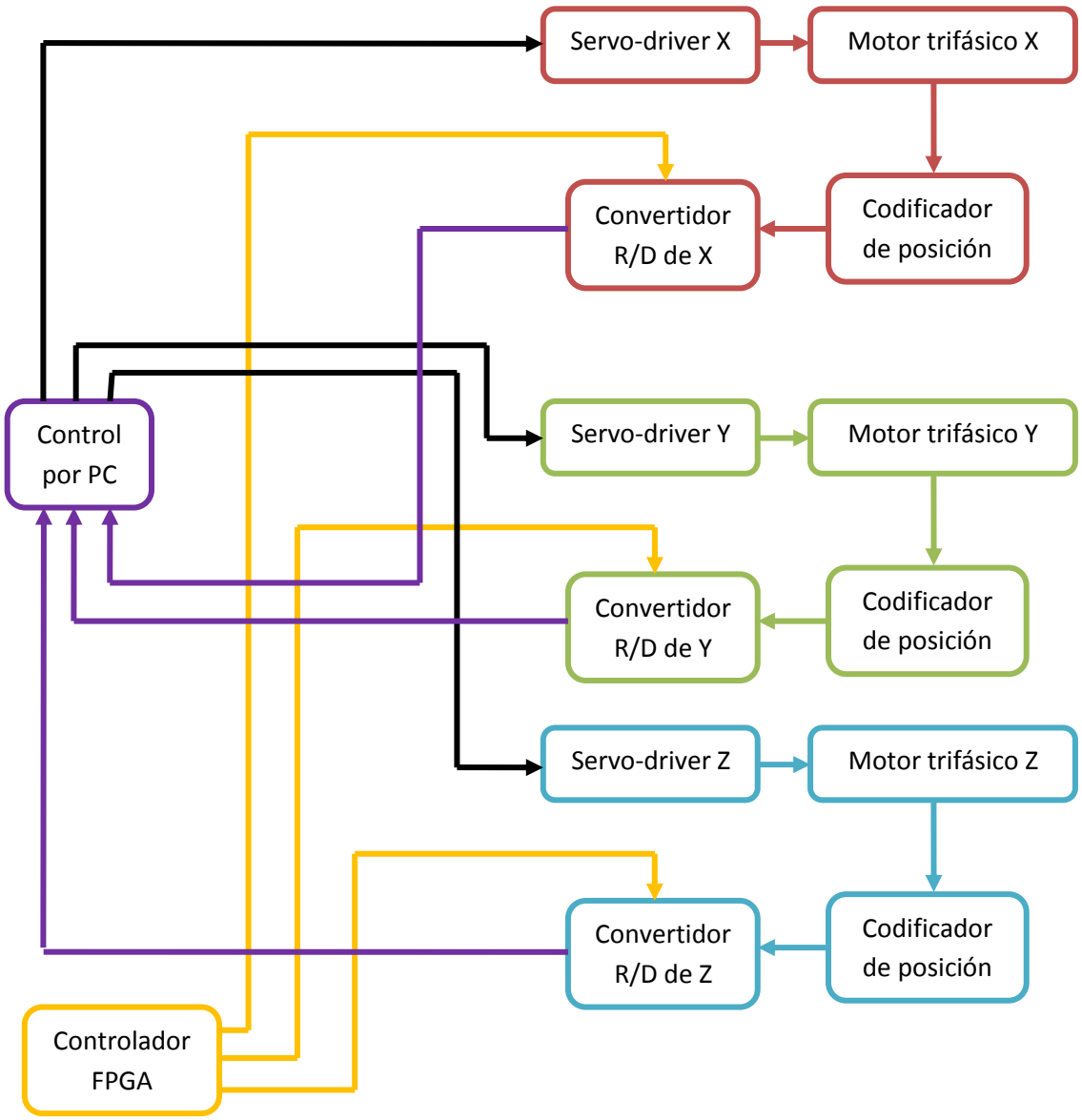


Figura 3.3 Sistema actualmente instalado para el control de los motores

La retroalimentación del sistema que se propone, se realiza a través de codificadores de tipo resolver que están colocados sobre el motor; este tipo de señal es analógica y no es compatible con la computadora, para lo que se necesita de un convertidor de señal de Resolver a Digital (convertidor R/D), esto hace una emulación de un encoder.

Para que funcione el convertidor R/D, necesita de señales de control, las cuales se proporcionan con un FPGA, por su fácil programación pues este tipo de señales se diseñan para un tiempo determinado, además, de poder ejercer señales concurrentes.

La información que da el codificador de tipo resolver es muy precisa, por lo que al maquinar las piezas se tendrán resultados con medidas muy exactas. Por lo tanto el sistema que se implementa es más rápido y eficiente.

3.1 RECONEXIÓN DEL TABLERO DE DISTRIBUCIÓN

En la figura 3.4 se muestra el cableado original con el cual se encontraba la fresadora, también en la misma figura se puede apreciar los servo 3 servo-drivers que controlan cada uno de los servomotores.

Debido al funcionamiento y protección de los servo-drivers y los motores trifásicos es necesario realizar primero la reconexión del tablero de distribución.

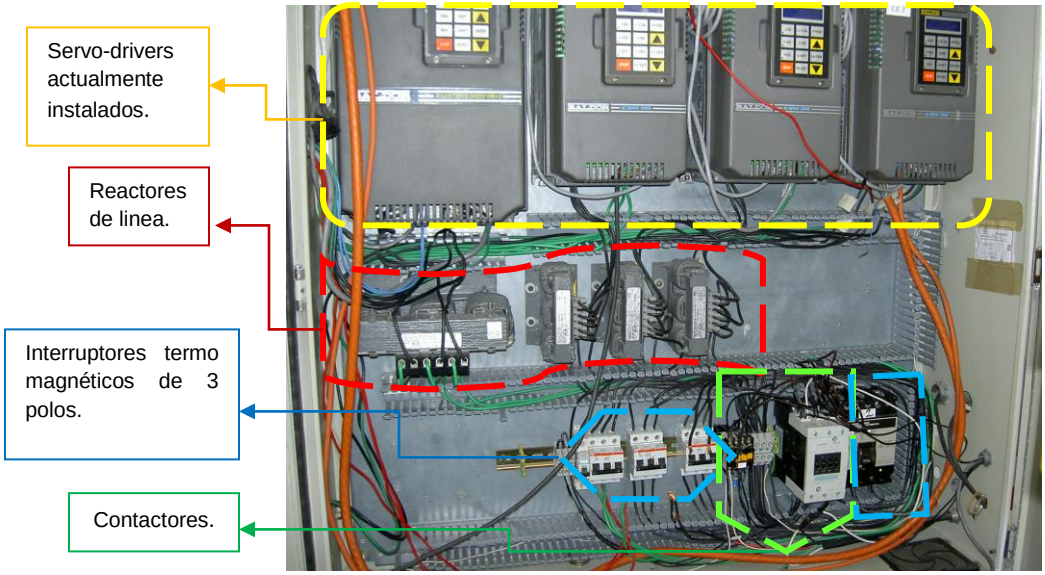


Figura 3.4. Tablero eléctrico de distribución y protección de la Máquina-herramienta.

En la figura 3.5 se observa las conexiones de los interruptores tripolares y de los contactores, los botones, indicadores y los reactores de línea (componentes descritos en el capítulo 2).

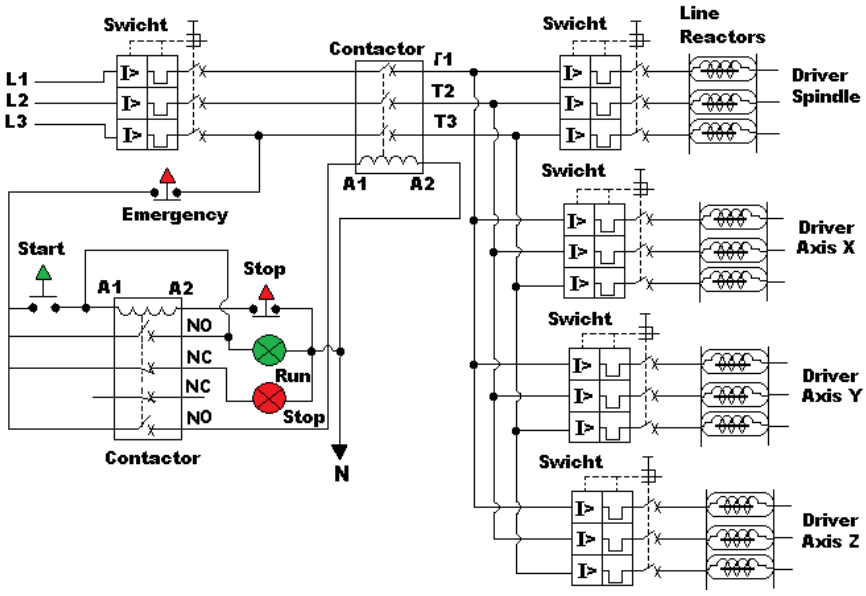


Figura 3.5 Diagrama de conexionado del tablero eléctrico y el tablero de control con indicadores de la máquina-herramienta.

En el contactor auxiliar se lleva a cabo el control del encendido por medio de un enclavamiento eléctrico de la bobina con el interruptor normalmente abierto y el rompimiento de este estado con los botones de paro y sus respectivos indicadores (los ventiladores se colocan en paralelo al indicador de encendido).

En la figura 3.6 se observa el tablero en proceso de corrección de sus reconexiones.

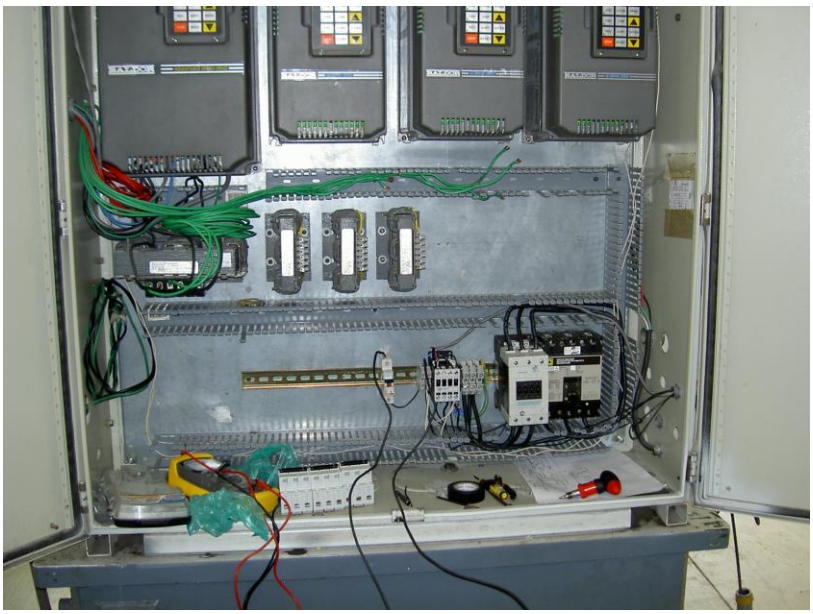


Figura 3.6 Tablero eléctrico en proceso de corrección.

En la figura 3.7 se observan las conexiones realizadas al tablero de distribución eléctrica trifásica. Una vez realizado todo el cableado, se prosiguió a verificar su correcto conexionado a través de la medición de la continuidad con un multimetro. Y para la verificación del funcionamiento del cableado, se realizaron mediciones de los voltajes de fase a fase. Obteniéndose exitosamente los resultados esperados, es decir que el sistema realizó el enclavamiento, y el encendido de las luces del estado de operación y de los ventiladores que sirven como disipadores de calor.

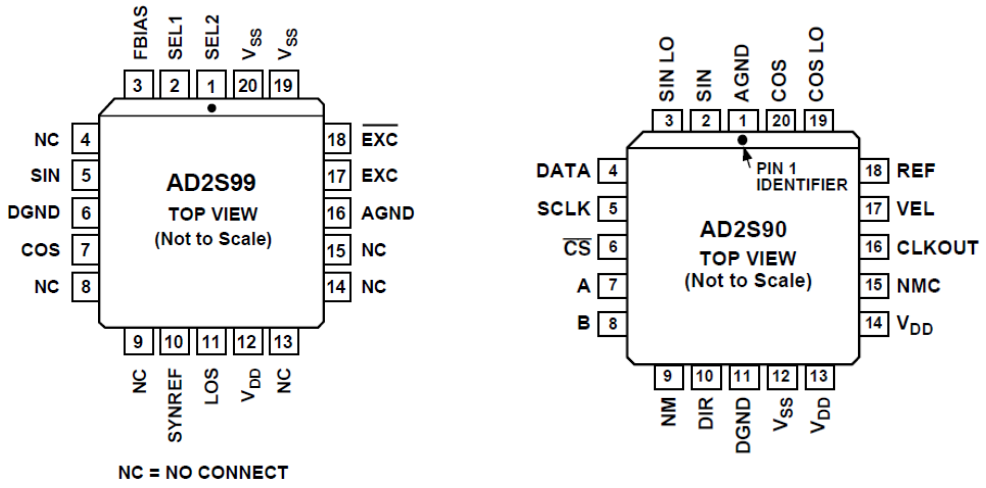
Figura 3.7 Tablero eléctrico con instalación corregida.

3.2 PCB´S DEL CONVERTIDOR R/D Y FUENTE SIMÉTRICA

En los incisos a y b de la figura 3.8 se muestra el encapsulado y configuración de pines de los componentes AD, descritos en el capítulo 2.

El siguiente objetivo fue realizar el PCB de los dispositivos AD2S90 (convertidor de resolver a digital) y el AD2S99 (oscilador programable) para hacer que el sistema fuera compatible con el CNC.

Con respecto al funcionamiento podemos decir que una vez configurada la frecuencia del oscilador, este envía dicha señal a la bobina primaria del resolver como señal de referencia. Para luego tomar como retroalimentación las señales seno y coseno obtenidos de las bobinas secundarias del resolver.



a) AD2S99 b) AD2S90

Figura 3.8 Configuración de pines del componentes AD.

Estas señales provenientes de las bobinas secundarias también se envían al convertidor, para que después este las convierta en señales digitales. Cabe mencionar que ambos dispositivos se sincronizan a través de una señal enviada por el oscilador pin 10 (SYNREF). En la figura 3.9 se muestra el diagrama esquemático de funcionamiento de todo el sistema antes descrito.

Una vez explicado el funcionamiento y las razones del uso de estos dispositivos se procedió a realizar el diseño y elaboración de los PCB's, En el cual se incluyen la fuente simétrica de ± 5 Vcd con su transformador y los dispositivos de Analog Devices.

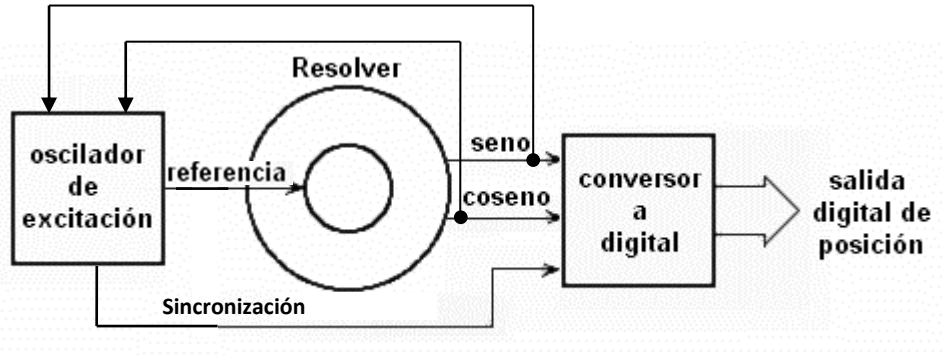


Figura 3.9 Diagrama esquemático de funcionamiento de los dispositivos con el resolver.

En la figura 3.10 se muestra el PCB de una fuente simétrica y el PCB del sistema de conversión R/D. En esta figura se puede observar el transformador monofásico el cual forma parte de la fuente simétrica de ±5 Vcd que suministra el voltaje de alimentación de los dispositivos de Analog Devices (oscilador y convertidor).

El sistema de conversión mostrado en la figura 3.10 se conecta directamente con el codificador de posición angular tipo resolver que se encuentra montado en el motor trifásico sin escobillas.

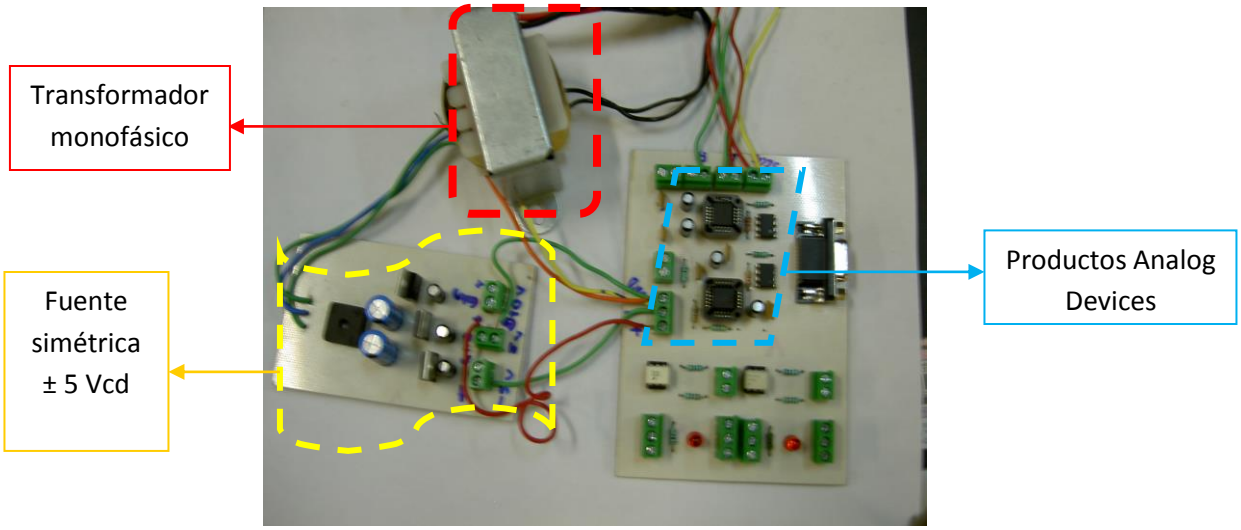


Figura 3.10 Fotografía de los PCB's de la fuente simétrica y del sistema de conversión R/D.

Para verificar el correcto funcionamiento del circuito oscilador (AD2S90) se procedió a observar en osciloscopio, la señal excitadora o de referencia, y las señales seno y coseno. La señal de referencia es una señal de entrada al devanado primario del resolver, mientras a las que se le llaman señales seno y coseno son señales de salida de los otros 2 devanados secundarios colocados a 90° uno respecto a otro, tal y como se muestra en la figura 3.11 observadas en el osciloscopio.

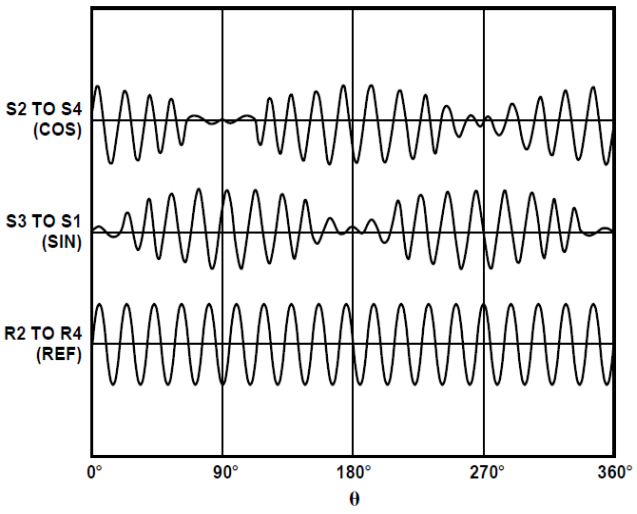


Figura 3.11 Señales: coseno, seno y referencia del resolver.

Se observa la señal de referencia proporcionada por el dispositivo AD2S99 que es el oscilador programable; y también se observan las 2 señales seno y coseno, las cuales son introducidas al dispositivo AD2S90 para ser convertidas en señales de salida de tipo encoder.

3.3 SEÑALES DE CONTROL DEL FPGA

Para generar las señales de control del convertidor de resolver a digital fue necesario el uso del VHDL con el FPGA que se mencionó en el capítulo 2 y que se observa en la figura 2.13.

Se debe calcular el tiempo total en que se lleva a cabo todo el proceso y ver los diferentes estados de las señales para distribuir el proceso en tareas simples, siempre y cuando se cumplan los requerimientos mencionados en la tabla 2.1 mostrada en el capítulo 2.

Tomando en cuenta que el dispositivo AD2S90 proporciona un dato de salida de 12 bits, y que cada bit es cargado al final de una transición reloj aproximadamente de 600ns y que el tiempo mínimo para reiniciar la lectura de datos es de 600 ns, se tuvo aproximadamente un tiempo total del patrón de señales que debe generar el FPGA de 8400ns.

Después de analizar el comportamiento del dispositivo, el cual se procede a describir en VHDL, se comenzó a crearlo desde elementos básicos como: una base de tiempo programable, decodificadores y una máquina de estados.

La máquina de estados que se construyo es capaz de controlar una base de tiempo programable a través de sincronizadores de pulso único tanto de inicio como de fin, también capaz de controlar la adquisición de dato serial y la conversión de efecto hall (si fuese necesario).

Esta máquina de estados (FSM) de 41 estados, también manifiesta la transición de las señales CSB y SCLK, necesarias para recibir el dato serial del dispositivo AD2S90.

El sistema podrá ajustarse a un primer estado con el botón reset y se pondrá en marcha con el botón de inicio, para reiniciar el proceso solo basta con repetir la secuencia en que se presionan los botones de control.

En la figura 3.12 observamos la representación esquemática del circuito que se describió en los párrafos anteriores. El código en VHDL correspondiente a la descripción del dispositivo descrito para generar las señales de control para el convertidor R/D se puede observar a detalle en la sección de los anexos.

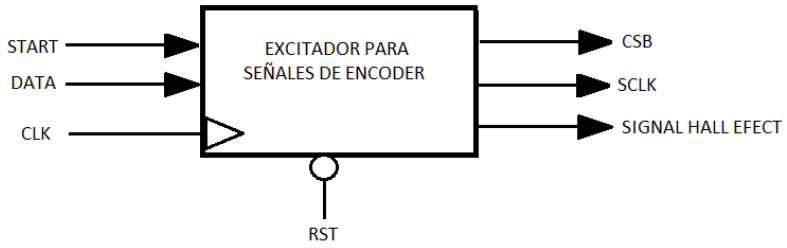


Figura 3.12 Dispositivo generador de señales de control para convertidores R/D AD2S90.

En la figura 3.13 se observan las señales generadas por la Spartan-3A. Al analizar estas señales se observa que cumplen correctamente con los rangos de tiempos especificados y necesarios para la conexión de todos los sistemas.

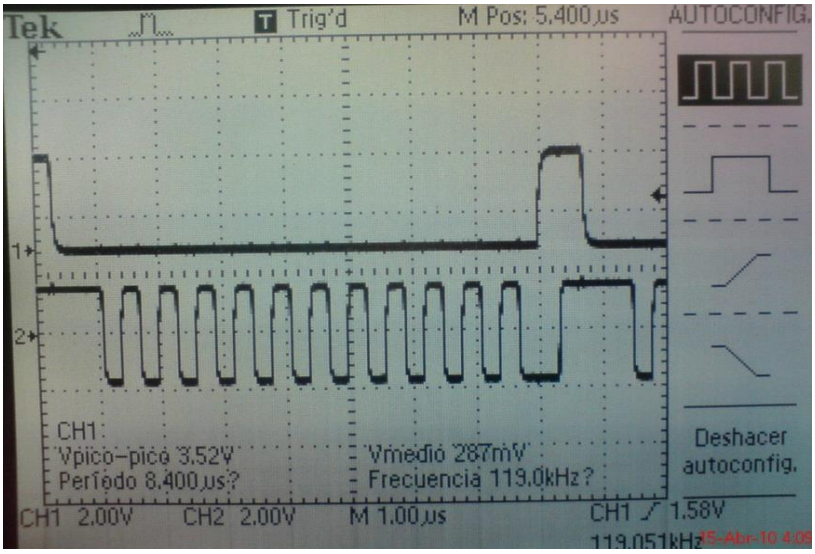


Figura 3.13 Señales CSB y SCLK analizadas en el osciloscopio.

3.4 CONEXIONES PARA PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El sistema de conversión y las conexiones mismas entre sus elementos se muestra en la figura 3.14, donde se observa el motor de uno de los ejes de la fresadora, el PCB de los dispositivos de Analog Devices, El FPGA con el programa ya descargado y el osciloscopio para observar las señales de encoder.

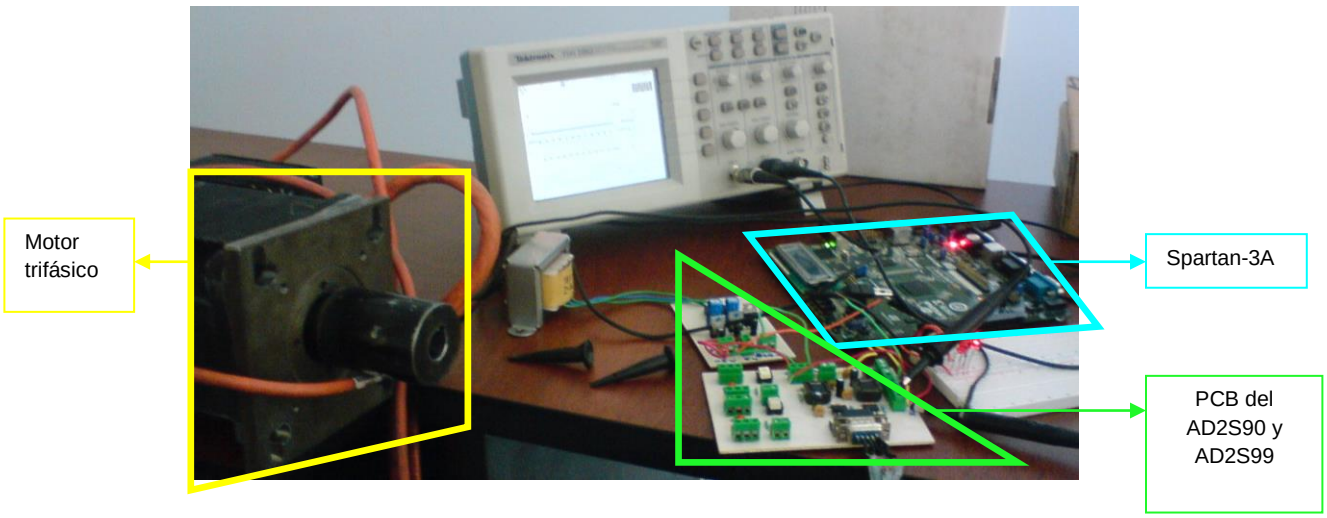
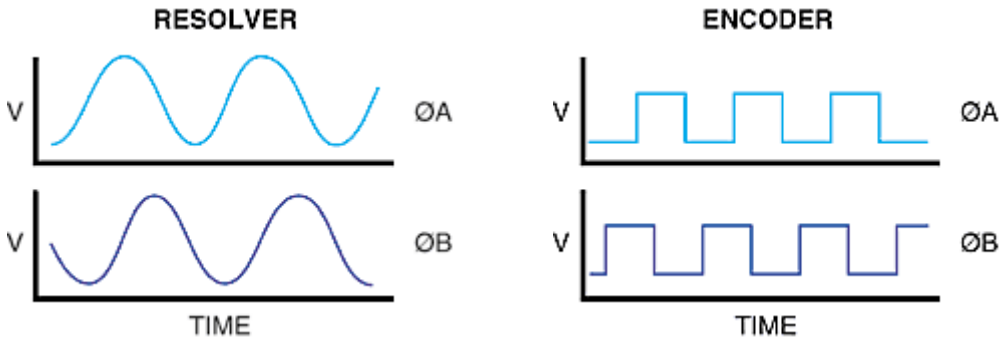


Figura 3.14 Conexión del PCB, FPGA y el motor trifásico.

Una vez teniendo realizadas las etapas anteriores, se procedió a conectar los sistemas para verificar la conversión R/D. Para ello el PCB construido se recibe las señales de control generadas por el FPGA, mientras que al mismo tiempo el PCB enviará la señal de referencia al resolver y por otro punto de conexión recibirá las señales de seno y coseno, ambas necesarias para realizar la emulación de señales de tipo encoder.

En la figura 3.15 se observan las señales que se deben obtener a partir del resolver. De esta figura se observa que las señales de resolver son señales analógicas, mientras que las señales de tipo encoder son digitales, de lo cual también se dice que son las señales de entrada y salida del AD2S90.



a) Señal de salida de resolver.

b) Señal de salida de encoder.

Figura 3.15 Señales de entrada y salida del AD2S90.

Donde efectivamente se comprueba el control de movimiento y detección de posición del motor a través del lazo de control que se fabricó, esto indica que el sistema se integró y realizó la operación deseada sin problemas mayores.

RECOMENDACIONES

El sistema que se implementó en este investigación es adaptable para cualquier otro proyecto que se refiera al control de la posición de motores, sobre todo aquellos en los que se requiera mucha precisión en sus movimientos, así como otras máquinas-herramientas o cualquier otro tipo de robots.

Para la implementación de esta misma propuesta, se deberá tomar en cuenta el tipo de codificadores de posición que se disponga en los motores de la nueva aplicación, para que a partir de allí se pueda realizar la compatibilidad con el CNC y contemplar las características de los servo-amplificadores necesarios, para la conmutación de fases en los motores si estos fueran trifásicos de CA.

Esta investigación acerca de los codificadores de posición angular, nos queda como una referencia para ampliar el campo de información sobre el posicionamiento de los motores, con el uso de las señales de efecto hall, que sirve para especificar aun más la posición del motor, siendo estas 3 señales de sensores que se encuentren físicamente posicionados en el motor o la emulación de ellas a través del mismo FPGA y se lleve hasta el CNC, en conjunto con las señales del encoder.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto se observó un detalle muy importante para la conversión de las señales de seno y coseno enviadas del resolver, las cuales representan la posición angular en formato analógico con niveles de voltaje muy bajos en comparación con los requeridos por el dispositivo de conversión. Por ello, fue necesaria una etapa de amplificación previa.

Otro detalle de mucha importancia es la correcta conexión de puesta a tierra de todos los sistemas, ello con finalidad de la eliminación de ruido. Debido a que puede causar distorsiones principalmente en las señales analógicas, siendo la principal afectada las señales del resolver, dando como resultado información errónea de la posición angular del motor.

Como parte de las conclusiones se puede decir que el lazo de control que se implementó a la máquina herramienta de tipo fresadora resultó efectivo, debido a que detecta el movimiento en cualquier posición y presenta solo las desventajas mencionadas.

Además que el sistema funcionó correctamente, demostrándose que la conversión de señales de resolver a señales de tipo encoder es factible para obtener información de posición angular de un motor. Además se demuestra que VHDL y el FPGA son herramientas vanguardistas que permiten su implementación generando las señales necesarias para la conversión R/D y a su vez brindan la ventaja de reducción de circuitería electrónica equivalentemente para este mismo fin.

Y finalmente se puede concluir que se cumplieron los objetivos planteados para la residencia profesional, dejado con este trabajo la introducción para un trabajo final de re-ingeniería de control. El cual consistirá en controlar de forma automática todos los ejes de la máquina de alta velocidad a través de una tarjeta Galil y servo amplificadores.

REFERENCIAS

- Electrónica Digital y Lógica Programable; René J. Romero Troncoso. Primera edición 2007, Editorial Universidad de Guanajuato.
- Contador de pulsos para Servomecanismos (Articulo); René J. Romero Troncoso, Juan A.Orozco Cardiel. Facultad de Ingenieria Mecanica, Electrica y Electronica. Universidad de Guanajuato. 2003. http://ccc.inaoep.mx/fpgacentral/reconfig/2003/articulos/TCR11.pdf
- Hoja de datos del los productos Analog Devices, AD2S90 y AD2S99, obtenidos en: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD2S90.pdf http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD2S99.pdf
- Aplicación del circuito AD2S90 convertidor resolver a digital, por Dennis Shi-hsiung Fu. Nota de aplicación de Analog Devices AN-230: http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/61044866AN-230.pdf
- Conversión de resolver a digital, Una alternativa sencilla y rentable de codificador óptico, por Jhon Gasking. Nota de aplicación de Analog Devices AN-263: http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/394309286AN263.pdf
- Curso de Instalaciones Eléctricas II: http://www.tutomundi.org/2009/11/curso-de-instalaciones-electricas-tomos.html
- http://issuu.com/residente/docs/tableros_electricos
- http://www.velasquez.com.co/catalogo/tableros_de_control.pdf
- http://robots-argentina.com.ar/SensoresAngulares_resolver.htm

ANEXOS

1.- *CÓDIGO PRINCIPAL EN VHDL DEL GENERADOR DE SEÑALES DE CONTROL*
Localización: reporte final/ANEXO 1

2.- DATASHEET DEL AD2S90
Localización: reporte final/AD2S90 (Datasheet)

3.- DATASHEET DEL AD2S99
Localización: reporte final/AD2S99 (Datasheet)

4.- NOTA DE APLICACION AN-230
Localización: reporte final/AN-230 (Nota de aplicacion)

5.- NOTA DE APLICACION AN-263
Localización: reporte final/AN-263 (Nota de aplicacion)