



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Instrumentación y Control

*“Desarrollo de perfiles polinomiales 3D
basado en FPGA para control de posición
en máquina fresadora CNC”*

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el
grado de Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Ing. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

ASESOR:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

San Juan del Río, Querétaro, Junio de 2011



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Instrumentación y
Control Automático

DESARROLLO DE PERFILES POLINOMIALES 3D BASADO EN FPGA PARA
CONTROL DE POSICIÓN EN MÁQUINA FRESADORA CNC

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Ing. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

SINODALES

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Presidente



Firma

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Secretario

Firma

Dr. Luis Morales Velázquez

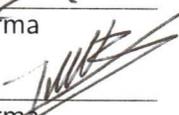
Vocal



Firma

Dr. Juan Primo Benitez Rangel

Suplente



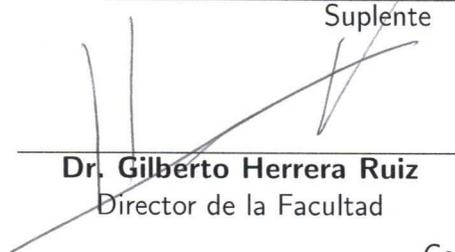
Firma

Dr. J. Jesús de Santiago Pérez

Suplente

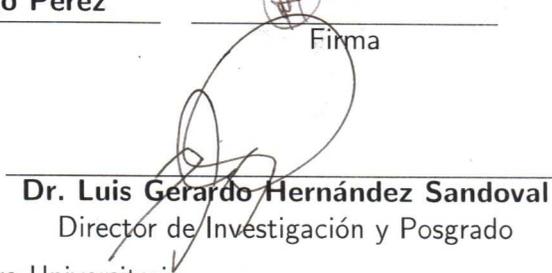


Firma



Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la Facultad



Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Junio de 2011

México

Resumen

Los sistemas de control numérico computarizado (CNC) tienen un fuerte impacto en las aplicaciones industriales donde se requiere el control de máquinas-herramienta. Los objetivos más importantes del sector industrial en la manufactura son la mejora en la calidad, la continua reducción de costos y acortar los tiempos en el desarrollo del producto y proceso. Sin embargo, los sistemas CNC comerciales existentes se caracterizan por ser de arquitectura cerrada y propietarios, es decir, no permiten la integración de sistemas u equipo ajeno al de su propia marca. Los algoritmos descritos en sus controladores no son transparentes y son completamente fijos. Por tanto, es imposible integrar módulos de diseño propio con funciones específicas para mejorar el desempeño del sistema, o incrementar su funcionalidad. Además, se trata de sistemas cuyos costos de adquisición son elevados. Debido a lo anterior, en este trabajo se propone el desarrollo de perfiles polinomiales en 3D basado en FPGA para el control de posición de una máquina fresadora. La plataforma de pruebas para la implementación de la propuesta consiste en una máquina fresadora vertical de tres ejes CNC reconvertida. Se desarrolla la arquitectura del sistema completo para para la implementación del método. El sistema se compone de tres módulos principales para su implementación: el generador de perfiles, el generador de trayectorias y un controlador PID (*Proportional-Integral-Diferencial*). Además se incluyen algunos módulos adicionales para la identificación de los parámetros de la planta, y una interfaz de comunicación USB (*Universal Serial Bus*). La descripción del sistema se realizó en código VHDL (*Very high speed integrated circuit Hardware Description Language*) y fue implementado en una tarjeta controladora de 4 ejes basada en un dispositivo de alto desempeño FPGA (*Field Programmable Gate Array*) de bajo costo, la MQUAQ4X de diseño propio por el grupo HSPdigital. El sistema se sometió en dos tipos de pruebas principales: movimiento independiente de cada eje y movimiento coordinado, los tres ejes en ambos casos. Los resultados de las pruebas muestran que el sistema tiene un excelente desempeño, con un máximo de 4 cuentas de error. Esta es la primera vez que se implementa un sistema de control para el posicionamiento en una máquina de tres ejes (fresa).

(Palabras clave: Sistema de control CNC, FPGA, VHDL, generación de perfiles)

Abstract

Computer Numerical Control (CNC) systems have a strong impact on industrial applications, where controlled machine-tools are required. In the manufacturing industrial sector, the most important objectives are the improvement of quality, continuous cost reduction, and time reduction in product development and process. However, existing commercial CNC systems are characterized by its closed architecture and proprietary designs; which do not allow the integration of systems or equipment outside their own brand. The algorithms described in their drivers are not transparent but completely fixed. Therefore, it is impossible to integrate design modules with specific functions to improve the systems performance or enhance functionality. In addition, costs are high in these commercial systems. Because of this, this work proposes the development of 3D polynomial profiles based on FPGA for the control of a milling machine. The test platform for the implementation consisted on a three-axis vertical CNC milling machine converted. The system consisted of three main modules for its implementation: the profile generator, the trajectory generator and a PID (Proportional-Integral-Differential). Moreover, some additional modules were included to identify the parameters of the plant, as well as a communication interface USB (Universal Serial Bus). The system description was done in VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) code and it was implemented in a 4-axis controller card based on a high-performance FPGA (Field Programmable Gate Array) device of low cost, in this case, the MCUAQ4X controller card designed by HSPdigital group. Two types of tests were carried out: independent movement of each axis and coordinated movement (the three axes in both cases). The test results showed that the system has excellent performance, with a maximum error of 4 counts. This is the first time that a control system for positioning is implemented in a three-axis machine tools.

(Keywords: CNC control system, FPGA, VHDL, profile generation)

A mis padres y hermanos, que siempre me apoyan.
A Dyana, que siempre estas conmigo.

Agradecimientos

A mi familia que siempre me han apoyado y me han dado aliento para seguir adelante en cada reto que se me presenta, por todo su cariño y fe en mí, porque siempre creyeron que lograría cumplir mis sueños y llegar aun más lejos.

A mi asesor el Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, por confiar en mí y darme la oportunidad de participar en este proyecto, por sus sabios consejos y acertados comentarios que me permitieron culminar con esta nueva etapa de mi vida. Así mismo, a mi co-asesor el Dr. René de Jesús Romero Troncoso, por sus acertados comentarios y apoyo junto con el Dr. Roque en esta etapa de mi vida.

A mis profesores el Dr. Luis Morales Velázquez, Dr. J. Rooney Rivera Guillen, Dr. J. Jesús de Santiago Pérez, M. I. Carlos Rodríguez Doñate. Por su apoyo, asistencia y comentarios para el desarrollo de mi proyecto.

A mis amigos Yamile, Benigno, Carlos, Patricio, y en general a todos mis compañeros de Maestría, por su amistad y apoyo durante todo este tiempo. Y en honor a todos esos buenos momentos que compartimos juntos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación, y a una de las instituciones de alto nivel educativo como lo es la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), a la cual me siento muy orgulloso de pertenecer.

A todos GRACIAS.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Dedicatorias	III
Agradecimientos	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Índice de listados	X
I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo general	9
1.2.2. Objetivos particulares	9
1.3. Justificación	10
1.4. Planteamiento general	14
II. Revisión de la literatura	16
2.1. Estado del arte	16
2.1.1. Máquinas-herramienta	16

ÍNDICE GENERAL

2.1.2. Automatización de máquinas-herramienta	18
2.1.3. Dinámica de movimiento	23
2.1.4. Cómputo reconfigurable	27
2.1.5. Dispositivos FPGA	29
2.1.6. Lenguaje de descripción de hardware VHDL	32
2.1.7. Control de posición (Algoritmos)	34
2.1.8. Perfiles de movimiento	42
2.1.9. Perfiles polinomiales	46
III Metodología	51
3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC	54
3.1.1. Sistema mecánico	57
3.1.2. Sistema eléctrico de potencia	60
3.1.3. Sistema eléctrico de control	61
3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador	62
3.2.1. Generación de perfiles polinomiales	64
3.2.2. Generación de trayectorias (interpolador NURBS)	78
3.2.3. Algoritmo o ley de control	82
3.3. Etapa 3. Validación y verificación del sistema	84
IV Resultados	88
V. Conclusiones	91
Bibliografía	92
Apéndice	95

Índice de figuras

1.1. Actividad industrial en México a enero de 2010.	2
1.2. Diagrama general del proyecto	15
2.1. Torno CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).	21
2.2. Fresa CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).	22
2.3. Centros de maquinado CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).	22
2.4. Perfil en posición convencional.	24
2.5. Perfil en velocidad convencional.	25
2.6. Perfil en aceleración convencional.	25
2.7. Perfil del jerk convencional.	26
2.8. Celda lógica típica en un FPGA.	30
2.9. Celda de entrada/salida.	31
2.10. Celda de distribución.	31
2.11. Interconectividad en un FPGA.	32
2.12. Controlador básico de posición.	35
2.13. Perfil de posición en la naturaleza.	43
2.14. Perfil de velocidad en la naturaleza.	44
2.15. Perfil de aceleración en la naturaleza.	45
2.16. Perfil del jerk en la naturaleza.	45
3.1. Diagrama general a bloques del desarrollo del proyecto.	53
3.2. Fundición (máquina fresadora).	55

ÍNDICE DE FIGURAS

3.3.	Instrumentación de la máquina.	55
3.4.	Montaje de equipo y piezas mecánicas en la máquina.	59
3.5.	Diagrama de conexiones del sistema eléctrico de potencia.	60
3.6.	Diagrama de conexiones mínimo del sistema eléctrico de control.	62
3.7.	Diagrama del sistema de control de posicionamiento para máquinas CNC. . .	63
3.8.	Estructura del perfil polinomial de sexto grado en posición.	66
3.9.	Parámetros de diseño del perfil polinomial.	67
3.10.	Diagrama del módulo para la generación de perfiles polinomiales.	76
3.11.	Matriz triangular para la evaluación las NURBS, para el espació tridimensional.	80
3.12.	Diagrama del módulo para la generación de trayectorias.	81
3.13.	Sistema mecánico instrumentado.	84
3.14.	Sistema eléctrico de potencia instrumentado.	85
3.15.	Sistema eléctrico de control instrumentado.	85
3.16.	Referencia para prueba de movimiento en eje X	86
3.17.	Referencia para prueba de movimiento en eje Y	86
3.18.	Referencia para prueba de movimiento en eje Z	86
4.1.	Seguimiento para la referencia en el eje X , movimiento independiente. . . .	88
4.2.	Seguimiento para la referencia en el eje Y , movimiento independiente. . . .	89
4.3.	Seguimiento para la referencia en el eje Z , movimiento independiente. . . .	89
4.4.	Seguimiento para la referencia en los tres ejes(X , Y y Z), movimiento coordinado.	90

Índice de tablas

2.1. Dinámica de movimiento, ecuaciones generales.	42
3.1. Levantamiento general de los sistemas: mecánico, eléctrico de potencia y eléctrico de control.	56
3.2. Piezas mecánicas necesarias para el funcionamiento del sistema mecánico. . .	59

Índice de listados

3.1. Entidad principal del módulo de generación de perfiles	77
3.2. Entidad principal del módulo de generación de trayectorias	80
3.3. Entidad principal del módulo de generación de trayectorias	83

Capítulo I

Introducción

1.1. Antecedentes

En la actividad industrial con relación al sector de la manufactura, se abarcan actividades relacionadas con la transformación mecánica, física o química de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos. También se consideran manufacturadas las actividades de maquila; el ensamble de partes y componentes o productos fabricados; la reconstrucción de maquinaria y equipo industrial, comercial, etc. De acuerdo con información del INEGI sobre la actividad industrial en México, durante enero del 2010, en una comparación anual se reporta un incremento del 3.6% en términos reales de la actividad industrial durante el primer mes del año con relación del mismo mes del año anterior, en la Figura 1.1 se muestra la gráfica comparativa, [INEGI \(2010\)](#).

De acuerdo con Mauricio de María y Campos, director del Instituto de Investigaciones sobre Desarrollo Sustentable y Equidad Social de la Universidad Iberoamericana (UIA), la industria metalmecánica presenta una alta concentración de las exportaciones. Sin embargo, comenta que un problema de la industria manufacturera mexicana es el bajo crecimiento de su productividad laboral, debido en parte a la poca inversión en capacitación, investigación y desarrollo

1.1. Antecedentes

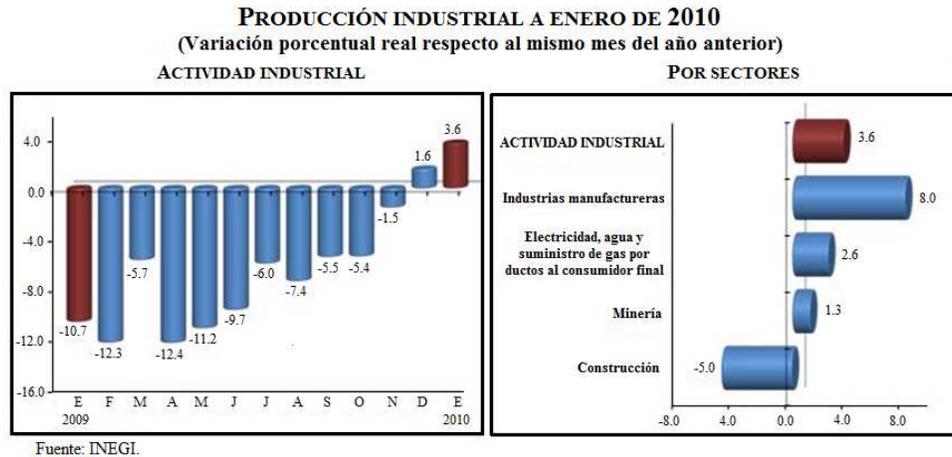


Figura 1.1: Actividad industrial en México a enero de 2010.

tecnológico, [Journalmex Periodistas de México \(2009\)](#).

La automatización de los procesos industriales es un factor de gran importancia que permite a las industrias continuar siendo competitivas dentro del mercado, donde los objetivos principales son: mejorar la calidad, la reducción continua de costos y acortar los tiempos de desarrollo del producto y del proceso simultáneamente, ([Figuera, 2006](#)). Para lograr esto, es necesario en gran parte diseñar y desarrollar sistemas de control robustos en funcionalidad. El proceso de manufactura en la rama metalmeccánica consiste en la transformación de materia prima sólida (metales) en un producto terminado mediante algún proceso de maquinado, en el cual se realiza el corte o la conformación de metales utilizando máquinas-herramienta, que por lo general, son máquinas de potencia, [Krar y Check \(2002\)](#). A partir de ahora se referirá a la industria de la manufactura implicando que la rama de interés en la cual se enfoca el presente trabajo es en la metalmeccánica.

Los productos elaborados por la industria de la manufactura deben tener ciertas características para cumplir con las exigencias del mercado, como un

1.1. Antecedentes

buen acabado a un costo adecuado. La calidad de un producto se obtiene si el proceso de manufactura cuenta con un adecuado sistema de control. En el caso particular del presente trabajo, las máquinas-herramienta son el medio por el cual se consigue un producto manufacturado, la calidad del producto depende de que tan eficiente y robusto sea el sistema de control implementado en la máquina.

El proceso de automatización industrial consiste en hacer que las máquinas sigan un orden predeterminado de operaciones con poca o ninguna mano de obra, usando equipos y dispositivos especializados que ejecuten y controlen el proceso en la forma deseada, [Kalpakjian y Schmid \(2002\)](#). La automatización de las máquinas-herramienta implica la implementación de sistemas de control y equipo especializado que les proporcionen la capacidad para manufacturar un producto. A continuación se presenta brevemente el desarrollo histórico de los sistemas de control en máquinas-herramienta.

Originalmente estas máquinas, conocidas como máquinas-herramienta de control numérico (NC, *Numerical Control*), fueron desarrolladas para cumplir con los requerimientos en el maquinado de partes complejas para aeronaves y en la fabricación de moldes, entre otros. La primer máquina-herramienta NC fue desarrollada por la compañía Parsons y el Laboratorio de Servomecanismos del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, *Massachusetts Institute of Technology*) en 1952. Esta primer generación de unidades usaban circuitos de electrónica digital y no contenían ninguna unidad de procesamiento central como ahora. En los años 70s, las máquinas-herramienta de control numérico por computadora (CNC, *Computed Numerical Control*) fueron desarrolladas con minicomputadoras como unidades de control. Con los avances en la electrónica y la tecnología computacional, los sistemas CNC actuales emplean diversos microprocesadores de alto rendimiento, controladores lógicos programables (PLC, *Programmable Logic Controller*), o procesadores digitales de señales (DSP, *Digital Signal Processor*), entre

1.1. Antecedentes

otras opciones, que trabajan en paralelo y de manera coordinada. Los sistemas CNC actuales permiten control simultaneo de velocidad y posición, monitoreo del controlador y rendimiento de la máquina, programación en línea de la pieza con asistencia gráfica, monitoreo del proceso de maquinado, y calibración de la pieza en el proceso para operaciones de mecanizado completamente sin intervención del operador. Los fabricantes ofrecen algunas de estas características como opciones, [Altintas \(2001\)](#).

Actualmente, existen máquinas-herramienta equipadas con sistemas CNC comercialmente disponibles, que representan opciones tecnológicas con un alto costo de adquisición. Se trata de sistemas completamente cerrados con un diseño muy propio y autoritario, es decir, son sistemas cuya arquitectura de control interna es fija y diseñada para aplicaciones específicas, por lo tanto, no pueden ser re-estructurados para ser utilizados en otras aplicaciones. Las necesidades de los usuarios que utilizan estos sistemas son diferentes, en muchos casos se requiere adaptar un sistema de control para cumplir con tales necesidades, por tal motivo los sistemas comerciales no son adecuados.

Para la adquisición de sistemas comerciales, solo las grandes empresas con los recursos suficientes son capaces de adquirir estos sistemas. No obstante, la mayor parte de la industria de la manufactura en la rama de la metalmecánica en el país se conforma por pequeñas y medianas empresas cuyos recursos son limitados para adquirir estos costosos sistemas. Una alternativa común a la que recurren las empresas de recursos limitados es la reconversión o actualización de maquinaria y equipo convencional, o al desarrollo de tecnología propia en hardware y software con apoyo de instituciones de investigación y universidades, dedicadas al desarrollo e investigación científica y tecnológica.

Las exigencias en la industria son claras, se necesitan máquinas con siste-

1.1. Antecedentes

mas CNC que permitan reducir los tiempos y costos de producción sin que se vea comprometida la calidad de los productos manufacturados. A pesar de los avances que se han tenido en esta materia, los sistemas actuales aun presentan problemas en el control de la dinámica durante el maquinado y se hacen más graves cuando se trabaja a altas velocidades. Un inadecuado sistema de control se refleja en un mal desempeño de la máquina, afecta en el acabado de las piezas manufacturadas, influye en el desgaste y en la vibración de los sistemas mecánicos de la misma.

En relación a los problemas en el control de la dinámica en maquinaria CNC, existen técnicas que tratan de minimizar estos efectos pero sólo los resuelven parcialmente, además son demasiado complicadas y costosas para implementarse comercialmente, debido al elevado número de complejas operaciones que se deben efectuar. En el caso de los sistemas comerciales los algoritmos implementados en sus controladores no son adecuados ni transparentes, ya que aun implementan técnicas de control convencionales. En conclusión, el problema en la implementación de nuevas técnicas es la limitada capacidad de procesamiento en los dispositivos utilizados y la complejidad computacional según la técnica propuesta. Una solución al problema consiste en utilizar dispositivos de alto desempeño como los arreglos de compuertas programables en campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*), Rivera (2007). Las ventajas de este tipo de dispositivos es que las funciones necesarias son descritas en hardware realizando procesamiento en paralelo (lo que incrementa la velocidad de procesamiento), además desarrollar una arquitectura portable y reconfigurable es debido a la posibilidad del usuario de definir la interconectividad de los bloques lógicos del FPGA.

A nivel local en la Universidad Autónoma de Querétaro se han realizado trabajos que presentan soluciones a los problemas presentes en los procesos de maquinado. En lo referente al monitoreo mediante una implementación en hardware, Romero (2004) desarrollo un sistema de supervisión del estado de la

1.1. Antecedentes

herramienta en una máquina CNC. El trabajo consistió en tres bloques: sensores y acondicionamiento de las señales, adquisición de datos y procesamiento de la señales. Cabe mencionar que fue el primero en implementarlo en un dispositivo FPGA mediante lenguaje de descripción en hardware para circuitos integrados de muy alta velocidad (VHDL, *Very high speed integrated circuit Hardware Description Language*).

En relación a algoritmos y esquemas de control se han presentado otros importantes trabajos como en [Osornio \(2004\)](#), quien desarrolló una tarjeta de control de movimiento basada en FPGA para tres ejes mediante el uso de lenguaje VHDL. En la tarjeta están incluidos los módulos del PID, un módulo de compensación de inercia y un módulo de control no-lineal proporcionado por un generador de trayectoria. Más tarde [Osornio \(2007\)](#), presentó el diseño y desarrollo de un sistema de control para servomotores de alta velocidad basado en FPGA, mediante el uso de la lógica programable. En su trabajo presentó algoritmos de referencia polinomiales a fin de obtener una mejora en el desempeño dinámico.

En lo referente al control de la dinámica en maquinaria CNC [Rivera \(2007\)](#), desarrolló algoritmos matemáticos para la generación de perfiles polinomiales que controlan la dinámica en posición, velocidad, aceleración y jerk (que es la razón de cambio de la aceleración). Los algoritmos fueron implementados en una estructura digital en un FPGA y aplicados a un eje de una fresadora CNC en tiempo real. Por su parte, [Morales \(2007\)](#) desarrollo un sistema con unidad USB para control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas, el sistema se compone de tres bloques: la interfaz USB, el regulador PID y el generador de perfiles. La integración del sistema se realizó en un FPGA empleando lenguaje VHDL con una arquitectura abierta.

A nivel internacional se han presentado en revistas indizadas otros tra-

1.1. Antecedentes

bajos que abordan en la problemática de los sistemas CNC, que se presentan a continuación. En relación a la generación de trayectorias [Liu \(2002\)](#), propuso un método para la generación de trayectorias de referencia con movimiento suave, tomando en cuenta las restricciones máximas dadas en velocidad, aceleración y jerk. Los algoritmos se basaron en modelos puramente cinemáticos. En su trabajo se presentaron simulaciones para la validación del sistema y una implementación en un microcontrolador SAB C167 para una máquina Pick & Place.

En relación a la generación de perfiles para el control en la dinámica de maquinaria CNC, [Osornio et al. \(2007\)](#), llevaron a cabo un análisis para la parametrización de perfiles polinomiales de grado mayor de aceleración/desaceleración, computacionalmente eficiente. El método propuesto se implementó en un controlador digital basado en FPGA y probado en un eje de una máquina fresadora CNC de alta velocidad. Posteriormente [Osornio et al. \(2008\)](#), presentaron una implementación en hardware basados en FPGA que consistió en un generador de perfiles polinomiales de grado mayor limitados en jerk, computacionalmente eficiente y de bajo costo para aplicación en maquinaria CNC y robótica. El algoritmo utiliza operaciones de suma en lugar de multiplicaciones para la construcción del perfil a fin de reducir la carga computacional. Sin embargo la resolución en bits de los datos utilizados es grande.

En relación a la la identificación de la dinámica en sistemas CNC [Santiago-Perez et al. \(2008\)](#), propusieron un método implementado en FPGA para obtener los parámetros dinámicos en el eje de una máquina CNC (velocidad, aceleración y jerk) a través de los datos de posición proporcionados por un encoder incremental óptico acoplado en el eje del motor. El método calcula la primera, segunda y tercera derivada de la señal de posición discreta y utiliza una técnica basada en la transformada wavelet discreta (DWT, *Discrete Wavelet Transform*) para reducir el ruido en la señal. La reconstrucción de la dinámica se lleva a cabo fuera de línea.

1.1. Antecedentes

Cuando se muestran las capacidades, flexibilidad, ventajas y características de implementar un sistema de control en hardware mediante el dispositivo FPGA es factible pensar en proponer soluciones para aplicaciones en las cuales se requiera de tareas complejas que implican alta carga computacional.

Retomando los sistemas comerciales, existen incluso sistemas de control de movimiento en tres dimensiones (3D) que intentan mejorar la dinámica en maquinaria CNC. Sin embargo, los algoritmos implementados en sus controladores no son transparentes, es decir, los algoritmos programados en el controlador son desconocidos para los usuarios sin la posibilidad de ser modificados para adaptarse a nuevas aplicaciones (sistemas cerrados). En otros casos aun se implementan perfiles convencionales que no presentan un buen desempeño en el control de la dinámica de maquinaria, cuando el nivel de calidad requerido en el maquinado es estricto.

De acuerdo con el análisis de la literatura, se han presentado trabajos que intentan mejorar el control de la dinámica en máquinas CNC. Estos trabajos ofrecen alternativas tecnológicas de bajo costo. Los temas que abordan es la generación de perfiles polinomiales y la generación de trayectorias de referencia. En relación a los perfiles polinomiales, que son el tema central de este trabajo de investigación, son utilizados para el control de los parámetros dinámicos en la máquina a saber: posición, velocidad, aceleración y jerk. El control de la dinámica se logra mediante el diseño de perfiles polinomiales que permitan al sistema lograr un excelente desempeño, manipulando la forma del perfil o restringiendo los valores máximos del mismo. Existen diferentes técnicas para la generación de perfiles polinomiales como las técnicas de parametrización de perfiles, [Osornio et al. \(2007\)](#), y la parametrización de perfiles polinomiales a trozos, [Rivera \(2010\)](#). Los perfiles polinomiales han demostrado excelentes resultados al ser aplicados

1.2. Objetivos

en maquinaria CNC ya que su diseño permite generar curvas suaves en posición, velocidad, aceleración y jerk, que se traduce en movimiento suave en la máquina, pero a un alto costo en términos de recursos computacionales. Adicionalmente, se hace énfasis que existen otros tipo de perfiles además de los perfiles basados en polinomios, ejemplo de ello son los perfiles convencionales triangular y trapecoidal en velocidad utilizados comúnmente en los controladores comerciales. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos hasta ahora presentados para el control de la dinámica en maquinaria CNC con la aplicación de perfiles polinomiales, aun no se ha presentado un trabajo formal que implemente este tipo de perfiles en maquinaria CNC de tres ejes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para la generación de perfiles polinomiales de referencia en 3D, para control de posición en máquina fresadora y su implementación en FPGA.

1.2.2. Objetivos particulares

1. Instrumentar una máquina fresadora CNC prototipo y habilitar el movimiento de los tres ejes de la misma.
2. Realizar el desarrollo matemático para la generación de perfiles polinomiales en tres dimensiones (3D).
3. Implementar en hardware la metodología para la generación de los perfiles polinomiales en 3D.

1.3. Justificación

4. Integrar los módulos de control (IP-cores) previamente desarrollados por el grupo de investigación HSPdigital de la UAQ y los módulos desarrollados para el control de posición de la máquina fresadora CNC en 3D.

1.3. Justificación

Los sistemas de control de movimiento comerciales que se encuentran actualmente disponibles, aunque robustos, tienen un alto costo de adquisición, sin mencionar que se trata de sistemas completamente cerrados, es decir, no permiten modificaciones adicionales en la estructura interna del controlador. En ocasiones, estos sistemas requieren recursos adicionales, de su propia marca, como apoyo del procesador de su arquitectura fija y cerrada, tal es el caso de PMAC, [Delta Tau \(2005\)](#), y GCM, [Galil Control Motion \(2005\)](#), dos de las firmas de controladores más populares para servomotores aplicados en máquinas CNC. Este tipo de marcas comerciales basan el diseño de sus controladores en DSPs y microcontroladores para la aplicación de los algoritmos de control, [Osornio \(2007\)](#).

Los sistemas cerrados y de aplicación específica, como es el caso de los sistemas comerciales CNC, no permiten que sus algoritmos de control sean modificados o adaptados para su uso en otras aplicaciones. Así mismo, estos algoritmos no son transparentes, es decir, son desconocidos para los usuarios finales, caso contrario al de los sistemas que implementan algoritmos en un diseño de arquitectura abierta. A diferencia de los algoritmos de arquitectura abierta, en los sistemas comerciales no es posible integrar nuevas funciones o tareas (módulos con funciones adicionales) en la estructura interna del controlador, por lo tanto, necesidades particulares de algún usuario no se pueden cubrir con este tipo de sistemas. La consecuencia directa de utilizar sistemas cerrados es que no todos los problemas, o necesidades, que se presentan en los sistemas que requieren control de movimiento pueden ser cubiertos.

1.3. Justificación

El análisis de la dinámica en una máquina CNC es un objeto de estudio que requiere especial enfoque para poder diseñar, desarrollar e implementar un sistema de control que sea adecuado para la misma. En tal análisis se contemplan factores que afectan directamente en el comportamiento dinámico de la máquina, mejor conocidos como parámetros dinámicos, a saber: posición, velocidad, aceleración y jerk, los cuales afectan en la vida útil de los componentes de la misma como lo son actuadores y sistemas mecánicos. Adicionalmente, los parámetros dinámicos afectan en la precisión del maquinado, y por lo tanto, en la calidad del acabado en una pieza manufacturada. Los efectos causados por estos parámetros se hacen más evidentes al trabajar en el maquinado CNC de alta velocidad y sus valores máximos deben ser tomados en consideración, ya que la máquina tiene limitaciones físicas.

Una herramienta muy útil que sirve para el análisis y control de la dinámica en máquinas CNC son los perfiles de movimiento, ya que ayudan a mejorar el comportamiento dinámico de la máquina. Teóricamente, los movimientos generados por las señales de control en un sistema CNC debieran ser lo más suaves posible. Si el movimiento es suave se evita causar daños en los componentes del sistema, así mismo, se evita la saturación de los actuadores que pueden generar vibraciones de alta frecuencia que causen el desgaste de los elementos que conforman el sistema mecánico.

En relación al diseño de perfiles de movimiento para el control en la dinámica de maquinaria CNC, los parámetros de importancia son la velocidad, la aceleración y el jerk. Más que el resto de los parámetros, la aceleración y el jerk afectan directamente y en gran medida en el comportamiento dinámico. Si los valores del jerk son muy grandes y no se encuentran distribuidos a lo largo del perfil de movimiento, los problemas generados se traducen en jalones bruscos en la

1.3. Justificación

máquina. Por otra parte, se debe tener cuidado que los cambios en los valores de la aceleración no sean grandes ni ocurran de forma repentina, ya que las limitaciones mecánicas y eléctricas de los actuadores no permitirían realizar movimientos tan rápidos en el sistema debido a la inercia de los elementos.

Los controladores comerciales aun implementan perfiles de movimiento convencionales como el triangular y trapezoidal en velocidad, cuya forma de onda esta descrita por segmentos lineales. Debido a la forma de la curva de estos perfiles se presentan problemas en los parámetros de aceleración y jerk, ya que estos parámetros se obtiene al derivar la función que describe al perfil de velocidad. Por otro lado, los perfiles basados en polinomios aplicados al control de la dinámica en maquinas CNC permiten un mejor desempeño de la máquina. La ventaja de los perfiles polinomiales sobre los perfiles convencionales es que su forma de onda esta descrita por curvas definidas por polinomios con un cierto grado. Por lo tanto, es posible diseñar perfiles polinomiales ya sea en posición, velocidad, aceleración e incluso jerk, de tal manera que la derivada o integral del perfil genere una nueva curva con ciertas características como: simetría o antisimetría, restricción en valores máximos, formas de onda suaves, entre otras.

En la Universidad Autónoma de Querétaro se han realizado trabajos que presentan soluciones al problema de control en la dinámica de maquinaria CNC, mediante la aplicación de perfiles polinomiales. Sin embargo, los esfuerzos se han centrado en la aplicación de este tipo de perfiles en máquinas CNC de dos ejes, principalmente en tornos CNC. Por lo tanto, es necesario extender la investigación en este campo para la aplicación de los perfiles polinomiales en maquinaria de tres ejes, como el caso de una máquina fresadora CNC. Por otro lado, aun no se ha reportado la implementación de este tipo de perfiles en un controlador digital basado en FPGA mediante una estructura en hardware para control de posición en tres dimensiones, en combinación con un interpolador basado en curvas pa-

1.3. Justificación

ramétricas.

Un perfil de movimiento puede describirse mediante un algoritmo matemático, si el nivel o grado de complejidad del algoritmo para la generación del perfil es mayor, se incrementa la carga computacional para la implementación del algoritmo en el controlador. Si se trata de perfiles polinomiales, se requiere utilizar controladores basados en dispositivos con gran capacidad de procesamiento, de tal forma que una implementación del algoritmo para aplicaciones en tiempo real no se vea comprometida por los recursos tecnológicos requeridos.

La tecnología ha avanzado mucho hoy día, con mejoras tanto en hardware como en software que permiten desarrollar e implementar control en infinidad de aplicaciones para cumplir y cubrir las necesidades que se presenten en el control de procesos. En este trabajo se plantea el desarrollo y la implementación en hardware de un algoritmo para la generación de perfiles polinomiales en 3D basado en un dispositivo de alto desempeño FPGA.

El uso de un dispositivos basado en FPGA proporciona diversas ventajas y beneficios. En primer lugar, este tipo de dispositivos se encuentran comercialmente disponibles a costos adecuados, dependiendo del tipo de dispositivo a utilizar. Los dispositivos FPGAs permiten bajo una arquitectura de procesamiento paralelo una alta velocidad de cómputo. Permiten desarrollar soluciones tipo sistema en un encapsulado (SoC, *System on a Chip*), que han estado ganando mercado recientemente. Es posible integrar unidades de procesamiento que son definidas por el usuario en hardware mediante un diseño en arquitectura abierta.

En el aspecto social, el aporte de módulos para sistemas de control permite a los usuarios contar con alternativas para el control de algún proceso, dado que estos módulos son de arquitectura abierta y reconfigurables. El usuario tiene

1.4. Planteamiento general

la posibilidad de implementar un sistema que se adapte a sus necesidades, ya que los sistemas comerciales son muy costosos, este tipo de trabajos presentan alternativas de control a un menor costo, sobre todo para las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMES).

1.4. Planteamiento general

El desarrollo del proyecto se divide en varias etapas, consistiendo en las actividades listadas a continuación:

1. Instrumentación de la máquina: mediante un levantamiento general se determinan todos los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos requeridos por la máquina, para ser implementados en la misma. El objetivo principal es la habilitación del movimiento en los tres ejes de la máquina.
2. Algoritmos para la generación de perfiles polinomiales: descripción de los algoritmos matemáticos sobre la base de los trabajos reportados y el análisis de la dinámica de la máquina.
3. Estructura digital: descripción de los algoritmos matemáticos mediante lenguaje de descripción de hardware VHDL.
4. Implementación en FPGA: implementación de los algoritmos descritos con VHDL en el dispositivo FPGA para pruebas de funcionalidad y desempeño de la máquina.
5. Pruebas de funcionalidad y desempeño: desarrollo de pruebas de movimiento y control de posición utilizando la metodología implementada en un controlador digital para observar el desempeño del sistema y verificar su funcionalidad.

1.4. Planteamiento general

6. Análisis de desempeño del sistema: análisis de funcionalidad y desempeño del sistema desarrollado en base a las pruebas de movimiento desarrolladas

El diagrama a bloques de la Figura 1.2, muestra de forma general las principales etapas del proyecto, es decir, la implementación del sistema.

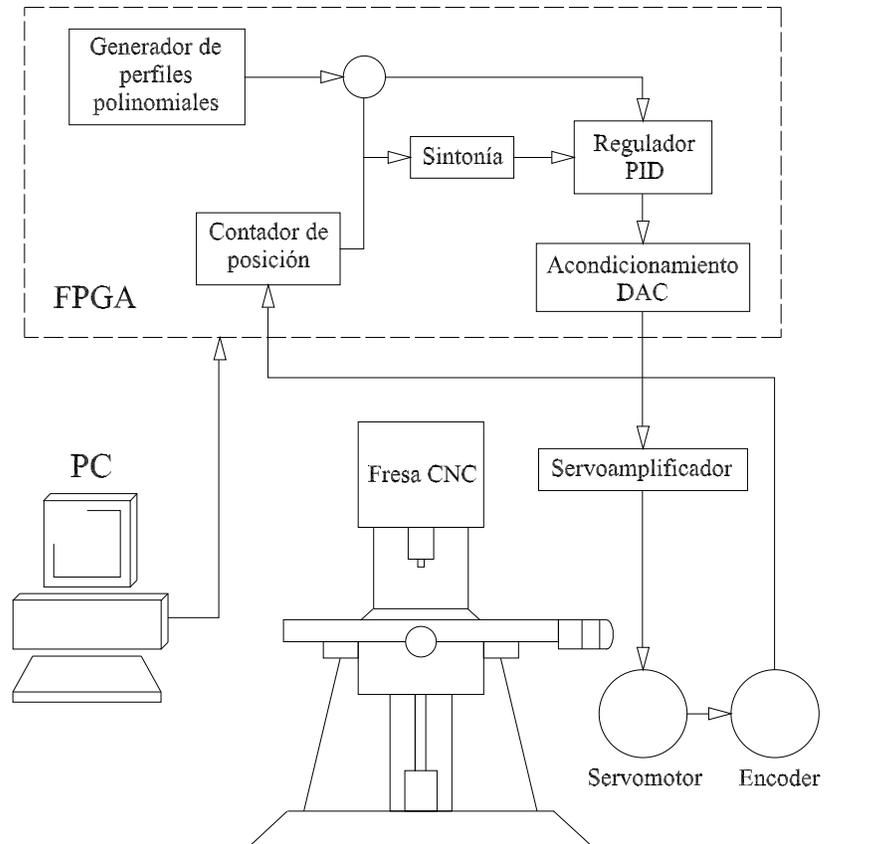


Figura 1.2: Diagrama general del proyecto

Capítulo II

Revisión de la literatura

2.1. Estado del arte

Tras la implementación de un sistema de control vienen dadas diversas consideraciones, limitaciones o restricciones, y problemas que son analizados y estudiados, estos aspectos se presentan desde el diseño del sistema de acuerdo a las necesidades de la implementación, durante la integración de los elementos y equipo que requiere el sistema de control, e incluso durante las pruebas de funcionalidad antes de la operación definitiva del sistema.

Existen herramientas que permiten abordar en un análisis más profundo para lograr el objetivo propuesto, desarrollar un adecuado sistema de control, en la literatura se proporcionan diversos conceptos y temas que se toman como base teórica para llevar a cabo tal análisis, y con ello es posible desarrollar el sistema de control de forma tal que sea óptimo y adecuado a los requerimientos de la aplicación.

2.1.1. Máquinas-herramienta

Las máquinas-herramienta, [Joshi \(2007\)](#), son dispositivos para el corte de materiales (principalmente metales), para dar la forma requerida. Éstas tienen

2.1. Estado del arte

un arreglo incorporado que facilita el uso de diversos tipos de herramientas de corte que pueden ser cambiadas para adecuarse a la tarea requerida, así mismo, se pueden reafilarse. El material removido por corte, usualmente es en forma de viruta, que bien puede ser viruta continua en forma de tira o como rebaba metálica.

Las máquinas-herramientas comunes que se utilizan para el corte o la conformación de metales y otros materiales no metálicos, de acuerdo con [Krar y Check \(2002\)](#), lo hacen mediante:

- La eliminación de viruta.
- Prensado, estirado o corte.
- Procesos de maquinado eléctrico controlados.

Cualquier máquina-herramienta por lo general es capaz de:

- ◇ Sujetar y apoyar la pieza de trabajo.
- ◇ Sujetar y apoyar una herramienta de corte.
- ◇ Impartir un movimiento adecuado (rotatorio o recíprocante) a la herramienta de corte o a la pieza de trabajo.
- ◇ Avanzar la herramienta de corte o la pieza de trabajo de forma que se logre la acción de corte y la precisión requerida.

Las máquinas herramienta que se encuentran en la rama metalmeccánica se dividen en tres clases principales:

1. Las máquinas productoras de viruta, que forman el metal al tamaño y forma deseados, retirando las secciones no deseadas.
2. Las máquinas no productoras de viruta, que dan forma y tamaño al metal prensando, estirando, punzonando o cortando.

2.1. Estado del arte

3. Las máquinas de nueva generación, que fueron desarrolladas para llevar a cabo operaciones que serían muy difíciles, sino imposibles de realizar en máquinas productoras o no productoras de viruta.

La máquina-herramienta es llamada “máquina madre” en el sentido de que se trata de una máquina que fabrica máquinas. En particular, como las máquinas-herramienta han avanzado de ser máquinas herramienta manuales a ser máquinas de control numérico, éstas se han vuelto perfectas en el rol de ser máquinas madre con su gran mejoría en precisión y velocidad de maquinado, [Suk et al. \(2008\)](#).

2.1.2. Automatización de máquinas-herramienta

A cerca de este tema [Suk et al. \(2008\)](#), explican algunos conceptos interesantes. La automatización de las máquinas-herramienta convencionales trajo consigo el desarrollo de lo que conocemos como máquinas-herramienta de CN, que pueden ser clasificadas como “máquinas de corte” o “máquinas de no-corte”, mecánicamente tienen una función similar a las máquinas convencionales, sin embargo, existe una gran diferencia al tratarse de máquinas automatizadas y es que cuando las máquinas de CN fueron desarrolladas, el propósito de estas fue maquinar partes que tuvieran una forma compleja y que lo hicieran de una manera precisa, cosa que con las máquinas convencionales operadas por un usuario era casi imposible. El controlador numérico fue primeramente aplicado a máquinas fresadoras, pero recientemente para mejorar la productividad se ha extendido la aplicación de estos controladores a diversos tipos de máquinas-herramienta. De hecho, los sistemas de CN son usados no solamente para máquinas-herramienta, sino además, para todas las máquinas que necesiten movimiento controlado por servo sistemas en general.

Las tareas necesarias para la producción de una pieza utilizando una

2.1. Estado del arte

máquina de CN pueden ser clasificadas entre los siguientes tres tipos:

1. Tareas fuera de línea: CAD (*Computer Aided Design*; diseño asistido por computadora), CAPP (*Computer Aided Process Planning*; planeación de proceso asistido por computadora), CAM (*Computer Aided Manufacturing*; manufacturación asistida por computadora).
2. Tareas en línea: Maquinado del CN, monitoreo y mediciones en la máquina.
3. Tareas post-línea: CAI (*Computer Aided Inspection*; inspección asistida por computadora), post-operación.

Tareas fuera de línea, son aquellas que se requieren para generar la parte del programa para controlar la máquina de CN. En la etapa fuera de línea, después que la forma de una pieza ha sido decidida, un modelo geométrico de esta pieza es creado por medio del CAD en 2D o 3D, análisis y diseño son incluidos en esta etapa. Posterior al modelado geométrico, la información necesaria para el maquinado se lleva a cabo por medio del CAPP, aquí la selección de la herramienta, tiempos de maquinado, secuencias y condiciones de corte son establecidas. En la etapa final, mediante el CAM la parte del programa es generada, las trayectorias de la herramienta son generadas basandose en la información del CAD y en la información de maquinado del CAPP.

Tareas en línea, son aquellas que se requieren para maquinar partes usando la máquina de CN. La parte del programa generada en la etapa anterior, que son las instrucciones de la máquina, pueden ser directamente cargadas en el CN por el usuario. En esta etapa, el sistema de CN lee e interpreta el programa de la memoria y controla el movimiento de los ejes. El sistema de CN genera instrucciones para el control de la velocidad y posición basado en el programa y los servomotores son controlados basados en las instrucciones generadas. Como la rotación de un servomotor es transformada en movimiento lineal por medio de un

2.1. Estado del arte

tornillo de bolas, la pieza de trabajo o la herramienta es movida, y finalmente, la parte es maquinada por estos movimientos. En la etapa en línea, el estado de la máquina y el proceso de maquinado pueden ser monitoreados durante el proceso. Actualmente, detección de ruptura de la herramienta, compensación de deformación térmica, control adaptativo, y compensación de deflexión de la herramienta basado en el monitoreo de la fuerza de corte, calor, y corriente eléctrica son aplicados durante el maquinado.

Las tareas post-línea es llevar a cabo el CAI, inspeccionando la parte maquinada. Se lleva a cabo una comparación entre la pieza terminada y el modelo geométrico para ejecutar las compensaciones correspondientes.

Como se menciona anteriormente, a través de las tres etapas, es posible para las máquinas-herramienta no solamente satisfacer la alta precisión y productividad, sino además, maquinar partes con una forma compleja también como formas simples. Debido a que las máquinas de CN pueden maquinar una variedad de partes cambiando el programa y repetidamente maquinar la misma forma de la pieza almacenando el programa, las máquinas de CN son usadas para propósitos generales.

El CN es el sistema que habilita a la máquina-herramienta para maquinar partes con diversas formas rápida y precisamente. En el CN el servomotor es usado para controlar la máquina-herramienta de acuerdo a la operación de un usuario. Esto es, el CN es un dispositivo de control que maquina una pieza objetivo activando al servomotor de acuerdo con los comandos establecidos. El CN combinado con tecnología computacional es llamado control numérico por computadora CNC. Una máquina de CN, la cual consiste de tubos de vacío, transistores, circuitos, elementos lógicos tales como circuitos LSI (*Large-Scale Integrated Circuits*; circuitos integrados de gran escala) es llamada “máquina de CN en hardware”,

2.1. Estado del arte

y realiza funciones de CN a través de la conexión de elementos por medio de cableado eléctrico. En lugar de elementos y circuitos, las funciones del CN son implementadas basadas en software en un CNC. Es decir, este cambio del CN en hardware al CNC fue llevado a cabo por los avances en capacidad y disponibilidad de los microprocesadores y de memoria. A tal sistema CNC se le conoce también como “CN en software”.

Actualmente diversas máquinas-herramientas cuentan con un sistema CNC, entre la principal maquinaria CNC tenemos las siguientes, [Krar y Check \(2002\)](#):

Torno: se utiliza para producir piezas redondas. La pieza de trabajo, sostenida por un dispositivo de sujeción montado en el eje del torno, se hace girar contra la herramienta de corte, lo que produce una forma cilíndrica. La imagen del torno CNC se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Torno CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).

Fresa: horizontal y vertical son dos de las herramientas más útiles y versátiles. Ambas máquinas utilizan una o más fresas o cortadores giratorios que tiene uno o más filos cortantes. La pieza de trabajo, que debe quedar sujeta en una prensa de tornillo, o con un aditamento o accesorio para fijar a la mesa, es avanzada o alimentada hacia la herramienta de corte giratoria. La imagen de una máquina fresadora CNC se muestra en la Figura 2.2.

2.1. Estado del arte

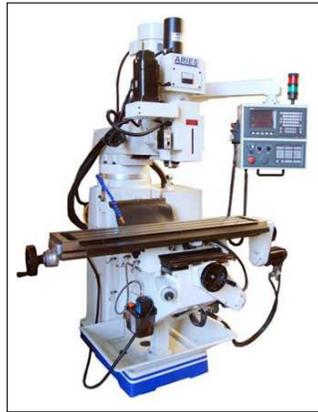


Figura 2.2: Fresa CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).

Centro de maquinado: puede funcionar ya sea como un torno o una fresadora, la función depende de los requerimientos del usuario y de la herramienta que se seleccione, ya que combina diversos tipos de herramientas de corte, el cambio lo realiza de forma automática el CNC. La Figura 2.3 muestra centros de maquinado CNC.



Figura 2.3: Centros de maquinado CNC (Fuente: www.maquinariamacias.com).

Los avances en la tecnología de las máquina-herramientas y en los sistemas CNC mejoraron notablemente las características del maquinado, permitiendo altos niveles de precisión además de ser capaces de producir mayor número de piezas de forma homogénea, un alto rendimiento de la máquina con largos periodos entre el mantenimiento de la misma, reducción de los costos de producción al optimizar el proceso de maquinado (optimizando el consumo de energía, uso de la herramienta de corte, mejorando el tiempo de producción, etc.) sin embargo,

2.1. Estado del arte

aún con los avances en los sistemas de control numérico computarizado es necesaria una mayor capacidad de procesamiento de la información para operaciones en línea.

2.1.3. Dinámica de movimiento

Al hablar de sistemas CNC y máquinas-herramienta, se debe hacer un análisis de las características que se desean para el sistema y la máquina en conjunto, por tal, para una óptima operación del proceso de maquinado se requiere hacer un enfoque en la dinámica de movimiento de la máquina, se trata de un factor de gran importancia para los sistemas de control de máquinas CNC pues requieren movimiento controlado. Un sistema de control adecuado considera los diversos factores que puedan afectar e intervenir en la operación del proceso a controlar por el sistema, el controlador habilita a la máquina para llevar a cabo una acción bajo ciertas consideraciones, estas deberán cumplir con una referencia deseada y un movimiento rápido y preciso, además de cubrir dichas consideraciones, a su vez deben ser tomados en consideración los factores y las limitaciones físicas del proceso, ya sea que se trate de limitaciones por el medio donde se requiere hacer el control o por el dispositivo físico que se quiere controlar.

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 jerk 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. Un perfil de movimiento describe el comportamiento dinámico que tiene un sistema mecánico al moverse, [Rivera \(2007\)](#). Existen infinitas formas de realizar un movimiento en una máquina CNC, pero el perfil de movimiento que se elija debe tomar en consideración los siguientes aspectos dinámicos:

2.1. Estado del arte

Posición: debe ser un movimiento suave, sin cambios bruscos. El movimiento que cumple con estas características está presente en la naturaleza y la Ecuación matemática que lo describe está definida por la tangente hiperbólica, el movimiento en una máquina CNC se debe aproximar a esta Ecuación. En la Figura 2.4 se muestra un perfil en posición utilizado en controladores convencionales.

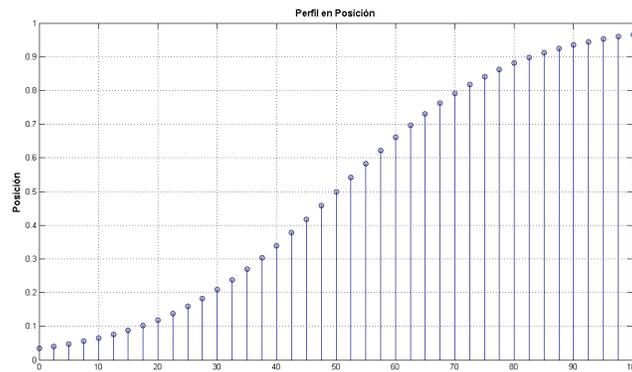


Figura 2.4: Perfil en posición convencional.

Velocidad: debe iniciar en cero, incrementarse gradualmente hasta llegar a una velocidad máxima (limitada por una fricción cinética y las características de los motores empleados por la máquina CNC) y decrementarse paulatinamente hasta llegar nuevamente a cero manteniendo el mismo signo durante todo el movimiento. La Figura 2.5 muestra unos de los perfiles en velocidad utilizado en los controladores convencionales, también lo hay trapezoidal.

Aceleración: no debe tener cambios bruscos a lo largo de toda la trayectoria dado que es imposible acelerar un motor de forma instantánea, si no se tiene cuidado con esto se pueden generar vibraciones en los sistemas mecánicos que provocan el desgaste de las uniones y severos errores de seguimiento que se traducen en un mal acabado de las piezas. Además, debido a la inercia mecánica que se puede generar al mover una máquina CNC algunas veces es necesario que los tiempos de aceleración y desaceleración sean diferentes. La Figura 2.6 muestra

2.1. Estado del arte

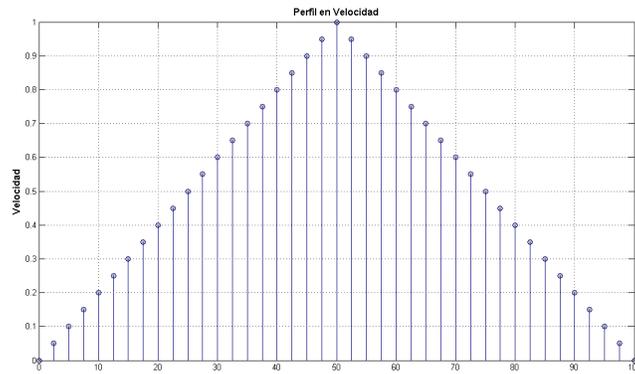


Figura 2.5: Perfil en velocidad convencional.

uno de los perfiles en aceleración utilizado en los controladores convencionales.

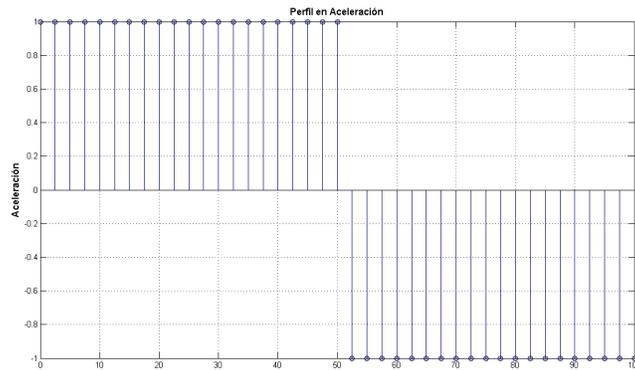


Figura 2.6: Perfil en aceleración convencional.

Sacudida (Jerk): se define como la razón de cambio de la aceleración y es el aspecto dinámico más importante a tomar en consideración cuando se controla la dinámica de movimiento ya que se relaciona directamente con el consumo de corriente de la máquina CNC, sacudidas grandes se traducen en un consumo de corriente alto y en vibraciones mecánicas. Para minimizar este efecto, es recomendable que el jerk sea muy bajo al inicio y al final del movimiento y que se distribuya a lo largo de todo el perfil. Esto garantiza un consumo de corriente bajo, un mínimo de desgaste en la máquina CNC y errores pequeños lo que se traduce en una mejora en el acabado de las piezas. En la Figura 2.7 se observa uno de los perfiles del jerk de controladores convencionales.

2.1. Estado del arte

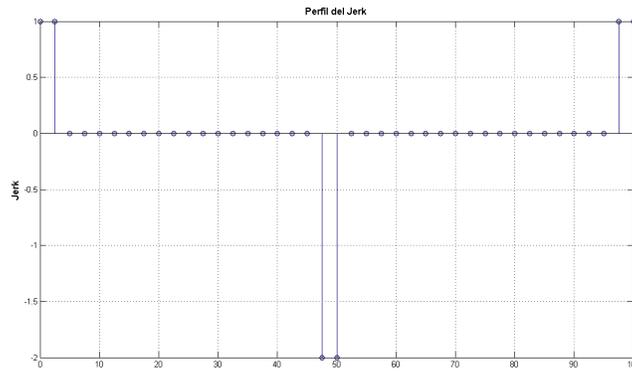


Figura 2.7: Perfil del jerk convencional.

Como se observa de las figuras, los perfiles convencionales no son los más óptimos para ser aplicados en un control de movimiento de una máquina CNC. El objetivo de la generación de perfiles es mejorar las características dinámicas del sistema como obtener movimientos más suaves con menos sobrepaso y lograr una mayor exactitud en el movimiento, [Morales \(2007\)](#).

Para la correcta operación de una máquina CNC es necesario generar perfiles de movimiento para la trayectoria de referencia del controlador, la generación de la trayectoria de referencia juega un papel clave en el control computarizado de las máquinas-herramienta. Las trayectorias generadas no solamente deben describir el movimiento de la herramienta con precisión, deben además incluir perfiles cinemáticos suaves para mantener el alto nivel de precisión del movimiento, y evitar la excitación de los modos naturales de vibración de la estructura o sistema de control del servomecanismo. Efectos indeseados son más evidentes cuando se trata de maquinado a alta velocidad, tales efectos tienen una relación directa con el valor del jerk. A altas velocidades, pequeñas discontinuidades en el movimiento de referencia de la herramienta puede resultar en armónicas de alta frecuencia indeseables en la trayectoria de referencia, excitando los modos naturales de vibración de la estructura mecánica y al sistema de control del servomecanismo. Tales componentes de alta frecuencia pueden saturar a los actuadores, así como

2.1. Estado del arte

degradar los ejes de la máquina y por tanto la precisión del contorneado se ve afectada, [Erkorkmaz y Altintas. \(2001\)](#).

Es claro que los perfiles comerciales convencionales tienen serios problemas en la dinámica de movimiento, principalmente en el perfil que tiene mayor efecto en la máquina que es el jerk, estos problemas no han sido completamente resueltos a pesar de las diversas técnicas que existen para el análisis de la dinámica de movimiento en una máquina CNC como lo son filtros digitales, las técnicas de interpolación, curvas S, NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*; spline-base rotacionales no uniformes), polinomios de orden superior, polinomios a trazos, etc., sin embargo, todas estas técnicas se enfrentan a una limitante y es que los sistemas CNC convencionales utilizan una computadora para el procesamiento de la información así como para el cálculo y evaluación de sus algoritmos según la técnica de análisis dinámico empleada, tales operaciones representan una gran carga computacional y por tal motivo se requiere de un mayor tiempo de cómputo y es imposible llevar a cabo una aplicación del control en tiempo real debido al periodo de muestreo mínimo especificado en la industria, que es de 1 ms. La solución a este problema sería implementar los algoritmos en un dispositivo en hardware (FPGA) que permita incrementar la capacidad de cómputo y velocidad de procesamiento para desarrollar el control en tiempo real. El cómputo reconfigurable es una herramienta para ello.

2.1.4. Cómputo reconfigurable

En las dos décadas desde que los FPGAs fueron introducidos, estos han cambiado radicalmente la manera en que la lógica digital es diseñada y mostrada. Uniendo el alto rendimiento de los ASICs (*Application-Specific Integrated Circuits*; circuitos integrados de aplicación específica) y la flexibilidad de los microprocesadores, los FPGAs han hecho enteramente posible nuevos tipos de aplicaciones.

2.1. Estado del arte

Esto ha ayudado a los FPGAs a suplantar a los ASICs y a los DSPs (*Digital Signal Processor*; procesador digital de señales) en algunas aplicaciones tradicionales.

Para obtener el mayor provecho de esta única combinación de rendimiento y flexibilidad, los diseñadores necesitan estar al tanto en temas tanto de hardware como de software. Así, un usuario de FPGA debe pensar no solo en las compuertas necesarias para realizar un cálculo, sino también sobre el flujo de software que apoya el proceso de diseño.

En el mundo de la electrónica y la computación, estamos acostumbrados a realizar el cómputo de dos maneras distintas: hardware y software. El cómputo en hardware tales como los ASICs proporcionan recursos altamente optimizados para un rápido desempeño de las tareas críticas, pero es configurado permanentemente para una única aplicación a través de un diseño de varios millones de dólares y el esfuerzo de fabricación. El cómputo en software proporciona la flexibilidad de cambiar las aplicaciones y realizar un gran número de tareas diferentes, pero es varios ordenes de magnitud peor que las implementaciones en ASICs en términos de desempeño.

Los FPGA son dispositivos verdaderamente revolucionarios que combinan los beneficios del hardware y del software. Estos implementan circuitos como el hardware, proporcionan alta capacidad, área y beneficios de desempeño sobre el software, puede ser reprogramado a un bajo costo y de manera simple para ser implementado en un amplio rango de tareas. Al igual que el hardware, los FPGAs implementan cálculos espaciales, simultáneamente ejecutando millones de operaciones en los recursos distribuidos a través de un chip de silicio. Tales sistemas pueden ser cientos de veces más rápidos que los diseños basados en microprocesador. Sin embargo, a diferencia de los ASICs estos cálculos son programados en el chip, sin que estén permanentemente congelados por el proceso de manufactura-

2.1. Estado del arte

ción. Esto significa que un sistema basado en un FPGA puede ser programado y reprogramado varias veces.

Algunas veces la reprogramación es meramente una corrección de errores para corregir alguna anomalía en el comportamiento, o se utiliza para agregar una nueva característica. Otras veces se utiliza para hacer una reconfiguración de algún cálculo genérico para una nueva tarea, o incluso para volver a configurar un dispositivo durante la operación y permitir que una única pieza de silicio simultáneamente realice el trabajo de numerosos chips de propósito específico, [Hauck y Dehon \(2008\)](#).

2.1.5. Dispositivos FPGA

Con el objeto de optimizar aún 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 (*Read-Only Memory*; memoria de solo lectura) son poco recomendables para la síntesis de funciones lógicas debido a su muy bajo nivel de utilización y que los circuitos PLD (*Programmable Logic Device*; dispositivo lógico programable) aún tienen grandes desperdicios de recursos, se buscó una alternativa que permitiera el uso de una mayor cantidad de componentes y una eficiencia superior. Estos circuitos son conocidos por el acrónimo FPGA (*Field Programmable Gate Array*; arreglo de compuertas programables en campo) y se basan en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales, y una mucho mayor interconectividad que sus contrapartes. Mientras más pequeñas resulten las celdas lógicas, mayor aprovechamiento se puede tener de las mismas, aunque los retardos pueden aumentar.

Las celdas básicas de un FPGA son mucho más simples que las macroceldas de un PLD, y dependiendo del proveedor de circuitos, ésta será su consti-

2.1. Estado del arte

tución. Cada proveedor y cada familia de FPGA ofrecen una versión diferente de la celda básica. Todo FPGA tiene tres grupos de celdas básicas que son:

1. Celda lógica
2. Celda de entrada/salida
3. Celda de distribución

La celda lógica es la que existe 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.

En la Figura 2.8 se muestra una celda lógica típica de un FPGA, y en las Figuras 2.9 y 2.10 se muestran la celda de entrada/salida y de distribución respectivamente.

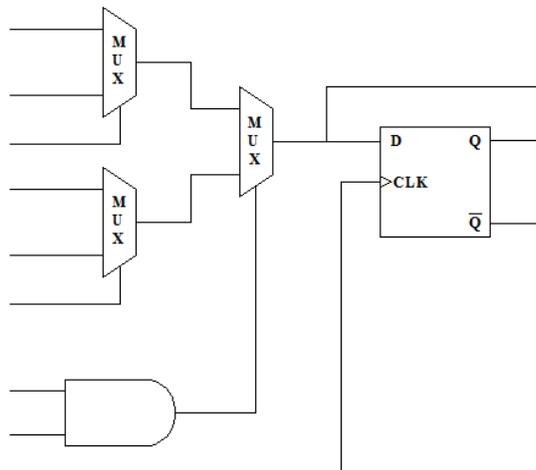


Figura 2.8: Celda lógica típica en un FPGA.

2.1. Estado del arte

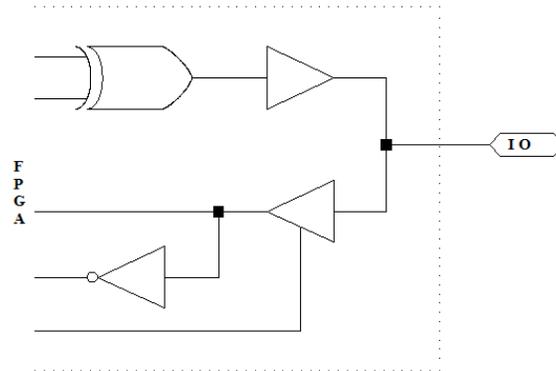


Figura 2.9: Celda de entrada/salida.

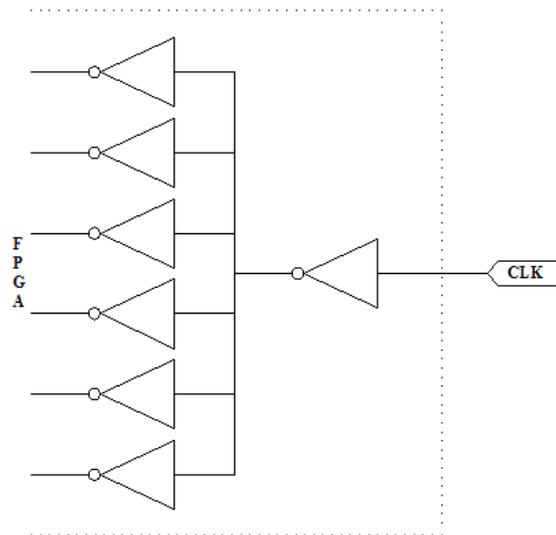


Figura 2.10: Celda de distribución.

2.1. Estado del arte

Al contrario de lo que ocurre con los PLDs, la interconectividad en un FPGA está restringida a celdas adyacentes exclusivamente. Con esto se permite mucho menor consumo de potencia y por consiguiente, un mayor nivel de integración. El diagrama de bloques de la interconectividad típica en un FPGA se muestra en la Figura 2.11. Cabe mencionar que este tipo de dispositivo es el que ha ganado un mayor mercado en las aplicaciones modernas de diseño digital y se pueden contar con unidades que van desde las 50,000 hasta los 10,000,000 de compuertas lógicas equivalentes, [Romero \(2007\)](#).

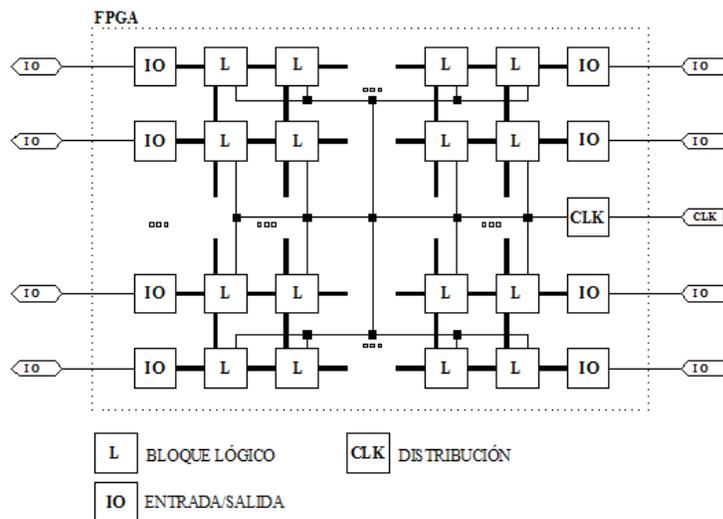


Figura 2.11: Interconectividad en un FPGA.

2.1.6. Lenguaje de descripción de hardware VHDL

El lenguaje VHDL describe el comportamiento de un circuito o sistema electrónico, del cual el circuito o sistema físico puede ser implementado.

El VHDL es soportado por el Lenguaje de Descripción de Hardware VH-SIC (*Very High Speed Integrated Circuits*; circuitos integrados de muy alta velocidad). Se trata de una iniciativa fundada por el Departamento de Defensa de los

2.1. Estado del arte

Estados Unidos en 1980, que condujo a la creación del VHDL. Su primera versión fue el VHDL 87, posteriormente actualizado al llamado VHDL 93. El VHDL fue el primer lenguaje de descripción de hardware estandarizado por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*; Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), a través del estándar IEEE 1076. Un estándar adicional, el estándar IEEE 1164, fue posteriormente agregado para introducir un sistema lógico multi-valuado.

El VHDL es usado para la síntesis así como para la simulación de circuitos. Sin embargo, aunque el VHDL es completamente simulable, no todas las estructuras del VHDL son sintetizables.

Una motivación fundamental para utilizar el VHDL (o su similar el Verilog), es que el VHDL es un lenguaje estándar independiente de tecnología/fabricante, y por lo tanto es un lenguaje portable y reusable. Las dos aplicaciones inmediatas del VHDL son en el campo de los dispositivos lógicos programables, incluyendo los CPLDs (*Complex Programmable Logic Devices*; dispositivos lógicos programables complejos) y los FPGAs, y en el campo de los ASICs. Una vez que el código VHDL ha sido escrito, este puede ser usado ya sea para implementarse en un circuito de un dispositivo programable (de Altera, Xilinx, Atmel, etc.) o puede ser implementado en la fundición de un chip ASIC. Actualmente muchos chips comerciales complejos (microcontroladores, por ejemplo) son diseñados usando tal enfoque.

Una nota final en cuanto al VHDL es que, contrario a los programas de computadora regulares los cuales son secuenciales, sus sentencias son inherentemente concurrentes (en paralelo). Por esa razón, el VHDL es usualmente referido como a un código más que como a un programa. En el VHDL, solamente las sentencias escritas dentro de un PROCESO, FUNCIÓN, o PROCEDIMIENTO son

2.1. Estado del arte

ejecutadas secuencialmente, [Volnei \(2004\)](#).

2.1.7. Control de posición (Algoritmos)

Una característica de los controladores son los algoritmos implementados para el control del proceso especificado. Todo sistema físico puede ser descrito por una expresión u algoritmo matemático, en base al análisis del proceso que requiere ser controlado se desarrollan los algoritmos que mejor describen el comportamiento de un proceso, así mismo, se desarrollan algoritmos que modifican el comportamiento del proceso haciéndolo más eficiente o para corregir anomalías y perturbaciones que le afecten.

Para realizar movimientos de precisión en máquinas CNC dentro de un intervalo de tiempo definido es necesario el empleo de un controlador de posición que coordine la ejecución del movimiento. El controlador recibe instrucciones (por lo general de una computadora) acerca del movimiento que se desea realizar. La mínima información necesaria para efectuar el movimiento es la posición final y el tiempo en que se debe ejecutar el movimiento. Con estos datos el controlador actúa por medio de servomotores acoplados a cada grado de libertad, [Rivera \(2007\)](#). El diagrama de la Figura 2.12 muestra los elementos básicos que debe tener un controlador de posición.

Para control de movimiento de maquinaria CNC, las tareas del controlador se dividen en dos: generación de la trayectoria y el seguimiento de ésta. Las dos tareas se realizan independientemente y ambas se requieren para generar el movimiento. A continuación se describen los elementos del diagrama del controlador de acuerdo con [Osornio \(2004\)](#) para la descripción de motor, sensor de posición, amplificador y controlador, y de acuerdo con [Rivera \(2007\)](#) para la descripción de sintonía, generador de perfiles, base de tiempo, contador de posición e interfaz

2.1. Estado del arte

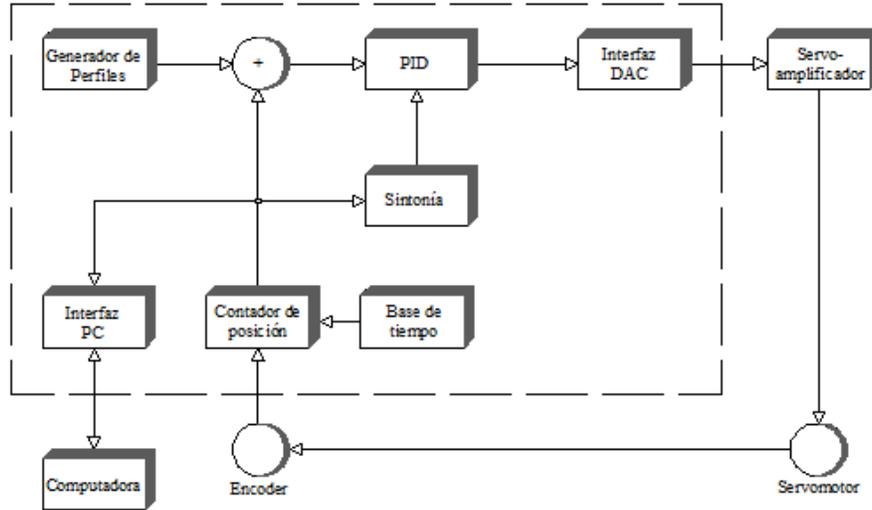


Figura 2.12: Controlador básico de posición.

PC:

Motor y carga

La operación de los motores de CD, es modelada mediante tres ecuaciones que describen sus propiedades dinámicas, eléctricas y de torque. La Ecuación 2.1 eléctrica relaciona la tensión del motor, V_m , la corriente I y la velocidad ω .

$$V_m = rI + L\frac{dI}{dt} + K_e\omega \quad (2.1)$$

r y L son la resistencia e inductancia de carga de armadura, respectivamente. El término $K_e\omega$ representa la tensión que se induce, también conocido como fuerza contraelectromotriz. La Ecuación 2.2 representa el torque correspondiente al motor y a la entrada de corriente.

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

donde K_t , es el torque constante dl motor. La Ecuación 2.3 dinámica muestra la relación del torque y la velocidad, J es el momento total de inercia del

2.1. Estado del arte

motor y de la carga, B es la fricción viscosa del motor y la carga que normalmente se asume como cero, T_L es la constante de torque de oposición que incluye la fricción, el torque gravitacional, etc.

$$J \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + B\omega + T_L = T_g \quad (2.3)$$

Amplificador

Los amplificadores más comunes operan en modo corriente o torque. En este modo el amplificador tiene como salida una corriente, I , esta es directamente proporcional a la tensión de entrada, V . El factor proporcional, K_a , conocida como la ganancia del amplificador y tiene unidades de ampere por voltio, tal relación se muestra en la Ecuación 2.4.

$$I = K_a V \quad (2.4)$$

Como la corriente es aplicada al motor, esta genera un torque proporcional T_g con un factor proporcional K_t , como se muestra en la Ecuación 2.5. La constante K_t es conocida como la constante de torque y sus unidades son torque por ampere.

$$T_g = K_t I \quad (2.5)$$

La generación de torque acelera el motor en un intervalo α 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 ña fricción opuesta, esto se muestra en la Ecuación 2.6.

$$J\alpha + T_f = T_g \quad (2.6)$$

La velocidad del motor, ω , es la integral de la aceleración, α . Para sim-

2.1. Estado del arte

plificar el análisis, se aplica la transformada de Laplace, obteniendo la expresión en la Ecuación 2.7.

$$\omega = \frac{1}{s}\alpha \quad (2.7)$$

De forma similar, la posición angular del motor, θ , es la integral de la velocidad, como se indica en la Ecuación 2.8.

$$\theta = \frac{1}{s}\omega \quad (2.8)$$

Combinando ahora las Ecuaciones 2.4 a la 2.8, para encontrar una función de transferencia, la cual relaciona el efecto de la entrada de tensión, V , en la posición del motor, θ . Este modelo representa el efecto combinado del motor y del amplificador. La precisión del motor esta afectada por dos entradas, la tensión V y la fricción T_f . Debido a la naturaleza lineal del sistema, se puede separar el efecto de las dos entradas. Por lo tanto, cuando se examina el efecto de V , se puede ignorar el efecto de T_f . El resultado combinado de la función de transferencia se muestra en la Ecuación 2.9. La Ecuación se basa en que el motor es rotatorio y el amplificador opera en modo corriente.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K_a K_t}{J s^2} \quad (2.9)$$

Sensor de posición

Mediante el sensor de posición se monitorea la posición del motor, θ , y genera la señal de retroalimentación C . el primer paso en el modelo es la relación entre la velocidad ω y la posición θ . Dado que θ es la integral de ω , esta relación puede ser expresada mediante la Ecuación 2.10.

$$\frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{s} \quad (2.10)$$

2.1. Estado del arte

La señal de retroalimentación C , es proporcional a θ . Ya que θ esta dada en radianes y C es expresada en cuentas como unidad de resolución. El sensor de posición puede ser modelado como un factor de proporcionalidad K_f , como lo muestra la Ecuación 2.11. Las unidades de K_f son cuentas por radianes.

$$\frac{C}{\theta} = K_f \quad (2.11)$$

El sensor de posición más común es el encoder incremental con dos canales en cuadratura. Se supone que el sensor genera N pulsos por revolución en ambos canales A y B . Esto produce un resolución efectiva de $4N$ cuentas por revolución, generando una ganancia de retroalimentación, este efecto se muestra en la Ecuación 2.12.

$$K_f = \frac{4N}{2\pi} \quad (2.12)$$

Controlador

El controlador cierra el lazo de posición mediante la retroalimentación de las señal C , la posición actual del motor; que se compara con la señal de referencia R , y se determina la diferencia, la cual es denominada error de posición E , indicado en la Ecuación 2.13.

$$E = R - C \quad (2.13)$$

Esta señal de error, es procesada por el filtro digital para generar una señal de salida X . Esta señal digital es aplicada al convertidor digital analógico que produce la señal de comando de movimiento V .

La función primaria del filtro digital es la de estabilizar el lazo de posición; esta función se logra a menudo por medio de un compensador de adelanto. La segunda función del filtro es la de perfeccionar la precisión del sistema, esto se

2.1. Estado del arte

logra con un integrador. La combinación de estas dos funciones se puede lograr con un **PID** o con un **compensador de adelanto-atraso**.

La función matemática del filtro 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. Suponemos que un filtro tiene una función de transferencia continua $F(s)$, y que el mismo filtro 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 mediante la transformada bilineal que se indica en la Ecuación 2.14.

$$s = \frac{2(z - 1)}{T(z + 1)} \quad (2.14)$$

De manera similar, para convertir $D(z)$, con un período de muestreo T a $F(s)$, se realiza mediante la Ecuación 2.15 derivada de la transformación bilineal.

$$z = \frac{1 + Ts}{1 - Ts} \quad (2.15)$$

Controlador PID. Es es un caso especial de controlador de atraso-adelanto de fase. El controlador puede ser dividido en tres partes. La primera parte es el término proporcional el cuál produce el término X_p , que es proporcional a E , como se muestra en la Ecuación 2.16.

$$X_p = PE \quad (2.16)$$

La segunda operación del controlador es producida por una señal de salida X_d , la cuál es proporcional a la derivada del error, esta parte se representa por la Ecuación transformada 2.17.

2.1. Estado del arte

$$X_d = sDE \quad (2.17)$$

La tercera parte es la de un integrador X_i , que se indica por la Ecuación 2.18.

$$X_i = \frac{I}{s}E \quad (2.18)$$

En la Ecuación 2.19 se muestra que la señal de salida del controlador, X , es la suma de las tres componentes:

$$X = X_p + X_d + X_i \quad (2.19)$$

La función de transferencia $F(s)$, relacionada con el filtro de salida, X , y el error de posición se indica en la Ecuación 2.20.

$$F(s) = \frac{X}{E} = P + sD + \frac{I}{s} \quad (2.20)$$

Este filtro es conocido como filtro PID y es el más común en sistemas de control de movimiento y asume una operación continua. Esto es sólo un modelo equivalente del proceso digital.

La señal de salida del controlador, X , es convertida después a una forma analógica por un circuito conocido como DAC (*Digital to Analog Converter; convertidor digital-analógico*). Un DAC es caracterizado por su resolución, la cuál varía típicamente entre ocho y dieciséis bits, y el intervalo de salida en voltios el cuál es típicamente entre -10 a 10 Voltios. La ganancia efectiva del DAC, K es igual al número de voltios que éste produce por unidad de la señal X . Cuando la señal de la salida oscila entre -10 a 10 Voltios, y la resolución del DAC es de n bits, la ganancia del DAC se indica en la Ecuación 2.21.

2.1. Estado del arte

$$K = \frac{20}{2^n} \quad (2.21)$$

Sintonía

Se encarga de identificar la planta que se esta controlando, en este caso una máquina CNC. Para identificar la planta, se requiere medir la respuesta de la máquina a una perturbación controlada; cuando se identifica el comportamiento de la máquina se establecen los parámetros del PID en función de los valores entregados por la planta.

Generador de perfiles

Este bloque se encarga de proporcionar una referencia variable que debe seguir el controlador PID, esta referencia variable es el perfil de movimiento que contiene toda la información de la dinámica de movimiento con la que se desea que trabaje la máquina CNC.

Base de tiempo

El controlador de posición debe trabajar a una frecuencia de muestreo por lo menos de 1KSPS, las operaciones realizadas por cada bloque dentro del FPGA se realizan con una frecuencia mucho mayor por lo que es necesario contar con una base de tiempo que haga que el controlador actúe sobre la máquina CNC a una frecuencia de muestreo que esté dentro de los estándares industriales y además permita la interacción de cada bloque de forma sincronizada.

Contador de posición

A este bloque se le envían los pulsos obtenidos del encoder para encontrar la posición en la que se encuentra la máquina. Este valor se compara con la

2.1. Estado del arte

posición de referencia que proporciona el generador de perfiles y el controlador PID se encarga de minimizarlo.

Interfaz PC

El controlador de posición debe recibir las órdenes de movimiento, se debe establecer la posición final, y el tiempo en que se realiza el movimiento. Es común que las órdenes sean dadas por una computadora que a la vez se apoya de software CAM para generar las órdenes necesarias para el controlador de movimiento, estas instrucciones son interpretadas por la interfaz PC para que el controlador de posición las ejecute.

2.1.8. Perfiles de movimiento

Las características de movimiento suave y sin discontinuidades que optimizan la dinámica de un sistema mecánico en máquinas CNC, vienen dadas principalmente por la generación de perfiles de movimiento. La relación de los parámetros considerados en la dinámica de movimiento (posición X , velocidad V , aceleración A y jerk J) para la generación de perfiles se muestra en la Tabla 2.1, [Rivera \(2007\)](#). En la tabla se muestran las ecuaciones en función del tiempo continuo t y en función de un tiempo discreto k , estas ultimas son de mayor utilidad para una aplicación real, es decir, pueden ser implementadas en un controlador digital.

Tiempo continuo t	Tiempo discreto k
$X(t) = \int_0^t V(t)dt$	$X(k) = V(k) + X(k-1)$
$V(t) = \frac{d}{dt}X(t) \circ V(t) = \int_0^t A(t)dt$	$V(k) = X(k) - X(k-1) \circ V(k) = A(k) + V(k-1)$
$A(t) = \frac{d}{dt}V(t) \circ A(t) = \int_0^t J(t)dt$	$A(k) = V(k) - V(k-1) \circ A(k) = J(k) + A(k-1)$
$J(t) = \frac{d}{dt}A(t)$	$J(k) = A(k) - A(k-1)$

Tabla 2.1: Dinámica de movimiento, ecuaciones generales.

2.1. Estado del arte

Se ha mencionado que los perfiles utilizados en los controladores comerciales, por ejemplo, triangular en velocidad y trapezoidal en velocidad y aceleración, no son los que satisfacen de manera eficiente las características de un movimiento suave y preciso. Sin embargo, en la naturaleza existen perfiles que cumplen con la característica de suavidad en el movimiento, esto es debido a que el comportamiento se encuentra bien distribuido a lo largo de todo el perfil, las figuras siguientes muestran los perfiles en la naturaleza y su comportamiento durante el movimiento.

La Figura 2.13, muestra el perfil de posición en la naturaleza, en comparación con el perfil de los controladores convencionales no existe significativa diferencia, se observa de la figura que el inicio y el fin del movimiento es suave.

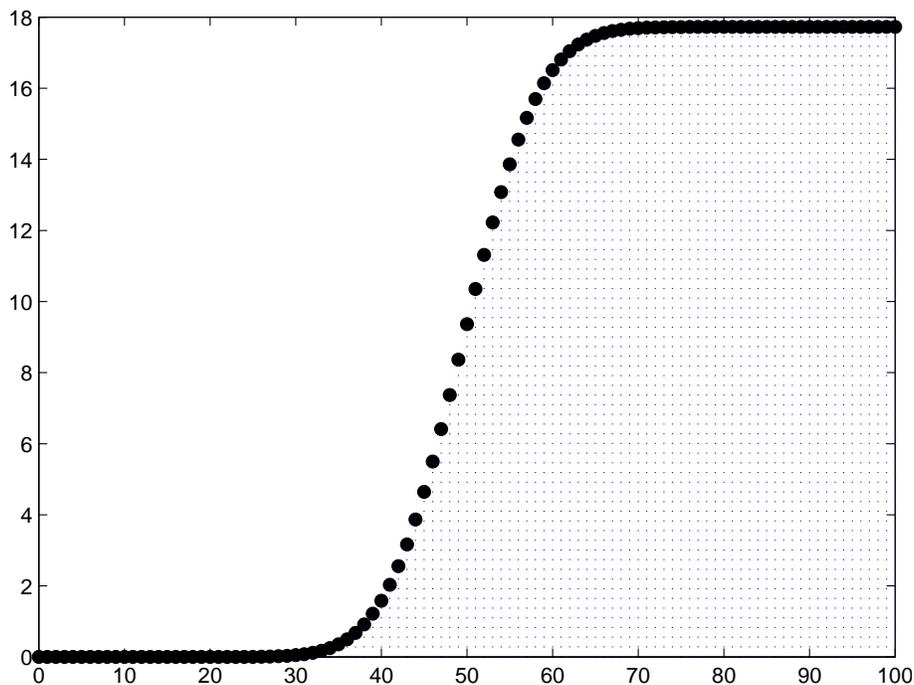


Figura 2.13: Perfil de posición en la naturaleza.

El perfil de velocidad, Figura 2.14, inicia suave, se incrementa de forma gradual llegando a su máximo y se va decrementando gradualmente hasta cero nuevamente, se observa que el pico de la gráfica y al final el movimiento también

2.1. Estado del arte

es suave.

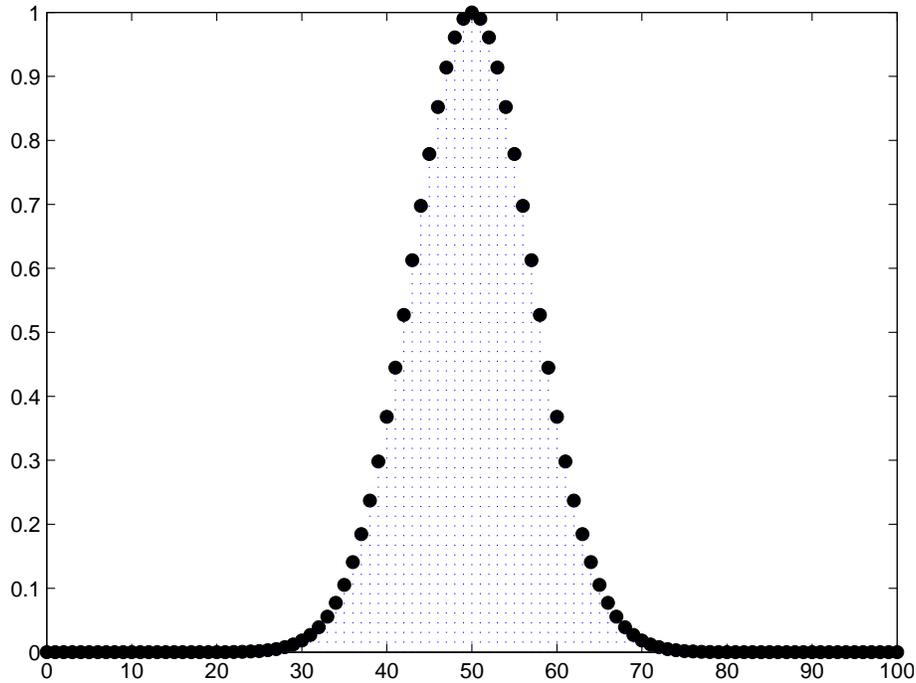


Figura 2.14: Perfil de velocidad en la naturaleza.

Para el caso del perfil de aceleración en la naturaleza, Figura 2.15, se observa que no se tienen cambios bruscos, los valores de la aceleración inician y terminan en cero en una forma muy suave y el perfil se encuentra distribuido durante todo el movimiento, se observa una diferencia mayor al comparar este perfil con el perfil convencional en aceleración aplicado en los controladores comerciales.

En el caso del perfil del jerk en la naturaleza, Figura 2.16, se tienen valores pequeños, completamente distribuidos durante todo el perfil, iniciando y terminando en cero, además de estar distribuido se observa que el movimiento es suave para todo el perfil.

2.1. Estado del arte

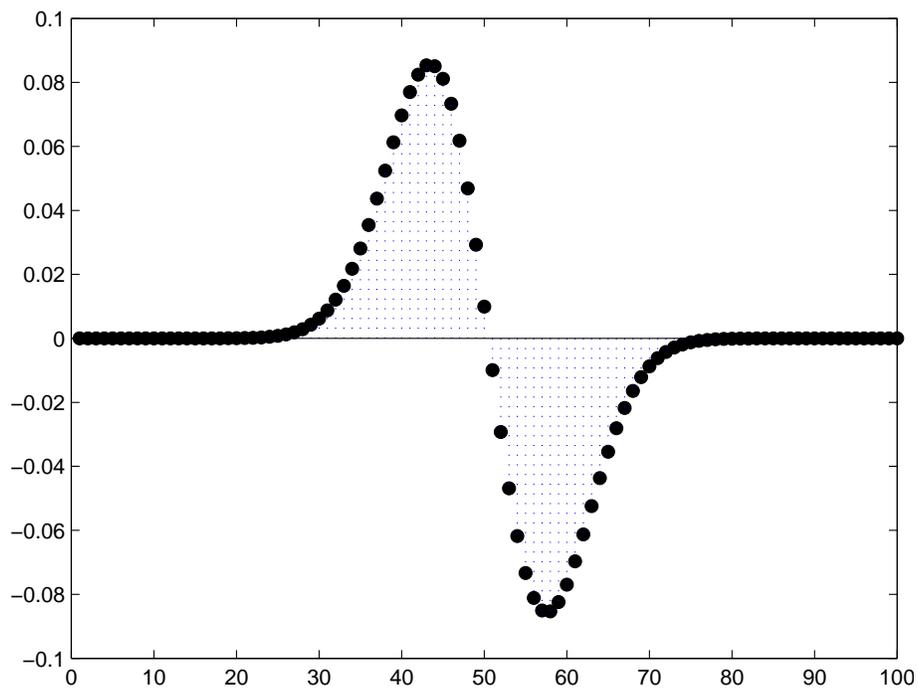


Figura 2.15: Perfil de aceleración en la naturaleza.

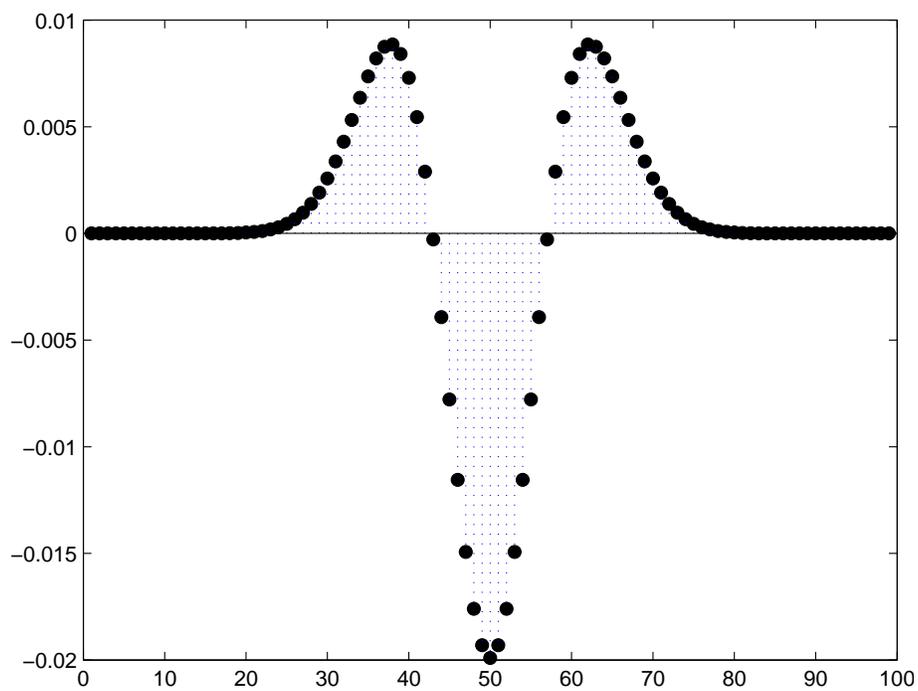


Figura 2.16: Perfil del jerk en la naturaleza.

2.1.9. Perfiles polinomiales

Llamamos polinomio P con coeficientes en \mathbb{R} a toda expresión de la forma:

$$P(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n \quad (2.22)$$

O también expresado como una sumatoria de $n + 1$ términos de las potencias de la variable x de 0 hasta n , además la restricción es que el coeficiente de la potencia mayor sea mayor que cero.

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (2.23)$$

En cuanto a la parametrización de un polinomio, el **teorema de complejidad** especifica que para poder caracterizar cualquier polinomio de grado n se necesitan $n + 1$ parámetros.

Las formas que un polinomio puede tener se expresan en las Ecuaciones (2.22) y (2.23), así como en forma vectorial, siendo la multiplicación del vector de coeficientes por un vector de las potencias de las variables, como se muestra en la Ecuación (2.24).

$$P(x) = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \cdots & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ \vdots \\ x^n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Si se expresa el polinomio en su forma factorizada se tiene la Ecuación (2.25).

$$P(x) = a_n(x - z_1)(x - z_2) \cdots (x - z_n) \quad (2.25)$$

2.1. Estado del arte

Donde z son las raíces del polinomio. Otra forma de expresar un polinomio para reducir el esfuerzo de evaluación del mismo es como se muestra en la Ecuación (2.26).

$$P(x) = (((((0 + a_n)x + a_{n-1})x + a_{n-2})x + \dots + a_1)x + a_0 \quad (2.26)$$

Un controlador opera en forma digital, por lo cual, se requiere introducir el concepto de polinomio discreto expresado por la Ecuación (2.27).

$$W_K(k) = \sum_{p=0}^n a_p k^p \quad (2.27)$$

Anteriormente se explicó que una correcta dinámica de movimiento en una máquina CNC, debería satisfacer un movimiento suave, preciso y sin discontinuidades entre otros aspectos, y los perfiles convencionales no cumplen con estas características. Existen diferentes técnicas que tratan de hacer más optima la dinámica de una máquina. Sin embargo, una adecuada generación de perfiles de movimiento se desarrolla por medio de polinomios de grado superior, esta técnica implica una gran carga computacional al momento de evaluar tales polinomios, una alternativa a este inconveniente es utilizar técnicas de generación de perfiles polinomiales a trazos, siendo una ventaja de utilizar este tipo de perfiles el hecho de que permiten tener intervalos diferentes para la aceleración, así como para la desaceleración.

La aplicación de este tipo de técnicas para la generación de perfiles se ve comprometida por el tiempo de cálculo requerido para la evaluación del polinomio, por lo que se propone una técnica de evaluación del mismo, [Rivera \(2007\)](#), donde la multiplicación no es aplicada, en vez de ello se utilizan sumas. Se especifica que el dominio de un polinomio comprende de $-\infty$ a ∞ , pero para la

2.1. Estado del arte

problemática de perfiles de movimiento solo requerimos un intervalo del dominio total.

La parametrización de un polinomio es el proceso matemático mediante el cual se extrae el número mínimo de cantidades finitas que son necesarias para reconstruir el polinomio dado de un algoritmo, [Osornio et al. \(2008\)](#). Por lo tanto:

Sea $W_K(k)$ un polinomio discreto en k de grado n para K muestras a ser evaluadas. Las diferencias discretas recursivas Δ^j en $W_K(k)$ están dadas por la Ecuación (2.28)

$$\begin{aligned}\Delta W_K(k) &= W(k) - W(k-1) \\ \Delta^2 W_K(k) &= \Delta W(k) - \Delta W(k-1) \\ &\vdots \\ \Delta^n W_K(k) &= \Delta^{n-1} W_K(k) - \Delta^{n-1} W_K(k-1) \\ \Delta^{n+1} W_K(k) &= 0\end{aligned}\tag{2.28}$$

En cada diferencia discreta el grado del polinomio se reduce en uno, por lo que la n -ésima diferencia discreta de $W_K(k)$ es una constante y la $(n+1)$ -ésima diferencia es igual a cero, esto es válido solo para un polinomio con dominio de $-\infty$ a ∞ . De la Ecuación (2.28) se puede deducir el algoritmo para obtener la integración discreta de un polinomio a partir de la diferencia, es decir, para la reconstrucción del polinomio original $W_K(k)$, como lo muestra la Ecuación (2.29).

$$\begin{aligned}\Delta^n W_K(k) &= \Delta^n W_K(k-1) \\ \Delta^{n-1} W_K(k) &= \Delta^n W_K(k) + \Delta^{n-1} W_K(k-1) \\ &\vdots \\ \Delta W(k) &= \Delta^2 W_K(k) + \Delta W(k-1) \\ W(k) &= \Delta W_K(k) + W(k-1)\end{aligned}\tag{2.29}$$

Para poder reconstruir recursivamente $W_K(k)$ de la Ecuación (2.29), en

2.1. Estado del arte

el punto de inicio $k = 0$, el valor de las n diferencias debe ser conocido en $k = -1$ como parámetros, los cuales son las diferencias: $\Delta^n W_K(-1)$, $\Delta^{n-1} W_K(-1)$, $\Delta^1 W_K(-1)$ y $W_K(-1)$. Esto quiere decir que, si se conocen las diferencias discretas de grado n de un polinomio en un punto dado y el valor mismo del polinomio en ese punto, el polinomio se puede reconstruir completamente mediante relaciones recursivas.

Si se esta tratando con un polinomio truncado por otra parte, Ecuación (2.30), que es valido solamente en un intervalo del dominio total, la $(n + 1)$ -esima diferencia es igual a un conjunto de parámetros que se conocen como deltas de Kronecker, Ecuación (2.31), mediante estos parámetros es posible reconstruir el polinomio truncado.

$$W_K = \begin{cases} W(k) & 0 \leq k \leq K \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\Delta^{n+1} W_K(k) = \sum_{j=1}^{n+1} G_j \delta(k - j) + \sum_{j=1}^{n+1} D_j \delta(k - K - j) \quad (2.31)$$

Son dos los conjuntos que conforman las deltas de Kronecker de la Ecuación (2.31), el primero siendo la generación del polinomio, Ecuación (2.32), y el segundo es la disolución o cancelación del polinomio, Ecuación (2.33).

$$G_j = - \sum_{i=j}^{n+1} (-1)^i \binom{n+1}{i} W(j - i) \quad (2.32)$$

$$D_j = - \sum_{i=j}^{n+1} (-1)^i \binom{n+1}{i} W(K + j - i) \quad (2.33)$$

Se concluye que se requieren $2(n + 1)$ parámetros para reconstruir un polinomio discreto en k de grado n para un intervalo finito, ya que tanto el conjunto generador como para el de disolución se tienen $n + 1$ deltas de Kronecker.

2.1. Estado del arte

La expresión $\binom{n+1}{i}$ es la distribución binomial dada por la Ecuación (2.34).

$$\binom{n+1}{i} = \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!} \quad (2.34)$$

Para la generación de los perfiles polinomiales a trazos se puede implementar esta técnica, por medio de la superposición lineal de la parametrización de cada uno de los polinomios P , estos polinomios no son del mismo grado necesariamente.

Capítulo III

Metodología

Una máquina CNC de cualquier tipo vista como un sistema total esta conformada por diversos elementos y equipos, tanto en hardware como en software. La integración de todos estos componentes definen las características del sistema hablando en términos de funcionalidad. Estos competentes pueden ser clasificados de diversas maneras, en el presente trabajo por conveniencia la clasificación se realiza dividiendo el sistema total CNC en sistemas más simples que componen a la máquina, a saber: sistema mecánico, sistema eléctrico de potencia, sistema eléctrico de control y sistemas de lubricación y refrigeración. Los componentes de la máquina se encuentran dentro de alguna de éstas clasificaciones dependiendo de su funcionamiento. Como ejemplo se tiene el controlador de movimiento que se clasifica por obvias razones dentro del sistema eléctrico de control.

Por otro lado, un sistema de control de movimiento se puede ver como la integración de diversos módulos, cada uno con una función específica, implementados en un controlador digital, entre los módulos más importantes se tienen: el generador de perfiles, el cual tiene como objetivo principal el control en la dinámica de la máquina; el generador de trayectorias, que tiene como propósito principal lograr un buen seguimiento de la herramienta; la ley o algoritmo de control, que sirve para realizar las correcciones del error de seguimiento y la identificación de parámetros, en donde se obtiene un adecuado modelo de la planta a ser controla-

da, entre otros. La integración de éstos módulos en un controlador digital tiene el objetivo de lograr un buen funcionamiento de la máquina.

Los problemas que se presentan en los sistemas CNC son variados, la mayoría de las investigaciones realizadas a los mismos se concentran desde el punto de vista del controlador. Sin embargo, cabe aclarar que para implementar un sistema de control de movimiento en una máquina, esta debe tener la capacidad para ejecutar las ordenes del controlador. El trabajo realizado para el desarrollo del proyecto se muestra de forma global en el diagrama a bloques de la Figura 3.1. El diagrama muestra tres etapas principales en las que se dividió el trabajo. La primera etapa consistió en términos generales en la instrumentación y reconversión de una máquina fresadora vertical CNC de tres ejes, se aclara que el alcance del trabajo fue la habilitación del movimiento de las bancadas. La segunda etapa consistió en el desarrollo e implementación de la metodología para la generación de perfiles polinomiales en tres dimensiones para el control de posición de la máquina fresadora, en la sección del presente capítulo correspondiente a este tema se presenta el desarrollo a detalle de la implementación realizada, desde los algoritmos matemáticos hasta su implementación en módulos en un sistema de control digital basado en un dispositivo FPGA. Finalmente, la tercera etapa consistió en la verificación y validación del trabajo desarrollado, es decir, se verificó el trabajo realizado en las primeras dos etapas mediante un serie de pruebas de movimiento.

Es importante mencionar que durante el desarrollo de todo el proyecto se tomó en consideración la elaboración de una adecuada documentación, y se procuró en ella tener orden, estructura y formalidad. La importancia de la documentación se justifica en el hecho que durante todo el tiempo dedicado al desarrollo del trabajo la consulta de datos técnicos, diagramas de conexiones, diseño, tablas, etc, se hace presente. A continuación en las siguientes secciones se describen a detalle las etapas en que consistió la presente investigación.

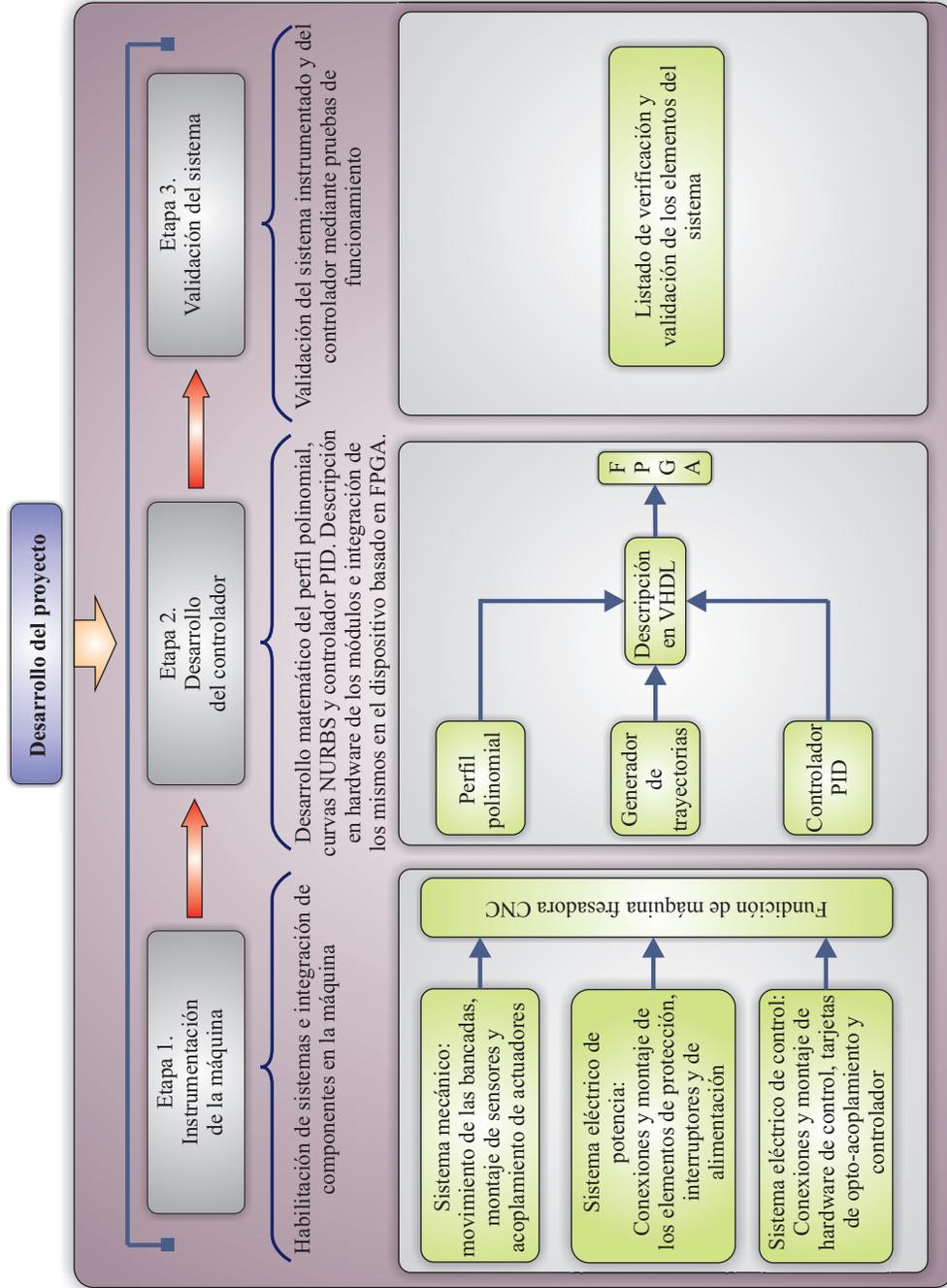


Figura 3.1: Diagrama general a bloques del desarrollo del proyecto.

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

Al inicio del proyecto se contaba prácticamente con la fundición de una máquina fresadora vertical CNC de tres ejes, mostrada en la Figura 3.2, para su funcionamiento ésta requería de la instrumentación y reconversión, prácticamente total, de todos los sistemas de la misma; mecánico, eléctrico de potencia, eléctrico de control, lubricación y refrigeración. Sin embargo, el alcance del presente trabajo se limitó a poner en funcionamiento aquellos sistemas que habilitaron el movimiento de las bancadas de la máquina (para los tres ejes, X , X y Z), por lo tanto, los sistemas seleccionados y en los cuales se concentró el trabajo para ésta primera etapa fueron: sistemas mecánico, eléctrico de potencia y eléctrico de control.

En el diagrama de la Figura 3.3 se muestran los elementos mínimos para la instrumentación y reconversión de la máquina fresadora por eje, a excepción del controlador y la PC. En la sección dedicada a la etapa dos del procedimiento se presenta el desarrollo de la metodología implementada en el controlador para la generación de los perfiles polinomiales en 3D para el control de posición de la máquina. Como se observa del diagrama los elementos requeridos para la instrumentación y reconversión de la máquina pertenecen a diferentes sistemas de la misma, por ejemplo, el motor, sensor de límite y elementos de acoplamiento mecánico pertenecen al sistema mecánico, mientras que el controlador, servo-amplificador y tarjeta de opto-acoplamiento pertenecen al sistema eléctrico de control.

Antes de comenzar con el proceso de reconversión e instrumentación de la máquina fue necesario como primer tarea realizar un levantamiento general del estado de la misma, es decir, se realizó una evaluación de las condiciones en las que

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC



Figura 3.2: Fundición (máquina fresadora).

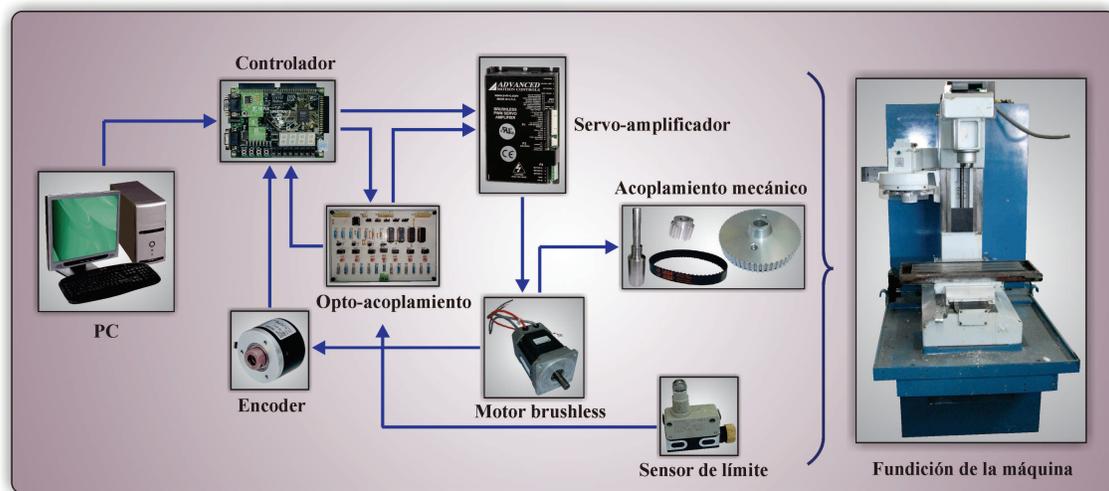


Figura 3.3: Instrumentación de la máquina.

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

se encontró la máquina. La evaluación se realizó sobre los sistemas seleccionados para la habilitación del movimiento. De forma general, ésta evaluación consistió en definir el estado y condiciones de cada sistema, indicar los elementos con los que cuenta y los componentes faltantes, adicionalmente, se especificaron las acciones a realizar de manera global para poner en funcionamiento cada sistema. En la Tabla 3.1, se muestra el levantamiento general realizado para los sistemas en cuestión.

<i>Sistema</i>	<i>Documentación</i>	<i>Equipo</i>	<i>Acciones a realizar</i>
Sistema mecánico	No se cuenta con diagramas dimensiones o especificaciones de los componentes del sistema	Se cuenta con los motores de los tres ejes sin montar. Los motores requieren de acoplamiento por bandas. Las piezas mecánicas para el acoplamiento no están completas. No se tienen los sensores de límite de las bancadas, ni las piezas mecánicas para la activación de los mismo. Falta la contratapa para el montaje del motor en el eje Z	Se requiere manufacturar las piezas mecánicas necesarias para el acoplamiento mecánico de los motores, así como las piezas mecánicas para la activación de los sensores de límite. Es necesario cotizar y conseguir los sensores de límite, así como las bandas para el acoplamiento. Se debe manufacturar la contratapa de la base del motor del eje Z
Sistema eléctrico de potencia	No se cuenta con el diagrama de la instalación del sistema eléctrico de potencia	El sistema tiene una instalación eléctrica incompleta realizada previamente. Se tienen los elementos necesarios para redefinir la instalación eléctrica. Se cuenta con los elementos para la alimentación de los servo-amplificadores	Redefinir la instalación del sistema eléctrico de potencia y elaborar diagrama de conexiones, realizar la instalación de acuerdo al diagrama. Verificar la señales de voltaje de los elementos en el sistema y señales de alimentación
Sistema eléctrico de control	No se cuenta con el diagrama del sistema. Se cuenta con las especificaciones de motores, sensores y servo-amplificadores para su revisión	Se cuenta con los servo-amplificadores de los tres motores de la máquina sin montar. No se cuenta con las tarjetas de opto-acoplamiento	Elaborar un diagrama de conexiones de los elementos de control. Diseñar y construir las tarjetas de opto-acoplamiento. Montar el equipo en el gabinete de la máquina y realizar las conexiones necesarias para las pruebas de movimiento de la máquina

Tabla 3.1: Levantamiento general de los sistemas: mecánico, eléctrico de potencia y eléctrico de control.

El levantamiento general de la máquina (evaluación del estado y condiciones de la máquina) solo considera de forma global las acciones que se desarrollaron para el proceso de reconversión. Sin embargo en cada sistema se especifican los detalles del procedimiento realizado. En general para el caso de los tres sistemas en los que se trabajó se consideraron los siguientes aspectos:

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

- ◇ La elaboración de un listado de los elementos y partes generales de cada sistema; basado en el análisis realizado por la evaluación de la máquina.
- ◇ Cotización y adquisición de componentes y material faltante; basados en un análisis de las características que debe tener el material, equipo y/o componentes, de acuerdo a las necesidades del sistema como dimensiones, características generales, costos adecuados, etc.
- ◇ Elaboración de diagramas y documentación necesarios; se consideraron todos los componentes del sistema, dimensiones, señales que se manejan, etc. El objetivo fue tener los diagramas con las conexiones mínimas para llevar a cabo pruebas de funcionamiento.
- ◇ Instalación, conexión y montaje de componentes de acuerdo a diagramas; Se tomaron en consideración dos aspectos importantes, por un lado las dimensiones del lugar y por el otro la distribución de los elementos antes del montaje. En el caso de los elementos de control, como los servo-amplificadores, tarjetas de opto-acoplamiento y controlador, se consideró el mantener alejados éstos elementos una distancia razonable de las zonas de potencia ya que estos elementos pueden ser afectados por el ruido presente en el sistema. De lo contrario, se recomienda un buen sistema de tierras.

A continuación se presenta a detalle, en las siguientes tres secciones, las acciones realizadas para cada sistema.

3.1.1. Sistema mecánico

Como se mencionó con anterioridad el estado de la máquina fresadora era tal, que se requería de la reconversión e instrumentación casi total en los sistemas seleccionado para la habilitación del movimiento de las bancadas. En ésta sección se describe a detalle el procedimiento seguido para la habilitación del sistema

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

mecánico.

Como se especifica de manera global en el levantamiento general para este sistema, realizar el acoplamiento mecánico de los actuadores y habilitar el movimiento de las bancadas en cada uno de los ejes de la máquina es el objetivo principal en este punto. Para lograr lo anterior se realizó el diseño y manufactura de las piezas mecánicas necesarias para el acoplamiento de los motores, así mismo, las piezas mecánicas para la activación de los sensores de límite. El diseño y la manufactura de todas las piezas maquinadas se basó en las características de los materiales y en las normas establecidas para el maquinado de piezas mecánicas según su aplicación. En la Tabla 3.2, se presentan las piezas mecánicas diseñadas y manufacturadas de mayor importancia para habilitar el movimiento de las bancadas para los tres ejes de la máquina.

Ya que se trata de una máquina prototipo, el diseño y manufactura de las piezas se realizó en base a las siguientes justificaciones: con el afán de conocer el proceso de manufactura de las mismas, algunas piezas tienen un diseño único y no se encuentran comercialmente disponibles, en el caso de los materiales se buscó la homogeneidad del sistema, además de las características y propiedades de éstos materiales. El método utilizado para el maquinado de las piezas fue por arranque de viruta (maquinado de torno y fresa), en algunos casos justificando esto debido a que se trata de piezas con diseño único.

Una vez que se tuvo todo el material, equipo y piezas mecánicas necesarias se realizó el montaje de los componentes en la máquina. La imagen de la Figura 3.4, muestra algunos pasos del montaje de los motores.

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

<i>Observaciones</i>	<i>Características</i>	<i>Pieza maquinada</i>
Diseñada y manufacturada para los tres ejes de la máquina	Aluminio ASTM 6061 para el diseño de piezas mecánicas como engranajes	
Diseñada y manufacturada para los tres ejes de la máquina	Acero 1045 al 0,45 % de carbono para construcción de maquinaria. Norma AISI/NOM	
Diseñada y manufacturada para los tres ejes de la máquina	Aluminio ASTM 6061 para el diseño de piezas mecánicas	
Diseñada para la base del eje Z	Aluminio ASTM 6061 para el diseño de piezas mecánicas	

Tabla 3.2: Piezas mecánicas necesarias para el funcionamiento del sistema mecánico.

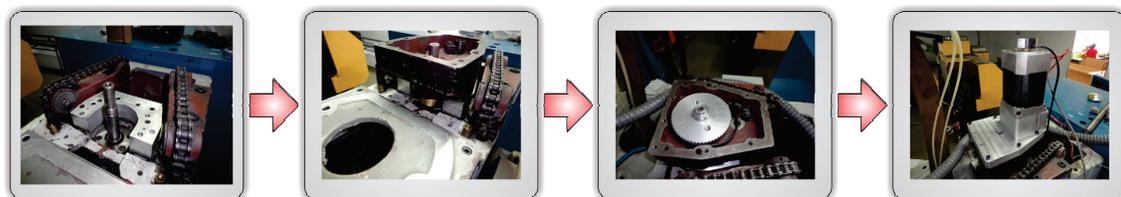


Figura 3.4: Montaje de equipo y piezas mecánicas en la máquina.

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

3.1.2. Sistema eléctrico de potencia

En esta sección se describe el procedimiento realizado para poner en funcionamiento el sistema eléctrico de potencia. De acuerdo con el análisis del levantamiento general para este sistema, se realizó la redefinición del sistema, y se elaboró un diagrama de conexiones como se muestra en la Figura 3.5.

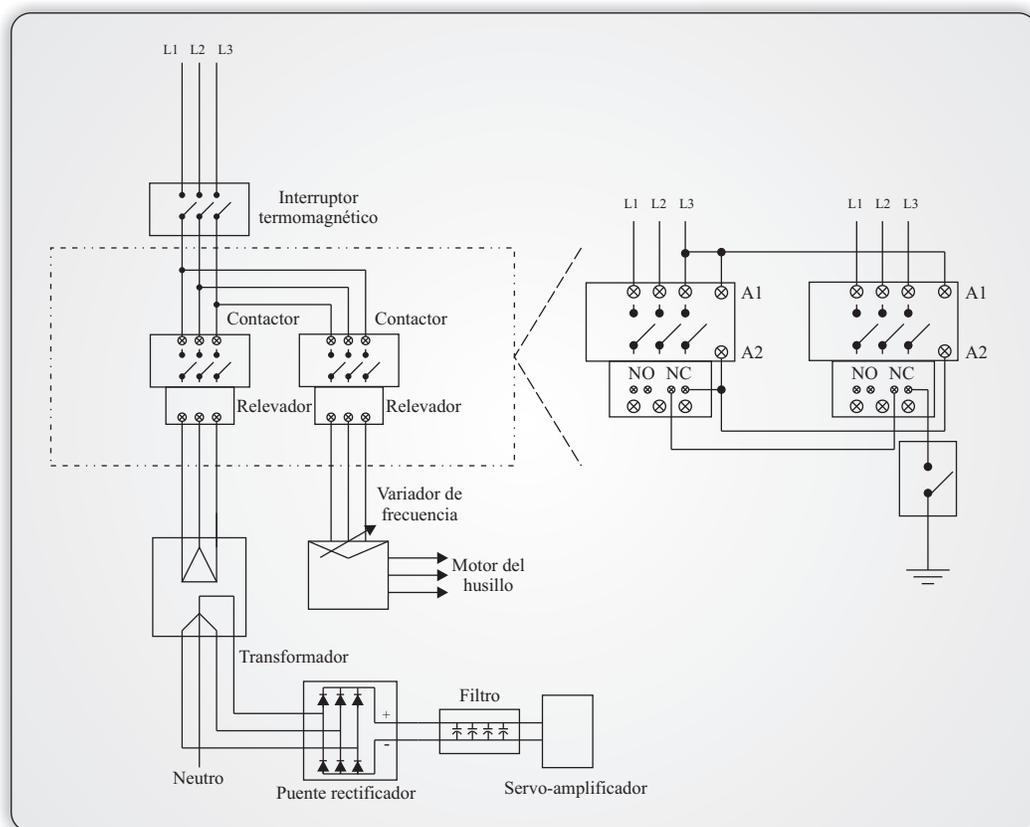


Figura 3.5: Diagrama de conexiones del sistema eléctrico de potencia.

Del diagrama se observa que la instalación se realizó de la siguiente manera. Las líneas y trifásicas llegan al sistema en el gabinete de la máquina. Se tiene un interruptor termo-magnético general para la alimentación del sistema. A partir de interruptor general las líneas se derivan en dos ramas. Por un lado, en la primera rama, de derecha a izquierda en el diagrama, se tiene la alimentación del

3.1. Etapa 1. Instrumentación de la máquina fresadora CNC

variador de frecuencia para el control del motor del husillo, y se tiene un elemento de protección que consiste en un contactor termo-magnético (dentro del cuadro con la línea punteada). Por otro lado, en la segunda rama se tiene la alimentación del transformador de voltaje. El transformador consiste en una configuración de sus devanados delta-estrella, siendo la configuración delta en el primario y estrella en el secundario. La salida del transformador se dirige a un puente rectificador de diodos y a su vez la salida del rectificador se dirige a un banco de capacitores para eliminar el rizo y mantener la señal de voltaje que servirá para la alimentación de los servo-amplificadores. En la segunda rama también se tiene un elemento de protección que consiste en otro contactor termo-magnético.

La configuración de los dispositivos de protección se realizó como sigue. Ambos contactores están alimentados en paralelo. La activación y desactivación de los contactores se realiza por medio de un dispositivo termo-magnético interno. Además cada contactor cuenta con un relevador que se activa o desactiva por corriente. La señal de corriente para la activación/desactivación del relevador puede ser programada a través de una perilla en el dispositivo. Se tienen otros contactores auxiliares, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado, y son activados por el relevador. Los contactos normalmente cerrados en ambos dispositivos de protección están conectados en serie. En caso de corto circuito, el relevador abre los contactores y el circuito queda abierto.

3.1.3. Sistema eléctrico de control

En la Figura 3.6, se presenta el diagrama de conexiones mínimo para el sistema eléctrico de control. En el diagrama se muestra las conexión de los elementos necesarios para el control de los actuadores, se especifica que el diagrama solo muestra las conexiones de un eje, en la máquina fresadora se requieren las

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

conexiones de los ejes X , Y y Z .

DIAGRAMA BÁSICO DE CONEXIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL

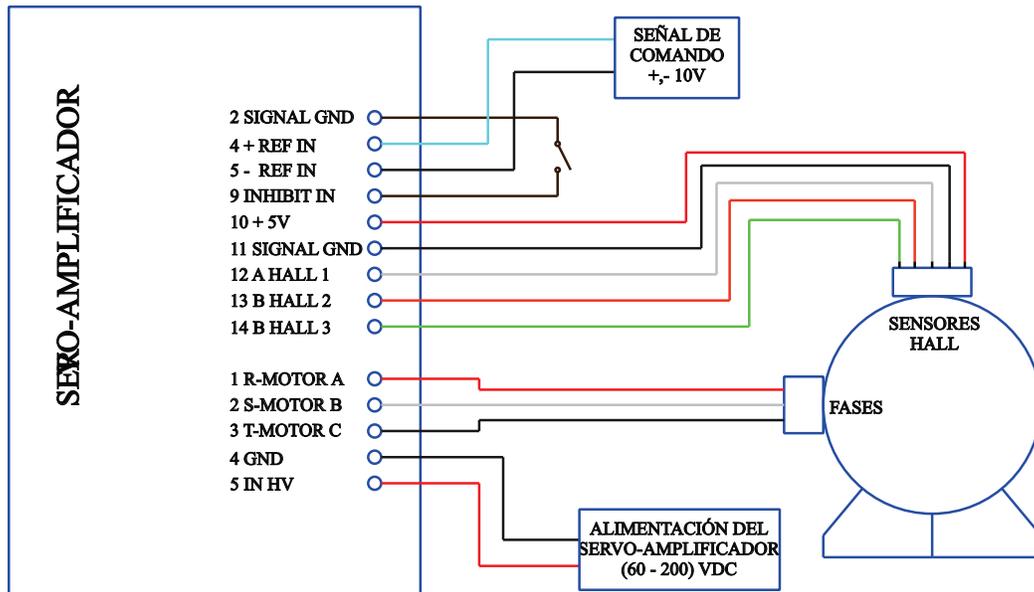


Figura 3.6: Diagrama de conexiones mínimo del sistema eléctrico de control.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

En esta sección se describe el procedimiento mediante el cual se implementó la metodología de generación de perfiles polinomiales en 3D para el control de posición de la máquina fresadora CNC. Como se explicó en el inicio del capítulo un sistema de control se puede ver como la integración de diversos módulos con funciones específicas. El diagrama de la Figura 3.7, muestra los principales módulos del sistema de control implementado en la máquina fresadora CNC.

De acuerdo con el diagrama, los módulos esenciales (en color morado en el diagrama) para realizar el control de posicionamiento en la máquina son: el generador de perfiles, el generador de trayectorias (módulo del interpolador) y la

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

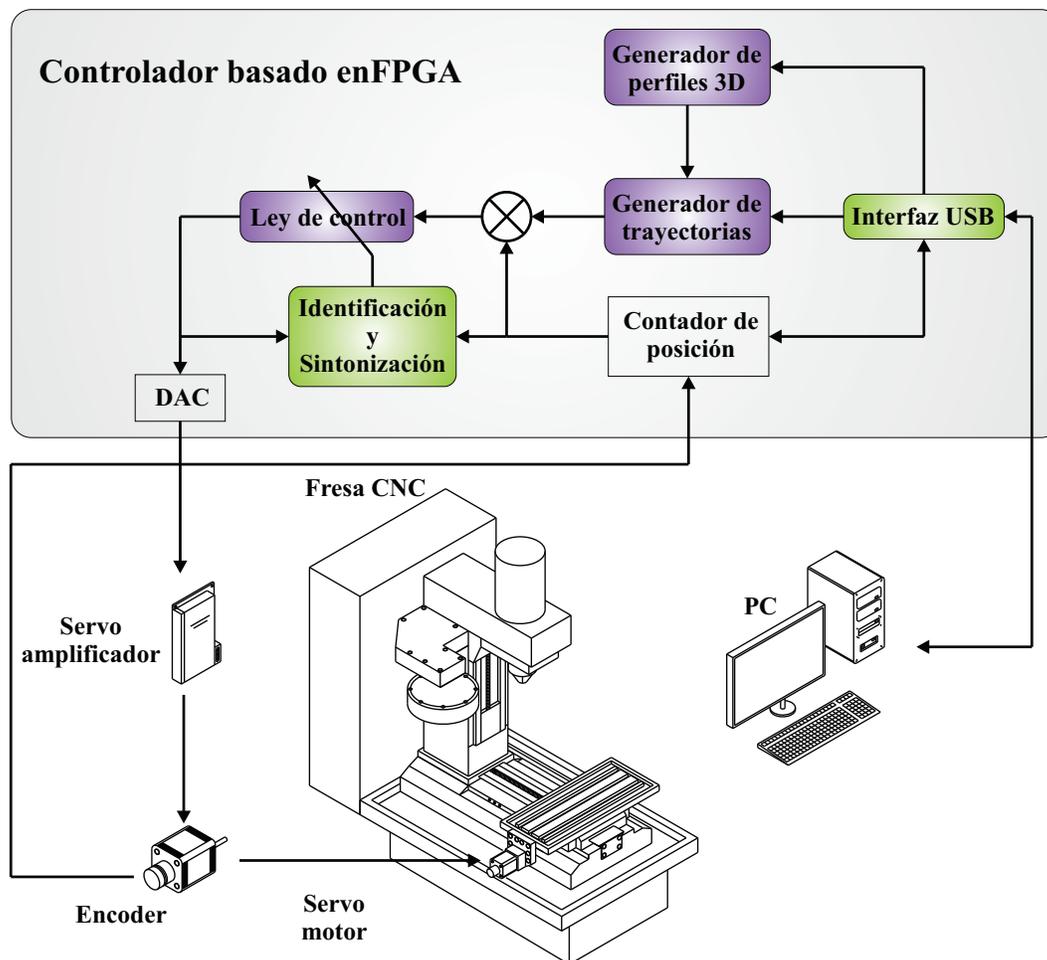


Figura 3.7: Diagrama del sistema de control de posicionamiento para máquinas CNC.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

ley o algoritmo de control. Estos módulos se definieron como tema principal de estudio del presente trabajo para la implementación de la metodología de generación de perfiles en tres dimensiones. Adicionalmente, se utilizaron un módulo para la identificación de los parámetros de la planta y otro módulo para la comunicación PC-controlador (en color verde en el diagrama), éste último basado en una interfaz USB (Universal Serial Bus; bus serial universal). Los últimos dos módulos auxiliares se implementaron basados en la descripción realizada por [Morales \(2010\)](#).

A continuación se describen en detalle los módulos del generador de perfiles, generador de trayectorias y ley de control. Para cada uno se presenta el algoritmo matemático, la descripción del mismo en hardware y su implementación en el sistema de control digital.

3.2.1. Generación de perfiles polinomiales

En el capítulo dos ya se han explicado las características de los perfiles de movimiento y se especifica que éstos perfiles definen el comportamiento dinámico de la máquina-herramienta, entre los parámetros que afectan directamente en la dinámica de la máquina se encuentran la velocidad, aceleración y jerk (razón de cambio de la aceleración). Los últimos dos parámetros tienen efectos severos en el desempeño de la máquina cuando no tienen una buena dinámica, ya que cambios bruscos de los periodos de aceleración y desaceleración, así como, grandes valores del jerk, se traducen en vibraciones en el sistema mecánico, saturación y desgaste de actuadores, alto consumo de corriente, errores de seguimiento, y por lo tanto, mal acabado en el maquinado de piezas y en casos drásticos daños al equipo.

Los perfiles de movimiento son importantes y la investigación en ésta área se justifica en la problemática descrita previamente. De acuerdo con la in-

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

vestigación en la literatura, se concluye que los perfiles basados en polinomios presentan las características en las que se consigue un buen desempeño dinámico en todos los parámetros (posición, velocidad, aceleración y jerk). Utilizando perfiles polinomiales es posible realizar su caracterización en forma tal que el perfil cumpla con ciertas restricciones dinámicas. Además, es posible definir la forma del perfil para los parámetros de velocidad, aceleración y jerk, es decir, es posible diseñarlo de manera que éstos tres parámetros presenten un movimiento suave, con velocidad controlada, cambios graduales en los periodos de aceleración y valores pico limitados en jerk. Adicionalmente, los perfiles polinomiales a trazos de grado mayor presentan un mejor comportamiento de los parámetros dinámicos. A continuación se presenta el algoritmo para la generación de un perfil polinomial de sexto grado.

Algoritmo matemático

Un perfil polinomial esta definido como una curva con respecto al tiempo que puede ser definida por una función polinomial a trozos. Normalmente estas función se define en tres trozos. En la Figura 3.8, se muestra el ejemplo del perfil polinomial de sexto grado en posición. La explicación anterior se justifica por el hecho que las regiones de aceleración y desaceleración están descritas por un polinomio de sexto grado. Además en la parte media del perfil se encuentra una región de velocidad constante.

La dinámica de la curva se encuentra en el recuadro de la Figura 3.8, se muestran las tres derivadas consecutivas del periodo de aceleración. Por simetría del perfil, se determina que la región de aceleración tiene propiedades similares a la región de desaceleración. Las condiciones necesarias para el perfil son un valor de cero al inicio y al final del jerk. Debido a lo anterior la curva del parámetro jerk se limita a un polinomio de tercer grado, y por conveniencia se eligió simétrico con dos valores para el jerk máximo y mínimo. En consecuencia, la curva en posición

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

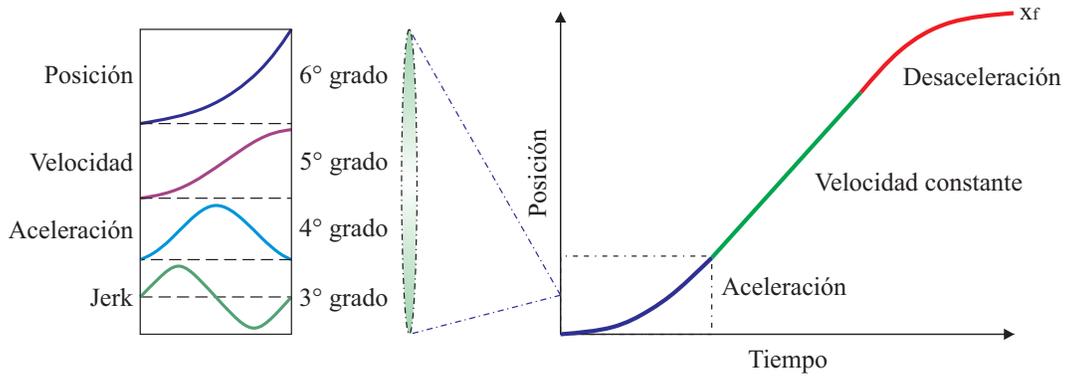


Figura 3.8: Estructura del perfil polinomial de sexto grado en posición.

esta definida en grado seis.

Una vez conocidos los parámetros de diseño del perfil se realiza la parametrización de las curvas que le darán forma. En la Figura 3.9, se presenta a mayor detalle los parámetros de diseño del perfil. El objetivo principal fue buscar la manera en que los parámetros sean fáciles de determinar por el usuario a partir del sistema físico al que se le vaya a aplicar el perfil, por tal motivo, se eligieron como parámetros de diseño: la posición final (X_f) del perfil completo; la velocidad del periodo constante (V_f) y la aceleración máxima (A_m). Adicionalmente, se consideran el jerk máximo (J_m) y el tiempo (t) como variables del sistema.

Para iniciar el diseño del perfil se partió de la ecuación del jerk (3.1), en este caso, una ecuación cúbica y se definieron cuatro puntos específicos en la gráfica: $t = 0$, $t = \frac{1}{4}\tau$, $t = \frac{3}{4}\tau$ y $t = \tau$. Donde τ representa el tiempo total del perfil.

$$y_j(t) = a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (3.1)$$

El objetivo de definir estos puntos fue para encontrar el valor de las constantes de la curva a_i con respecto al parámetro de diseño J_m , por lo que se planteó un sistema de cuatro ecuaciones, (3.2) a (3.5).

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

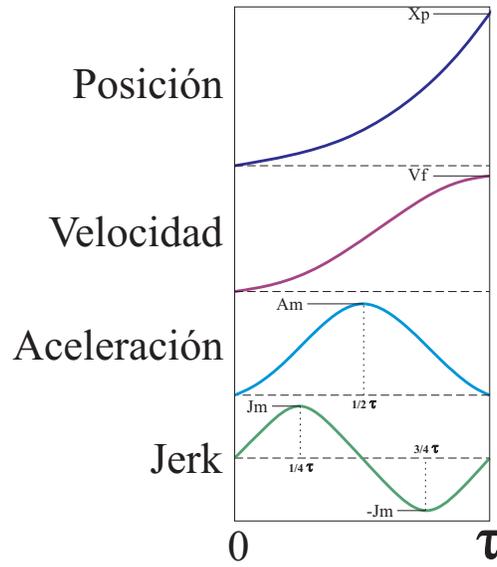


Figura 3.9: Parámetros de diseño del perfil polinomial.

$$y_j(0) = a_0 = 0 \quad (3.2)$$

$$y_j\left(\frac{1}{4}\tau\right) = \frac{1}{64}a_3\tau^3 + \frac{1}{16}a_2\tau^2 + \frac{1}{4}a_1\tau + a_0 = J_m \quad (3.3)$$

$$y_j\left(\frac{3}{4}\tau\right) = \frac{27}{64}a_3\tau^3 + \frac{9}{16}a_2\tau^2 + \frac{3}{4}a_1\tau + a_0 = -J_m \quad (3.4)$$

$$y_j(\tau) = a_3\tau^3 + a_2\tau^2 + a_1\tau + a_0 = 0 \quad (3.5)$$

El sistema de ecuaciones se puede reescribir en forma matricial como (3.6) y resuelto aplicando la regla de Cramer. Las soluciones de la matriz son los valores de las constantes de la curva y se muestran respectivamente de a_3 hasta a_0 de la ecuación (3.7) a (3.10).

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$\begin{bmatrix} 0 \\ J_m \\ -J_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{64}\tau^3 & \frac{1}{16}\tau^2 & \frac{1}{4}\tau & 1 \\ \frac{27}{64}\tau^3 & \frac{9}{16}\tau^2 & \frac{3}{4}\tau & 1 \\ \tau^3 & \tau^2 & \tau & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$a_3 = \frac{64J_m}{3\tau^3} \quad (3.7)$$

$$a_2 = -\frac{32J_m}{\tau^2} \quad (3.8)$$

$$a_1 = \frac{32J_m}{3\tau} \quad (3.9)$$

$$a_0 = 0 \quad (3.10)$$

De esta forma, sustituyendo los valores de las constantes en (3.1), se obtuvo la expresión (3.11), donde los parámetros J_m y t determinan el polinomio. Sin embargo, la expresión aun no esta en términos de los parámetros deseados para el diseño del perfil.

$$y_j(t) = \frac{64J_m}{3\tau^3}t^3 - \frac{32J_m}{\tau^2}t^2 + \frac{32J_m}{3\tau}t \quad (3.11)$$

Con el fin de obtener las ecuaciones del perfil con los parámetros deseados, se realizó la integración de $y_j(t)$ y se obtuvo el polinomio para $y_a(t)$, de la Figura 3.9 se observa que el valor de interés para (t) es en $t = \frac{1}{2}\tau$, donde la aceleración es máxima. Además se consideró que el punto inicial de la curva es en cero, por lo tanto el valor de la constante de integración también es cero.

$$y_a(t) = \int \left(\frac{64J_m}{3\tau^3}t^3 - \frac{32J_m}{\tau^2}t^2 + \frac{32J_m}{3\tau}t \right) dt \quad (3.12)$$

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$y_a(t) = \frac{16J_m}{3\tau^3}t^4 - \frac{32J_m}{3\tau^2}t^3 + \frac{16J_m}{3\tau}t^2 \quad (3.13)$$

$$y_a\left(\frac{1}{2}\tau\right) = \frac{J_m}{3}\tau = A_m \quad (3.14)$$

De la ecuación (3.14) se despeja el valor de (J_m), para obtener la relación (3.15) entre jerk máximo (J_m) y aceleración máxima (A_m). El valor del jerk máximo se sustituyó en la ecuación (3.13) para obtener la expresión de la ecuación (3.16).

$$J_m = \frac{3A_m}{\tau} \quad (3.15)$$

$$y_a(t) = \frac{16A_m}{\tau^4}t^4 - \frac{32A_m}{\tau^3}t^3 + \frac{16A_m}{\tau^2}t^2 \quad (3.16)$$

El mismo procedimiento se siguió realizando la integral de $y_a(t)$ para obtener $y_v(t)$ y el valor de (t) de interés es en $t = \tau$ que es donde se tiene el valor final de la velocidad V_f .

$$y_v(t) = \int \left(\frac{16A_m}{\tau^4}t^4 - \frac{32A_m}{\tau^3}t^3 + \frac{16A_m}{\tau^2}t^2 \right) dt \quad (3.17)$$

$$y_v(t) = \frac{16A_m}{5\tau^4}t^5 - \frac{8A_m}{\tau^3}t^4 + \frac{16A_m}{3\tau^2}t^3 \quad (3.18)$$

$$y_v(\tau) = \frac{8A_m\tau}{15} = \quad (3.19)$$

De la expresión (3.19) se obtiene la relación entre la velocidad final (V_f), la aceleración máxima (A_m) y el tiempo de duración del perfil (τ), de aquí se despejó el valor de τ para obtener .

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$\tau = \frac{15V_f}{8A_m} \quad (3.20)$$

El valor de $y_x(t)$ se obtiene al repetir el procedimiento y evaluando para $t = \tau$ para obtener el desplazamiento máximo del periodo de aceleración.

$$y_x(t) = \int \left(\frac{16A_m}{5\tau^4} t^5 - \frac{8A_m}{\tau^3} t^4 + \frac{16A_m}{3\tau^2} t^3 \right) dt \quad (3.21)$$

$$y_x(t) = \frac{8A_m}{15\tau^4} t^6 - \frac{8A_m}{5\tau^3} t^5 + \frac{4A_m}{3\tau^2} t^4 \quad (3.22)$$

$$y_x(\tau) = \frac{4A_m\tau^2}{15} = X_p \quad (3.23)$$

Se substituyó el valor de τ obtenido en (3.20) en la expresión (3.23) para obtener la expresión (3.24), que representa el desplazamiento al terminar el periodo de aceleración.

$$X_p = \frac{15V_f^2}{16A_m} \quad (3.24)$$

Hasta este punto se definió el diseño del perfil para la sección de aceleración basados en los parámetros V_f y A_m , donde el valor del tiempo τ se calcula mediante estos parámetros y el valor de J_m se conoce por (3.15) y a pesar de que no puede ser forzado a un valor específico queda limitado. En la región de desaceleración aplican las mismas ecuaciones con la diferencia que el parámetro A_m tendrá signo negativo y la constante de integración para $y_v(t)$ será V_f . Tomando en cuenta estas consideraciones se obtuvieron las ecuaciones para la región de desaceleración. A partir de aquí, y para simplificar la nomenclatura en la región de desaceleración el parámetro A_m será conocido como D_m .

La consideración en este punto fue que el desplazamiento debido al perfil

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

de aceleración es X_{pa} , por lo tanto, el desplazamiento debido a la región de desaceleración es X_{pd} , entonces fue posible calcular el tiempo de la región constante X_c conociendo el desplazamiento total del perfil X_f mediante.

$$X_c = X_f - X_{pa} - X_{pd} \quad (3.25)$$

De esta forma es posible calcular el tiempo (τ_c) que tomará la sección constante del perfil (3.26), considerando como tiempo de aceleración τ_a y como tiempo de desaceleración τ_d .

$$\tau_c = \frac{X_c}{V_f} = \frac{X_f}{V_f} - \frac{15V_f}{16A_m} - \frac{15V_f}{16D_m} = \frac{X_f}{V_f} - \frac{\tau_a}{2} - \frac{\tau_d}{2} \quad (3.26)$$

Finalmente se puede expresar el perfil de velocidad como una función definida a trozos como en (3.27), donde la expresión para el perfil de posición se obtiene integrando por partes la función para $y_v(t)$.

$$y_v(t) = \begin{cases} \frac{16A_m}{5\tau_a^4} t^5 - \frac{8A_m}{\tau_a^3} t^4 + \frac{16A_m}{3\tau_a^2} V_f & 0 \leq t \leq \tau_a \\ V_f + \frac{16D_m}{5\tau_d^4} (t - \tau_a - \tau_c)^5 & \tau_a < t \leq \tau_a + \tau_c \\ -\frac{8D_m}{\tau_d^3} (t - \tau_a - \tau_c)^4 & \tau_a + \tau_c < t \leq \tau_a + \tau_c + \tau_d \\ +\frac{16D_m}{3\tau_d^2} (t - \tau_a - \tau_c)^3 & \end{cases} \quad (3.27)$$

Donde,

$$\tau_a = \frac{15V_f}{8A_m}$$

$$\tau_d = -\frac{15V_f}{8D_m}$$

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$\tau_c = \frac{X_f}{V_f} - \frac{\tau_a}{2} - \frac{\tau_d}{2}$$

El perfil obtenido se encuentra en términos de los parámetros de diseño definidos originalmente como X_f , V_f , A_m y D_m . Todos los tiempos se calculan a partir de estos parámetros. Existe un caso especial para el cual la función no se cumple, se trata del caso cuando τ_c resulta negativo a causa de que el desplazamiento en los periodos de aceleración y desaceleración es mayor que el desplazamiento total del perfil, el efecto inmediato es la imposibilidad de alcanzar la velocidad establecida por el usuario. Por lo tanto, se debe recalculer la velocidad final a la que llegará el perfil, considerando (3.25) en el caso donde $X_c = 0$, se obtiene (3.28).

$$X_f = X_{pa} + X_{pd} = \frac{15V_f^2}{16A_m} - \frac{15V_f^2}{16D_m} = \frac{15V_f^2}{16} \left(\frac{D_m - A_m}{A_m D_m} \right) \quad (3.28)$$

Despejando V_f de (3.28) obtenemos la expresión (3.29).

$$V_f = \sqrt{\frac{16X_f}{15} \left(\frac{D_m - A_m}{A_m D_m} \right)} \quad (3.29)$$

Finalmente se vuelve a calcular el perfil de velocidad, cuando la velocidad final establecida por el usuario no se puede alcanzar. Cabe mencionar que es posible diseñar perfiles asimétricos, es decir cuando $A_m \neq D_m$, en consecuencia directa, es posible usar diferentes aceleraciones en arranque y paro de la máquina.

Implementación del algoritmo

El objetivo del desarrollo del algoritmo descrito previamente es la generación del perfil eficiente para su implementación en un sistema digital, y que pueda ser fácilmente calculado para su aplicación en curvas paramétricas de tipo Bezier, BSplines y NURBS. Por lo tanto, se consideró que el perfil siempre esta

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

normalizado ($X_f = 1$). Lo único que varía son las aceleraciones (A_m y D_m) y la velocidad final (V_f) que son establecidas por el usuario. Lo anterior implicó que al escalar la curva, esta se generaría siempre en el mismo tiempo, lo que modificaría los parámetros de diseño del perfil. para evitar éste efecto, se consideró la longitud del arco de la curva (L) por lo que se especifica $X_f = L$. El perfil $y_v(t)$ se reescribió como, donde se ha normalizado para cubrir con los requerimientos de las curvas paramétricas.

$$y_v(t) = \begin{cases} Ka'_3 t^3 (Ka_2 t^2 + Ka_1 t + 5) & 0 \leq t \leq \tau_a \\ Kv' & \tau_a < t \leq \tau_{ac} \\ Kv + Kd'_3 (t - \tau_{ac})^3 (Kd_2 (t - \tau_{ac})^2 + Kd_1 (t - \tau_{ac}) + 5) & \tau_{ac} < t \leq \tau_{acd} \end{cases} \quad (3.30)$$

Donde,

$$\tau_a = \frac{15V_f}{8A_m}$$

$$\tau_d = -\frac{15V_f}{8D_m}$$

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

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

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

$$ka'_3 = \frac{16A_m}{15\tau_a^2 L} = \frac{1024A_m^3}{3375LV_f^2}$$

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$Ka_2 = \frac{3}{\tau_a^2} = \frac{64A_m^2}{75V_f^2}$$

$$Ka_1 = -\frac{15}{2\tau_a} = -\frac{4A_m}{V_f}$$

$$Kv' = \frac{V_f}{L}$$

$$Kd'_3 = \frac{16D_m}{15\tau_d^2 L} = \frac{1024D_m^3}{3375LV_f^2}$$

$$Kd_2 = \frac{3}{\tau_d^2} = \frac{64D_m^2}{75V_f^2}$$

$$Kd_1 = \frac{15}{2\tau_d} = \frac{4D_m}{V_f}$$

Cuando se evalúa la longitud del arco de la curva no es necesario que sea con una alta exactitud ya que el perfil esta normalizado, de tal manera que si existe error en el cálculo de L el perfil alcanzará finalmente la unidad. Sin embargo, habrá ligeras variaciones en los valores máximos de la dinámica derivados de este error en la evaluación de L , pero en la mayoría de los casos es muy pequeña.

El perfil de posición se obtiene realizando la integral de (3.30), aunque en este punto realizar la integración resultará en una expresión muy poco amigable. En lugar de esto, se realizó la discretización de la función ya que se implementó en un sistema digital. el usuario determina el periodo de muestreo T_s donde $t = kT_s$. Una vez que se obtiene $y_v(kT_s)$ la integral de la función se reduce a realizar la sumatoria del perfil de velocidad (3.31) por el periodo de muestreo.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$y_x(t) = \sum_{j=0}^k y_v(jT_s) xT_s \quad (3.31)$$

Debido a que T_s no depende de k , esta puede ser incluida en las ganancias de la función $y_v(t)$ dando como resultado (3.32), que es la función normalizada y escalada para realizar la suma acumulada para obtener $y_x(kT_s)$.

$$y_v(t) = \begin{cases} Ka_3 t^3 (Ka_2 t^2 + Ka_1 t + 5) & 0 \leq t \leq \tau_a \\ Kv & \tau_a < t \leq \tau_{ac} \\ Kv + Kd_3 (t - \tau_{ac})^3 (Kd_2 (t - \tau_{ac})^2 + Kd_1 (t - \tau_{ac}) + 5) & \tau_{ac} < t \leq \tau_{acd} \end{cases} \quad (3.32)$$

Donde,

$$Ka_3 = \frac{1024T_s A_m^3}{3375LV_f^2}$$

$$Ka_2 = \frac{64A_m^2}{75V_f^2}$$

$$Ka_1 = -\frac{4A_m}{V_f}$$

$$Kv = \frac{T_s V_f}{L}$$

$$Kd_3 = \frac{1024T_s D_m^3}{3375LV_f^2}$$

$$Kd_2 = \frac{64D_m^2}{75V_f^2}$$

$$Kd_1 = \frac{4D_m}{V_f}$$

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

La Figura 3.10 muestra la estructura a bloques del módulo del generador de perfiles. En la estructura se implementó el algoritmo para la reconstrucción del perfil polinomial a trozos en posición de sexto orden para las regiones de aceleración y desaceleración, más la región de velocidad constante. Sin embargo, la expresión definida por (3.32) consiste en el perfil de velocidad a trozos de quinto orden para las regiones de aceleración y desaceleración más la región de velocidad constante V_f . Aunque es posible definir el perfil polinomial a trozos en posición, la expresión resultante obtenida de la integración de (3.27) sería poco amigable. Como consecuencia la estructura digital se basa en la reconstrucción del perfil en velocidad y mediante integración digital se obtiene el perfil de posición.

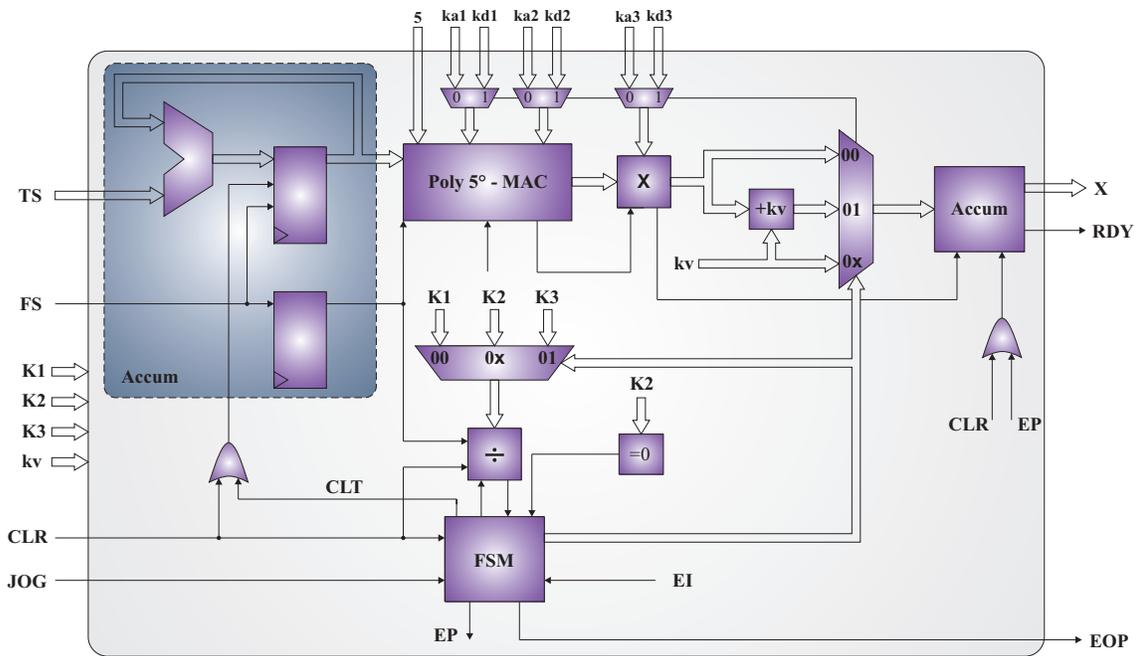


Figura 3.10: Diagrama del módulo para la generación de perfiles polinomiales.

Del diagrama 3.10 se observa que en la parte superior izquierda, dentro del cuadro azul con líneas punteadas se tiene la generación del vector de tiempo, que es la suma acumulativa del periodo de muestreo. El cálculo de los términos del perfil de velocidad a trozos de realizan dentro del bloque “Poly5° MAC” junto

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

con el multiplicador a la salida de este bloque, por lo tanto, estos bloques solo requieren del valor de las constantes definidas para la expresión (3.32) y de los valores del vector de tiempo. El multiplexor ubicado antes del acumulador a la salida del módulo se encarga de seleccionar la región del polinomio (aceleración, velocidad constante, desaceleración), y entonces, el acumulador realiza la integración digital de la región seleccionada para la obtención del perfil de posición en dicha región. Las constantes K seleccionadas por un multiplexor determinan la duración de cada trazo del perfil. En el Listado 3.1 se presenta la entidad principal (caja negra) del módulo del generador de perfiles.

Listado 3.1: Entidad principal del módulo de generación de perfiles

```
entity prfProfile is
    generic(et : integer := 32;
           ft : integer := 32;
           ec : integer := 32;
           fc : integer := 32;
           n  : integer := 32);
    port(
        RST : in STD_LOGIC;
        CLK : in STD_LOGIC;
        FS  : in STD_LOGIC;
        CLR : in STD_LOGIC;
        JOG : in STD_LOGIC;
        RDY : out STD_LOGIC;
        EOP : out STD_LOGIC;
        TS  : in STD_LOGIC_VECTOR(ft-1 downto 0);
        Ka1,Ka2,Ka3,Kd1,Kd2,Kd3 : in STD_LOGIC_VECTOR(ec+fc-1 downto 0);
        Kv  : in STD_LOGIC_VECTOR(2*fc-1 downto 0);
        K1,K2,K3 : in STD_LOGIC_VECTOR(n-1 downto 0);
        X   : out STD_LOGIC_VECTOR(ft-1 downto 0)
    );
end prfProfile;
```

3.2.2. Generación de trayectorias (interpolador NURBS)

La generación de trayectorias es otro tema de investigación importante en el desarrollo de los sistemas de control para posicionamiento en máquinas-herramienta CNC. La función del interpolador es generar los puntos de la trayectoria a seguir por la herramienta de la máquina para un diseño dado en dos o tres dimensiones.

En la generación de trayectorias se han desarrollado gran cantidad de trabajos de investigación, la mayoría de ellos se basan en distintas técnicas de interpolación para la obtención de los puntos del seguimiento para un diseño (trayectoria) definidos. En los controladores comerciales, los interpoladores normalmente tiene la capacidad de realizar interpolación en líneas y círculos. Sin embargo, éstas técnicas de interpolación no presentan buenos resultados al ser implementadas en un proceso real. Por otro lado, se han presentado otro tipo de técnicas de interpolación, que presentan mejores resultados en aplicaciones reales sobre máquinas CNC, basadas en curvas paramétricas como las curvas de Bézier, las curvas B-splines y curvas NURBS (Non Uniform Rational B-Splines; curvas B-Splines racionales no uniformes). En el presente trabajo se definió como objeto de estudio la técnica de interpolación basada en las curvas NURBS. La justificación para el estudio sobre éste tipo de curvas es debido a que se trata del caso más general entre las tres curvas, es decir, que tanto B-Splines como curvas de Bézier son casos particulares de las curvas NURBS. Y por lo tanto, las curvas NURBS presentan mejores características y ofrecen mejores resultados en las aplicaciones de control de posicionamiento para máquinas CNC.

Así como las B-splines y las curvas de Bézier, las curvas NURBS tienen una cantidad definida de puntos de control para la generación de la trayectoria, además de contar con un vector de nodos como en el caso de las curvas B-Splines.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

Y como aporte adicional, las curvas NURBS introduce un valor de pesos para cada punto de control, con el fin de realizar ajustes finos en la forma de la trayectoria.

La forma general en como se expresan las curvas NURBS (3.33) es:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^p(u) w_i}{\sum_{i=1}^n N_i^n(u) w_i} P_i \quad (3.33)$$

Donde P_i son los puntos de control de la curva, w_i son los pesos asociados para cada punto y $N_i^n(u) w_i$ son las funciones base de las BSplines. Una de las características y aportaciones principales del presente trabajo hablando de investigación local dentro Universidad Autónoma de Querétaro es extensión de la investigación de los sistemas CNC en aplicaciones de máquina de dos ejes, al posicionamiento en máquinas de tres ejes.

Un algoritmo matemático recursivo para la evaluación de éstas curvas era indispensable, sobre todo hablando de la eficiencia computacional requerida y de los recursos utilizados para el cálculo, ya que se habla de expresiones polinomiales que requieren un considerable esfuerzo hablando en términos computacionales. Para el control de posicionamiento en el espacio tridimensional se utilizó el algoritmo Cox de Boor debido a su simplicidad para la evaluación de las curvas paramétricas. El algoritmo recursivo se presenta en las ecuaciones (3.35) y , [Morales \(2007\)](#):

$$Q_i^j = (1 - \tau) Q_{i+1}^j + \tau Q_{i+1}^{j+1} \quad (3.34)$$

$$\tau = \frac{t - tk_{k+j-i}}{tk_{k+j} - tk_{k+j-i}} \quad (3.35)$$

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

De la ecuación (3.35) Q representa una matriz triangular de puntos, donde el subíndice representa las columnas y el superíndice representa los renglones. Los puntos iniciales P se colocan en Q_n^j , donde n es el número de puntos para la evaluación. La imagen de la Figura 3.11, nos representa esta matriz y la forma en que se van evaluando los puntos de la curva. El parámetro τ de la expresión (2.6), depende de una lista de nodos (*knots*) dados por un vector tk .

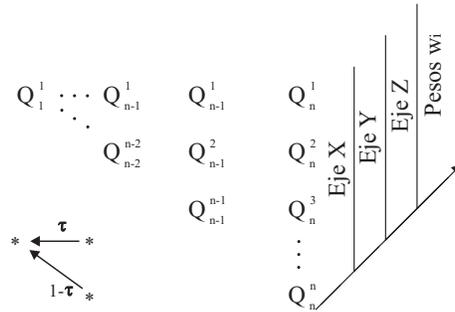


Figura 3.11: Matriz triangular para la evaluación de las NURBS, para el espacio tridimensional.

De la Figura 3.11 se observa que en la matriz triangular se evalúan los puntos de la curva para los ejes X , Y y Z , además se evalúan los pesos w_i que se asocian con cada punto de la curva obtenido. Al final del procedimiento cada punto (interpolado) de la curva se divide entre el peso asociado. El diagrama de la Figura 3.12 muestra la estructura a bloques del módulo de evaluación de las curvas NURBS.

En el diagrama se observa que el algoritmo Cox de Boor es implementado, se tiene que los puntos x , y , z y adicionalmente w tienen y comparten el bloque de cálculo (MAC_P) para la evaluación de los puntos en la curva. Además la evaluación de los pesos correspondientes a esos puntos tiene su propio bloque de cálculo, (MAC_W), debido a los formatos numéricos utilizados por los pesos. En el Listado 3.2 se presenta la entidad principal del bloque para la generación de trayectorias basado en el interpolador de curvas paramétricas NURBS.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

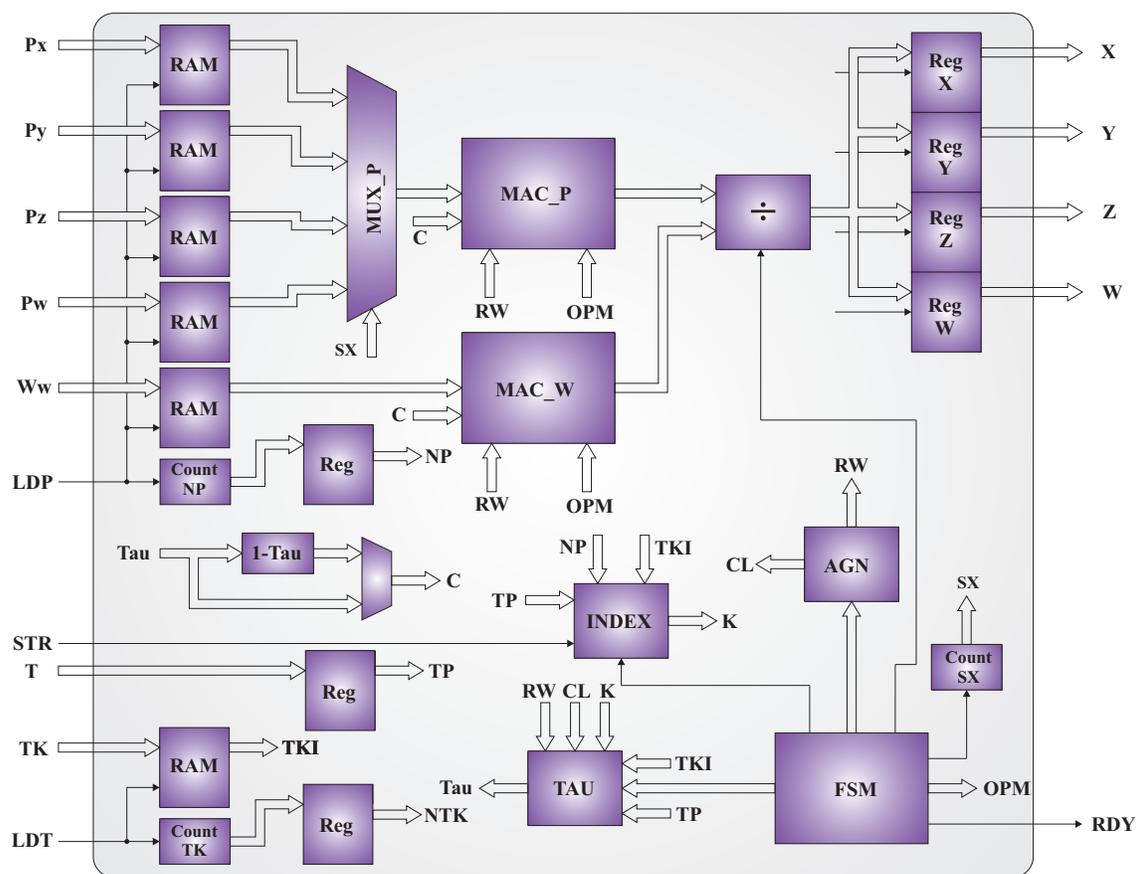


Figura 3.12: Diagrama del módulo para la generación de trayectorias.

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

Listado 3.2: Entidad principal del módulo de generación de trayectorias

```
entity nbsNurbs is
  generic(ex : integer := 16;
          fx : integer := 0;
          ew : integer := 5;
          fw : integer := 11;
          et : integer := 2;
          ft : integer := 14);
  port(
    RST : in STD_LOGIC;
    CLK : in STD_LOGIC;
    CLR : in STD_LOGIC;
    STR : in STD_LOGIC;
    RDY : out STD_LOGIC;
    LDP : in STD_LOGIC;
    PX : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    PY : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    PZ : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    PW : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    WW : in STD_LOGIC_VECTOR(ew+fw-1 downto 0);
    LDT : in STD_LOGIC;
    TK : in STD_LOGIC_VECTOR(et+ft-1 downto 0);
    T : in STD_LOGIC_VECTOR(et+ft-1 downto 0);
    X : out STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    Y : out STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    Z : out STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    W : out STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0)
  );
end nbsNurbs;
```

3.2.3. Algoritmo o ley de control

Los filtros digitales son un caso particular entre los controladores digitales, la diferencia entre los filtros es la selección de las constantes que definen su comportamiento, este proceso de selección de constantes se conoce como sintonización de la ley de control. La ley de control seleccionada para el control de posicionamiento en la máquina fresadora CNC es el controlador de tres tiempos PID. La ecuación general que gobierna el comportamiento de éste tipo de filtros se presenta en (3.36).

3.2. Etapa 2. Desarrollo del controlador

$$y(k) = a_0x(k-1) + a_2x(k-2) + b_1y(k-1) + b_2y(k-2) \quad (3.36)$$

En la Figura se presentan el diagrama general a bloques del módulo de la ley de control, del diagrama se observa que el módulo solo requiere del valor de las señales de salida actuales y anteriores, así como la señal del error para que el filtro realice las correcciones en la señal de control. En el Listado 3.3, se presenta la entidad principal del módulo de la ley de control.

Listado 3.3: Entidad principal del módulo de generación de trayectorias

```
entity pidPID_4D is
  generic(ex : integer := 5;
          fx : integer := 13;
          ey : integer := 5;
          fy : integer := 13;
          ec : integer := 5;
          fc : integer := 13);
  port(
    RST : in STD_LOGIC;
    CLK : in STD_LOGIC;
    STR : in STD_LOGIC;
    RDY : out STD_LOGIC;
    CLR : in STD_LOGIC;
    XK_1 : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    YK_1 : out STD_LOGIC_VECTOR(ey+fy-1 downto 0);
    a0_1,a1_1,a2_1 : in STD_LOGIC_VECTOR(ec+fc-1 downto 0);
    XK_2 : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    YK_2 : out STD_LOGIC_VECTOR(ey+fy-1 downto 0);
    a0_2,a1_2,a2_2 : in STD_LOGIC_VECTOR(ec+fc-1 downto 0);
    XK_3 : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    YK_3 : out STD_LOGIC_VECTOR(ey+fy-1 downto 0);
    a0_3,a1_3,a2_3 : in STD_LOGIC_VECTOR(ec+fc-1 downto 0);
    XK_4 : in STD_LOGIC_VECTOR(ex+fx-1 downto 0);
    YK_4 : out STD_LOGIC_VECTOR(ey+fy-1 downto 0);
    a0_4,a1_4,a2_4 : in STD_LOGIC_VECTOR(ec+fc-1 downto 0)
  );
end pidPID_4D;
```

3.3. Etapa 3. Validación y verificación del sistema

Para la verificación del sistema se utilizaron dos módulos adicionales, un módulo para la identificación de los parámetros de la planta y sintonización de la ley de control y otro módulo con la interfaz de comunicación PC-Controlador. En las Figura 3.13 a 3.15 se presentan las imágenes de los sistemas mecánico, eléctrico de potencia y eléctrico de control instrumentados. La verificación del sistema se realizó en base a pruebas de movimiento de los ejes de la máquina fresadora, tanto en movimiento independiente como en pruebas de movimiento coordinado de los tres ejes. Se definieron algunos casos de estudio para las pruebas realizadas.



Figura 3.13: Sistema mecánico instrumentado.

Como se mencionó anteriormente se realizan pruebas para el movimiento de los eje de la máquina tanto movimiento independiente como coordinado. Las

3.3. Etapa 3. Validación y verificación del sistema



Figura 3.14: Sistema eléctrico de potencia instrumentado.

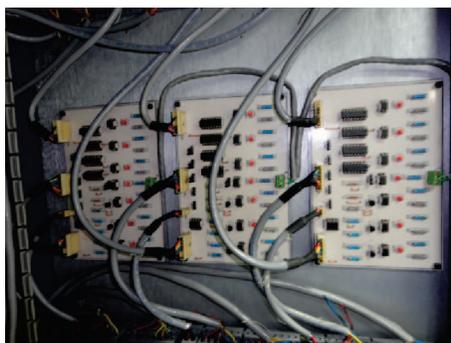


Figura 3.15: Sistema eléctrico de control instrumentado.

3.3. Etapa 3. Validación y verificación del sistema

imágenes de las Figuras 3.16 a 3.18 presentan las referencias para cada eje respectivamente para las pruebas de movimiento. En el caso del movimiento coordinado, se implementaron las referencias en los tres ejes al mismo tiempo.

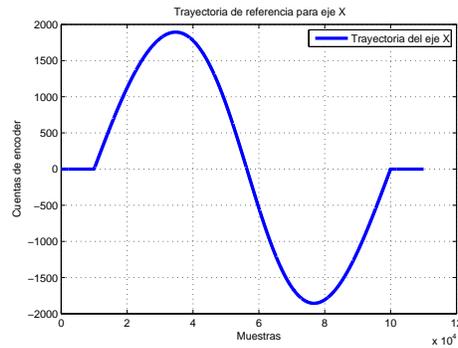


Figura 3.16: Referencia para prueba de movimiento en eje X.

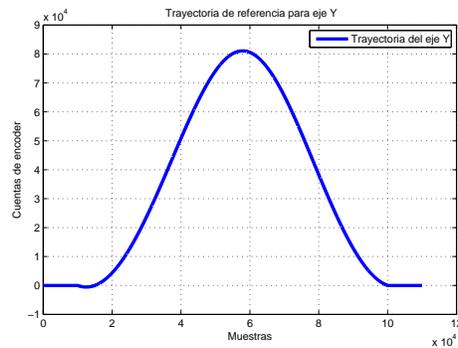


Figura 3.17: Referencia para prueba de movimiento en eje Y.

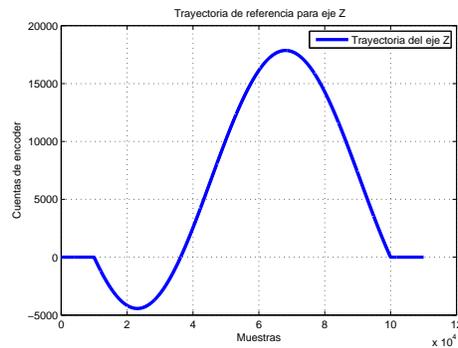


Figura 3.18: Referencia para prueba de movimiento en eje Z.

Los resultados obtenidos de las pruebas de movimiento se muestran en

3.3. Etapa 3. Validación y verificación del sistema

el siguiente capítulo.

Capítulo IV

Resultados

Los resultados de las pruebas realizadas en la máquina fresadora CNC de tres ejes se presentan a continuación. El seguimiento del sistema para el movimiento de los ejes de forma independiente.

La Figura 4.1 muestra el seguimiento obtenido para la referencia del controlador en el eje X , se observa un ligero error, que se puede justificar con una mala sintonización del controlador.

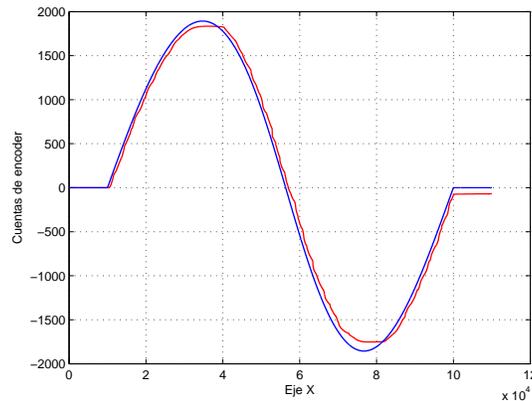


Figura 4.1: Seguimiento para la referencia en el eje X , movimiento independiente.

La Figura 4.2 muestra el seguimiento obtenido para la referencia del controlador en el eje Y , para este caso se observan ligeras oscilaciones al rededor de la referencia, que se puede justificar con una mala sintonización del controlador.

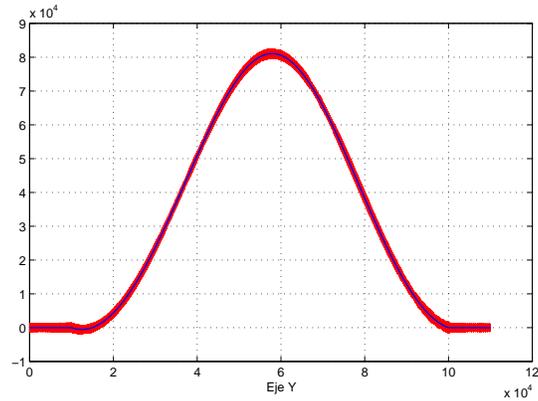


Figura 4.2: Seguimiento para la referencia en el eje Y , movimiento independiente.

La Figura 4.3 muestra el seguimiento obtenido para la referencia del controlador en el eje Z , De los tres casos en la prueba para este eje los resultados obtenidos muestran el mejor desempeño, que se puede justificar con una mala sintonización del controlador.

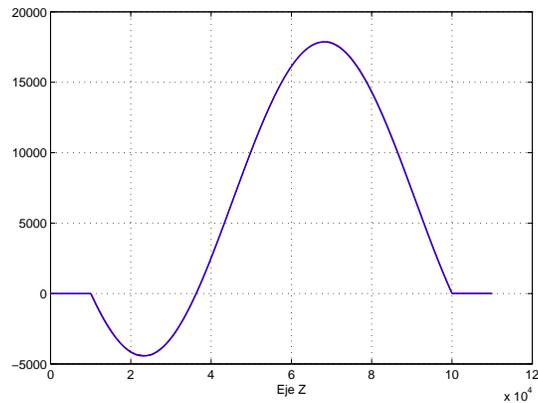


Figura 4.3: Seguimiento para la referencia en el eje Z , movimiento independiente.

En las pruebas de movimiento para cada eje independiente el sistema presenta buenos resultados, los ligeros errores presentes en el seguimiento se justifican debido a la sintonización del controlador.

Para el caso de las pruebas de movimiento coordinado se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Figura 4.4.

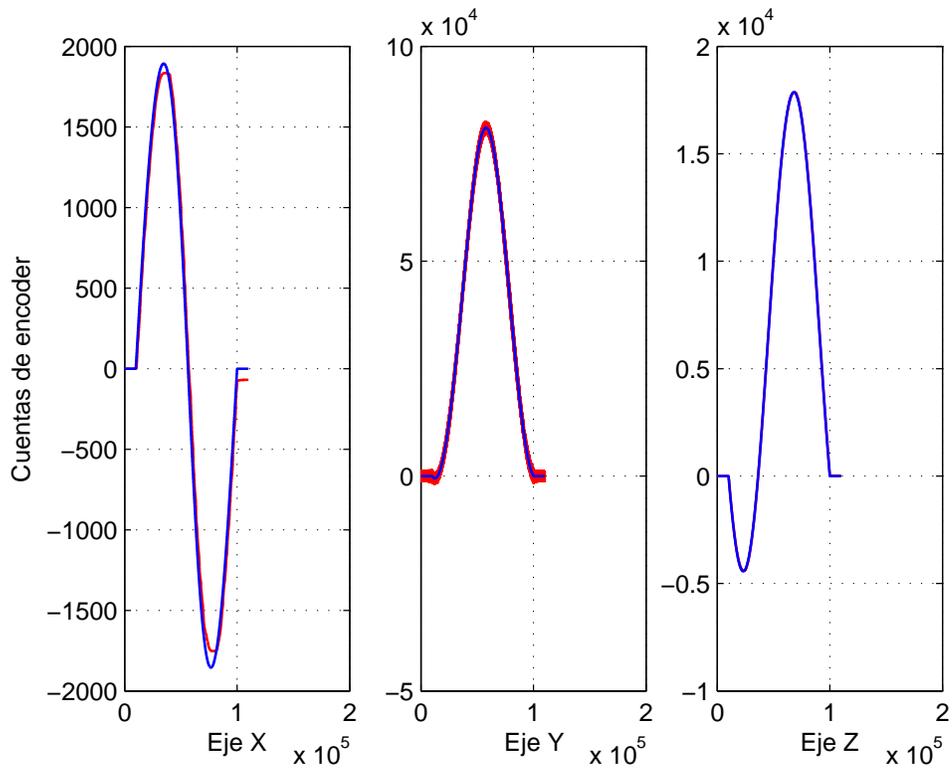


Figura 4.4: Seguimiento para la referencia en los tres ejes(X , Y y Z), movimiento coordinado.

En el análisis para la prueba del movimiento coordinado de los tres ejes se observa que el desempeño general del movimiento fue bastante bueno, en general el error disminuye y no se presentan oscilaciones, debido a que se utilizó otra sintonización para el algoritmo de control.

Capítulo V

Conclusiones

Se llevó a cabo la instrumentación (habilitación de movimiento) de los tres ejes de una máquina fresadora, originalmente la máquina se encontraba en condiciones inoperables debido a que carecía de instrumentación alguna, siguiendo la metodología descrita en este trabajo fue posible realizar pruebas del movimiento de las bancadas utilizando un controlador propio, que justifica a su vez la funcionalidad del sistema.

Contar con este sistema instrumentado permite contar un una base para el diseño, desarrollo y pruebas de algoritmos de control, monitoreo de señales, desarrollo de interfaces, etc, en maquinaria de tres ejes. Otra ventaja de este sistema es que el usuario puede modificar e incorporar los módulos que sean necesarios para el mejoramiento del sistema, tanto en el hardware como en el software.

Se desarrollo la metodología para la generación de perfiles polinomiales en 3D para el control de posición de una máquina fresadora CNC vertical de tres ejes. El sistema se implemento es controlador digital. La tarjeta MCUAQ4X para el control de cuatro ejes simultáneos. Las ventajas de presentar la implementación en tecnología basada en FPGA que se justifica por las arquitecturas desarrolladas en paralelo, velocidad de ejecución, reconfigurabilidad y portabilidad de los módulos del sistema.

Bibliografía

Altintas Y. 2001. Manufacturing Automation. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibration and CNC Design. University of British Columbia. Cambridge. University press. 886: 122-127.

Delta Tau. 2005. Data Systems Coporation. Turno PMAC-Lite PCI Data Sheet. Delta Tau Data Systems.

Erkorkmaz K y Y. Altintas. 2001. High Speed CNC System Design. Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation. International Journal of Machine. 41 (2001) 1323 - 1345.

Figuera V, P. 2006. Optimización de Productos y Procesos Industriales. Ediciones Gestión. Barcelona. ISBN 84-96426-63-7.

Galil Control Motion, Inc. 2005. User Manual DMC 18x2. Manual Rev 1.0g.

Hauck S y A. Dehon. 2008. Reconfigurable Computing. The Theory and Practice of FPGA-Based Computation. Elsevier Inc.

<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/comunicados>

<http://journalmex.wordpress.com/2009/08/29/el-desarrollo-de-la-industria-manufacturera-mexicana/>

Kalpakjian, S y R. S. Schmid. (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Segunda Edición. Prentice Hall. ISBN 970-26-0137-1. Páginas. 1176.

BIBLIOGRAFÍA

- Krar S. F y A. F. Check. 2002. Tecnología de las Máquinas-Herramienta. Quinta Edición. Alfaomega. 869: 3-11.
- Liu S. 2002. An On-line Reference-Trajectory Generator for Smooth Motion of Impulse-Controlled Industrial Manipulators. IEEE/Advanced Motion Control. ISBN: 0-7803-7479-7.
- Morales V, L. 2007. Unidad de USB de Control de Posición y Generación de Perfiles para un Intercambiador Automático de Herramientas. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.
- Molares V, L. 2004. Diseño de Plataforma Hardware-Software Para el Desarrollo de Aplicaciones Industriales Basadas en FPGA. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Osornio R, R. A. 2004. Diseño y Construcción de una Tarjeta Controladora de 3 Ejes. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.
- Osornio R, R. A. 2007. Diseño de Sistema de Control para CNC de Alta Velocidad. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.
- Osornio R, R. A., R. J, T. Romero., G, R. Herrera y R, M. Castañeda. 2007. Computationally Efficient Parametric Analysis of Discrete-time Polynomial Based Acceleration-Deceleration Profile Generation for Industrial Robotics and CNC Machinery. Elsevier Journal on Mechatronics. In Press.
- Osornio R, R. A., R. J, T. Romero., G, R. Herrera y R, M. Castañeda. 2008. FPGA Implementation of Higher Degree Polynomial Acceleration Profiles for Peak Jerk Reduction in Servomotors. Elsevier Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 25: 379-392.
- Joshi, P.H. 2007. Machine Tools Handbook, Design and Operation. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.

- Rivera G, J. R. 2007. Perfiles Polinomiales de Movimiento para Máquinas CNC. FIMEE - Universidad de Guanajuato.
- Rivera-G, J. R., R. J, T. Romero., R. A, R. Osornio., A, G. García y G, R. Herrera. 2010. Design Methodology for Fully Dynamic-Controlled Polynomial Profiles and Reduced Tracking Error in CNC Machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 51 (2010). 723 - 737.
- Romero T, R. J. 2004. Procesamiento de Señales para la Detección de Ruptura de Herramientas en Sistemas de Manufactura por Control Numérico Computarizado. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Romero T, R. J. 2007. Electrónica Digital y Lógica Programable. Universidad de Guanajuato. FIMEE. Primera edición. Dirección General de Extensión/Coordinación Editorial.
- Santiago P, J., R. A, R. Osornio., R. J, T. Romero., G, R. Herrera., M, R. Delgado. 2008. DSP Algorithm for the Extraction of Dynamics Parameters in CNC Machine Tool Servomechanisms from an Optical Incremental Encoder. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 48, 1328-1334.
- Suk H. S., K. K. Seong., H. C. Dae y S. Ian. 2008. Theory and Design of CNC Systems. Springer Series in Advanced Manufacturing. Editorial Springer.
- Volnei A. P. 2004. Circuit Design with VHDL. Massachusetts Institute of Technology Press. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.

Apéndice

Reconversión de maquinaria con controlador basado en FPGA aplicada a una fresadora CNC

Conversion of conventional machinery and FPGA-based controller applied to a CNC milling machine

Arturo Yosimar Jaen Cuellar¹, Roque Alfredo Osornio Rios², Luis Morales Velázquez², Juan Primo Benítez Rangel², René de Jesús Romero Troncoso³, Arturo García Pérez³, Eduardo Cabal Yopez³, Ricardo Alvarez Salas⁴, Homero Miranda Vidales⁴

¹Estudiante de posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro - Campus San Juan del Río. ²HSPdigital - CA Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro, Río Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807 San Juan del Río, Querétaro, México. ³HSPdigital - CA Telemática/Procesamiento Digital de Señales, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carr. Salamanca-Valle km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, 36700 Salamanca, Guanajuato, México. ⁴CA Electrónica de Potencia y Control, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava 8, Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, S. L. P., México.

RESUMEN. Los sistemas CNC han estado bajo una extensa investigación en la que la materia de estudio sobresaliente es el desarrollo de controladores buscando mejorar y optimizar la funcionalidad del sistema. En varios trabajos se describe la automatización de un sistema CNC desde el punto de vista del controlador y algoritmo de control, sin dejar ver todo el trabajo necesario a realizar en el sistema para implementar el controlador. En el presente trabajo se describe el proceso de reconversión de una máquina fresadora CNC con controlador basado en un dispositivo FPGA, los pasos a seguir para la instrumentación y habilitación de los ejes móviles de la máquina se describen de forma genérica y estructurada como referencia técnica del proceso a seguir en la reconversión de equipo convencional. Se presentan algunas consideraciones útiles a tomar en cuenta en la práctica para el desarrollo del proyecto. La funcionalidad del sistema reconvertido es probada mediante el desarrollo de movimientos en los ejes, ejecutados mediante un controlador basado en un dispositivo de alto desempeño FPGA, los resultados obtenidos se presentan de forma gráfica justificando el trabajo realizado.

Palabras clave: Reconversión de maquinaria, instrumentación, sistema CNC, FPGA.

1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas-herramientas CNC (*Computed Numerical Control; Control Numérico por Computadora*) son caracterizadas hoy día por el nivel de automatización con el que cuentan y su implementación en los procesos industriales es cada vez mayor. Aspectos como el tiempo, costo y calidad de maquinado varían según las capacidades de cada sistema. Actualmente, se encuentran disponibles en el mercado una extensa variedad de equipos y sistemas industriales CNC fabricados por empresas como FANUC, DINA, SIEMENS, CINCYNATI, entre otras, que conjuntan tecnología muy costosa además de diseños propios y cerrados, es decir, no permiten actualizar, modificar o incorporar módulos ajenos a los programados en los algoritmos de sus controladores. Las necesidades industriales de cada empresa son diferentes, en su mayoría específicas, y sus recursos económicos en ocasiones son limitados como en el caso de las pequeñas y medianas empresas, esto refleja un problema en la adquisición de equipo nuevo. La reconversión de maquinaria y equipos convencionales CNC, que combinan nuevos diseños y técnicas en el desarrollo de los algoritmos para sus controladores ofrecen alternativas más acorde a cada necesidad y a costos adecuados. En México existen pequeñas y medianas empresas que se dedican a los procesos de instrumentación y reconversión de maquinaria CNC según las necesidades de algún usuario, así mismo, instituciones educativas y centros de investigación recurren a la instrumentación y reconversión de maquinaria, debido a la necesidad de contar con equipos para pruebas y desarrollo de tecnología propia.

Un proceso de reconversión se desarrolla en dos vertientes: por un lado se tienen los equipos comerciales y por el otro se tiene equipo desarrollado en investigaciones. En el primer caso se implementa un controlador comercial y la instrumentación que requiera el sistema para su funcionamiento, es decir, incorporando elementos y equipo comercial, generalmente de un costo elevado. En el segundo caso se han realizado diversas aportaciones tanto en software como en hardware, procurando un costo mínimo. Entre las aportaciones en software se han presentado interfaces de comunicación PC-máquina, monitoreo de variables, visualización gráfica del proceso, control mediante

procesamiento de señales en la PC, etc. Las aportaciones en hardware presentan el diseño y la construcción de equipo propio en una arquitectura abierta, como lo son tarjetas para el control de procesos industriales que van desde el acondicionamiento de las señales, adquisición de datos (convertidores ADC y DAC) y procesamiento de señales analógicas y digitales, además del diseño y la programación con algoritmos transparentes que permiten la integración de diversos módulos *IPs-Core* en hardware, mediante dispositivos de alto desempeño como el FPGA (*Field Programmable Gate Array; Arreglo de Compuertas Programables en Campo*), que pueden integrarse como una sola unidad y adecuarse para el control de diferentes procesos (Soluciones del tipo SoC). Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se ha trabajado con tecnología de tornos y fresas de dos ejes y se encuentra en investigación la tecnología de maquinaria CNC de tres ejes.

Los trabajos realizados en la UAQ ofrecen alternativas e innovación tecnológica actualizando equipos convencionales para lograr un alto nivel de desempeño. En ocasiones el trabajo a realizar consiste en la adición de módulos que proporcionan al sistema nuevas características o funciones que antes no tenía, actualizando el controlador y la instrumentación del sistema. Entre estos trabajos tenemos el de Cuevas (2000), que desarrolló un sistema de fractura para máquinas CNC, para detectar ruptura en los insertos de la máquina. Otro ejemplo más claro es el de Alaniz (2003), que realizó la actualización de un torno convencional de los años 70s de dos ejes coordinados que le proporcionan la capacidad de contar con características aplicables al entorno productivo, utilizó un sistema de control numérico CHROM-II basado en modularidad. Posteriormente Alaniz (2005), desarrolló una unidad con sistema de corte adaptable para la optimización del maquinado de una máquina-herramienta CNC. Otro trabajo es el realizado por Leal (2004), quien implementó un sistema de detección de ruptura en herramientas de corte en taladros, basado en algoritmos de simetría para la detección de falla de la herramienta. Por su parte Romero (2004), desarrolló un sistema de supervisión del estado de la herramienta para máquinas CNC, el sistema fue implementado en una máquina fresadora convertida a CNC. Hablando de maquinaria industrial en general, Bravo en (2004) desarrolló un sistema de control modular aplicado a una máquina de inyección de plástico, se trata de un controlador de maquinaria industrial empleando tecnologías de bajo costo. Osornio (2004), diseñó y construyó una tarjeta de control para tres ejes con aplicaciones en CNC basado en un dispositivo FPGA y en lenguaje de descripción de hardware. Así mismo, Osornio (2007), presentó el diseño y desarrollo de un sistema de control para servomotores en CNC de alta velocidad basados en el dispositivo FPGA, el sistema fue probado en una máquina fresadora CNC de alta velocidad reconvertida, debido a que los sistemas comerciales no permiten la conexión de equipo ajeno al sistema. García (2006), realizó un sistema de supervisión de herramientas de corte para tornos CNC, para implementar el sistema primero realizó la instrumentación de un torno con el fin de realizar pruebas en condiciones de operación normal de la máquina. Los trabajos anteriores presentan módulos o unidades que integran nuevas funciones a las máquinas-herramienta, así como mejoras en el controlador. Los trabajos que a continuación se presentan ofrecen mejoras en el comportamiento dinámico de la máquina, capacitándola con características similares a los sistemas comerciales, trabajos como el de Morales (2007), quien desarrolló un sistema con unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas. Enfocándose en mejorar el comportamiento dinámico de la máquina, Rivera (2007), implementó en una estructura digital mediante FPGA algoritmos para la generación de perfiles que controlan la dinámica en posición, velocidad, aceleración y jerk aplicado a un torno CNC. Por otra parte a nivel internacional, existen publicaciones y textos que son utilizados como referencia técnica para el diseño y la instrumentación de máquinas CNC, tal es el caso de Altintas (2001), en donde se presenta referencia matemática y de diseño en maquinaria CNC. En los trabajos anteriores se observa que la investigación en máquinas de dos ejes es extensa, sin embargo es necesario extender estas investigaciones a máquinas de tres ejes.

Los sistemas comerciales generalmente son muy costosos, sus diseños son propios y cerrados, la programación de los algoritmos en sus controladores no es transparente. En el caso de la tecnología propia desarrollada pensando en las necesidades de las empresas y en los problemas que los sistemas comerciales no atienden, además de ser desarrollados a un bajo costo, representan una alternativa para que empresas con recursos económicos limitados presenten una competitividad en el mercado al mismo nivel que las grandes empresas con sistemas CNC costosos. Por otra parte, contar con equipo de pruebas permite a las instituciones educativas y centros de investigación continuar diseñando, mejorando y desarrollando tecnología cada vez más avanzada y de excelente calidad.

En el presente trabajo se desarrolla el proceso de reconversión de maquinaria CNC con controlador basado en FPGA enfocado a una máquina fresadora, la aportación de este trabajo es la reconversión en CNC de una fresa aplicando tecnología FPGA para el control de posición de tres ejes realizando movimientos básicos con el controlador, además se pretende presentar una guía de automatización de una máquina que sirva como referencia

- Pruebas básicas de funcionamiento de los componentes del sistema.
- Implementación del controlador; pruebas de movimiento.
- Documentación.

2.1 Levantamiento general de la máquina

El levantamiento general de la máquina indica el estado en el que se encuentra la misma, este listado describe las condiciones de cada subsistema de la máquina, indicando la documentación existente con la que se cuenta, el equipo montado, el equipo faltante y las acciones necesarias para habilitar el subsistema para su funcionamiento.

En el presente trabajo el enfoque se realizó en los sistemas mecánico, eléctrico de control y eléctrico de potencia, en la Tabla 1 se especificó de forma global lo siguiente:

Tabla 1. Levantamiento general de la máquina

	Documentación	Equipo	Acciones a realizar
Sistema mecánico	No se cuenta con diagramas, dimensiones o especificaciones de los componentes del sistema.	Se cuenta con los motores de los tres ejes sin montar. Los motores requieren de acoplamiento con bandas. Las piezas mecánicas para el acoplamiento no están completas. No se cuenta con los sensores de límite de las bancadas, así como, las piezas que accionan a los mismos. No se cuenta con la contratapa donde se montan las piezas del acoplamiento del eje Z.	Se deben de manufacturar las piezas mecánicas necesarias para el acoplamiento, así como, las piezas mecánicas para la activación de los sensores de límite. Es necesario cotizar y conseguir los sensores de límite y las bandas para el acoplamiento. Manufacturar la contratapa de la base del motor del eje Z.
Sistema eléctrico de potencia	No se cuenta con el diagrama de la instalación de sistema eléctrico de potencia	El subsistema tiene una instalación eléctrica incompleta realizada previamente, se tienen los elementos necesarios para redefinir la instalación eléctrica. Se cuenta con el equipo eléctrico para la alimentación de los servoamplificadores.	Redefinir la instalación del sistema eléctrico de potencia y elaborar su diagrama, realizar la instalación de acuerdo al mismo. Verificar el voltaje de alimentación de los servoamplificadores.
Sistema eléctrico de control	No se cuenta con el diagrama del sistema. Se cuenta con las especificaciones de los servoamplificadores, sensores y motores para su revisión.	Se cuenta con los servoamplificadores de los tres motores de la máquina sin montar. No se cuenta con las tarjetas de opto-acoplamiento.	Elaborar un diagrama de conexiones para pruebas de movimiento del sistema. Diseñar y construir las tarjetas de opto-acoplamiento. Montar el equipo en el gabinete de la máquina y realizar las conexiones necesarias para pruebas de movimiento totales.

El levantamiento general de la máquina considera solo de forma global las acciones a realizar. Pero un análisis más profundo debe ser realizado, en el se deben considerar los detalles que no son especificados en el levantamiento.

2.2 Adquisición de material y equipo

En esta etapa generalmente se realiza la cotización de los elementos considerados durante el levantamiento general de la máquina, antes de la adquisición es necesario definir las características que el equipo y el material deben tener de acuerdo a las necesidades del sistema; dimensiones, costo adecuado, características en general, etc. En lo posible se recomienda tener más de una cotización y seleccionar el equipo que mejor cubra las necesidades establecidas.

2.3 Manufactura de piezas mecánicas necesarias

La manufactura de las piezas mecánicas necesarias para el acoplamiento de los motores y la activación de los interruptores de límite, se basa en las características de los materiales y las normas establecidas para el maquinado de los mismos según su aplicación. En la Tabla 2 se presentan las piezas mecánicas diseñadas y manufacturadas de mayor importancia en el movimiento de las bancadas.

Tabla 2. Piezas mecánicas manufacturadas

Observaciones	Características	Maquinado
Diseñada y manufacturada para los tres ejes	Aluminio ASTM 6061 para el diseño de piezas mecánicas como engranajes	
Diseñada y manufacturada para los tres ejes	Acero 1045 al 0.45% de carbono para construcción de maquinaria. Norma AISI/NOM	
Diseñada para la base del eje Z	Aluminio ASTM 6061 para diseño de piezas mecánicas	
Diseñadas y manufacturadas para los tres ejes	Aluminio ASTM 6061 para diseño de piezas mecánicas	

Ya que se trata de una máquina prototipo el diseño y manufacturación de las piezas se realizó de forma experimental, con el afán de conocer el proceso de manufactura de las piezas, además del hecho de que algunas piezas maquinadas tiene un diseño único, es decir, no se encuentran comercialmente disponibles. Sin embargo, existen piezas comerciales que pueden ser utilizadas para la funcionalidad del sistema.

Debido a que la máquina ya contaba con algunas piezas mecánicas, se buscó la homogeneidad del sistema, de esta manera se tiene otra justificación en la selección de los materiales para el maquinado de las piezas faltantes.

Algunas de las propiedades de los materiales seleccionados como el aluminio y el acero son adecuadas según su aplicación. En el caso del aluminio ASMT 6061, éste cuenta con la propiedad de absorber impactos siendo adecuado para los topes mecánicos de las bancadas, además es ligero, por lo cual es ideal para los engranes maquinados en el caso del acoplamiento por bandas de los motores, ya que se trata de bandas plásticas dentadas. En la selección del acero 1045, se consideró el esfuerzo torsional en que estaría sometida la extensión de la flecha del motor.

El método utilizado para el maquinado de las piezas fue por arranque de viruta (maquinado de torno y fresa) en algunos casos justificando esto debido a que se trata de piezas con diseño único.

2.4 Elaboración de diagramas de conexiones

Es necesaria la elaboración de diagramas de conexiones tanto para pruebas de funcionamiento de los elementos del sistema, como para pruebas de movimiento totales utilizando el controlador implementado en el FPGA. El diagrama para pruebas de funcionamiento de los elementos describe las conexiones mínimas para probar los elementos del sistema de control sin incluir el controlador, es decir, se elabora el diagrama para probar los elementos como el servomotor y el servoamplificador. El diagrama de pruebas totales describe las conexiones de todos los elementos para el control del sistema incluyendo sensores, tarjetas de opto-acoplamiento y el controlador.

Para el sistema eléctrico de potencia, el diseño se elabora considerando los niveles de voltaje y de corriente que manejan los elementos de potencia, se consideran tanto los valores pico en voltaje y corriente para la selección del cableado y de los elementos de protección del sistema, además de las consideraciones de normas eléctricas.

2.5 Diseño y fabricación de tarjetas de opto-acoplamiento

La función de las tarjetas de opto-acoplamiento es mantener aisladas las señales de tierra de los distintos elementos del sistema eléctrico. Mantener las señales con diferente nivel de voltaje aisladas evita daños al equipo. El diseño de las tarjetas de opto-acoplamiento considera todas las señales que se manejan en el sistema de control, incluye las señales del controlador, de los sensores (interruptores de límite y encoders) y del servoamplificador.

2.6 Instalación y acoplamiento de equipo

Se toman en consideración dos aspectos importantes: por un lado las dimensiones del lugar y por el otro la distribución de los elementos antes del montaje. En el caso de los elementos de control, como los servoamplificadores, tarjetas de opto-acoplamiento y controlador, se debe tener un cuidado de mantener alejados éstos elementos una distancia razonable de las zonas de potencia ya que estos elementos pueden ser afectados por el ruido presente en el sistema. De lo contrario, se recomienda un buen sistema de tierras.

2.7 Conexiones de acuerdo a diagramas eléctricos

Después del montaje del equipo, las conexiones del sistema se realizan en base al diseño de sus diagramas de conexiones. Se debe evitar en lo posible, en el caso de las señales de control, el efecto del ruido inducido por los cables de potencia, éste efecto puede evitarse si se utiliza cable aislado y se mantiene una separación entre el cableado de la etapa de potencia y el de las señales de control. Las características del cableado se seleccionan en base a estándares eléctricos.

2.8 Pruebas básicas de funcionamiento de los componentes del sistema

Antes de realizar pruebas totales utilizando el controlador es recomendable efectuar pruebas funcionalidad de los elementos del sistema, verificar las alimentaciones de cada uno de los elementos, así como monitorear las señales que entran y salen del sistema, para el caso de los servoamplificadores y servomotores utilizar el diagrama de conexiones mínimo para realizar pruebas de movimiento con referencias conocidas. También se sugiere desarrollar pruebas por etapas, es decir, probar por separado cada componente y en conjunto antes de incorporar el controlador para evitar posibilidad de fallas conforme se desarrolla el proyecto.

2.9 Implementación del controlador y pruebas de movimiento

La etapa final del proyecto consiste en pruebas de funcionalidad totales, en esta etapa se integra el controlador y el hardware necesario para ejecutar el control del sistema. El objetivo de esta parte es realizar pruebas de movimiento y monitorear el seguimiento de las referencias del sistema. Es conveniente registrar los datos del movimiento para realizar un análisis gráfico. De esta manera se comprueba la efectividad del sistema de control de la máquina instrumentada.

2.10 Documentación

Un hecho importante y que se observa en la práctica es que la etapa de documentación no debe considerarse al finalizar el trabajo, es decir, la documentación debe estar presente durante todo el proyecto, desde la etapa inicial hasta la conclusión del mismo, esto tiene una sólida justificación debido a que en diversos puntos del desarrollo del proyecto la consulta de los aspectos técnicos está presente, sea revisión de diagramas o consulta de especificaciones de algún equipo con el fin de realizar montajes, conexiones, preparación de pruebas e incluso corrección de fallas y errores.

La documentación no se limita a la elaboración de diagramas y contar con fichas técnicas u hojas de especificaciones, ésta debe llevar un registro de todo el trabajo desarrollado durante el proyecto en una manera bien organizada.

3. CONTROL DEL SISTEMA

Se pretende implementar en algoritmo de control del sistema en el módulo DRC (*Distributed Reconfigurable Controller; Controlador Distribuido Reconfigurable*) desarrollado por el grupo HSPdigital, Morales (2010), con la capacidad de control para cuatro ejes, diseñado originalmente para propósitos de control de movimiento en máquinas herramienta. El algoritmo de control incluye el IP-Core de un PID también desarrollado por el grupo, Osornio (2004), adecuado para el control de los tres ejes de la máquina. El diagrama a bloques del sistema de control se muestra en la Figura 3.

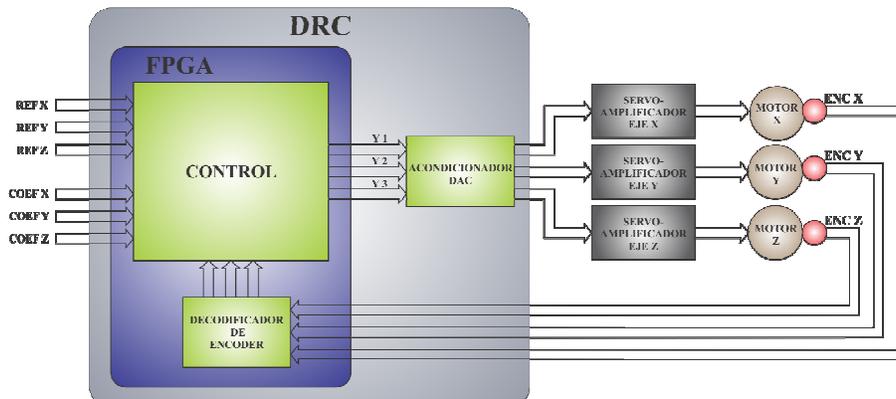


Figura 3. Diagrama a bloques del sistema de control.

Las trayectorias definidas para estas pruebas toman en consideración los límites de carrera de las bancadas, así como, los movimientos bruscos que pudieran presentarse en el momento de ejecutar las pruebas, es decir, las trayectorias de referencia de cada eje son curvas suaves.

4. EXPERIMENTACIÓN

El sistema instrumentado se muestra en la Figura 4. Se presentan cuatro casos de estudio para las pruebas de movimiento, los primeros tres casos corresponden a pruebas de movimientos independientes para cada eje y el cuarto caso de estudio implica un movimiento coordinado de los tres ejes, la descripción se presenta en la Tabla 3.

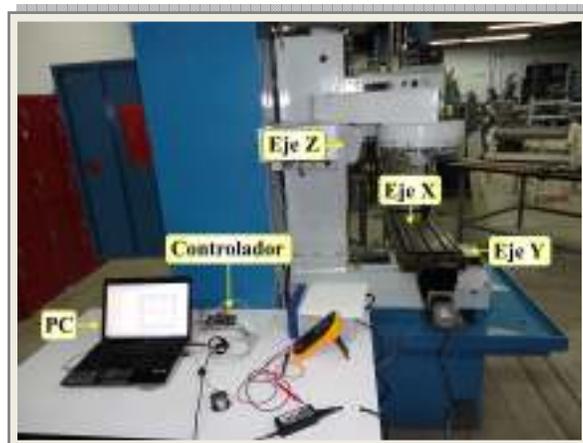
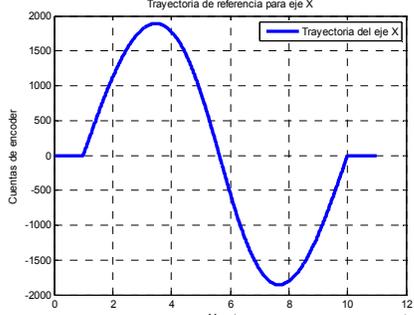
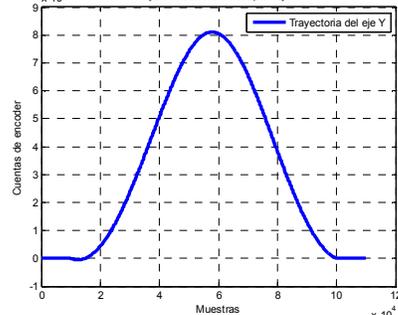
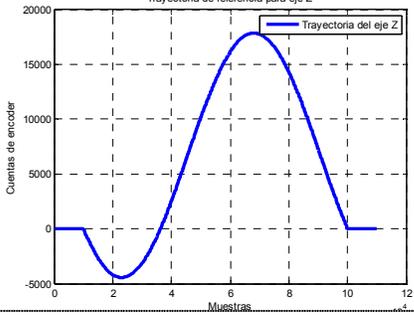
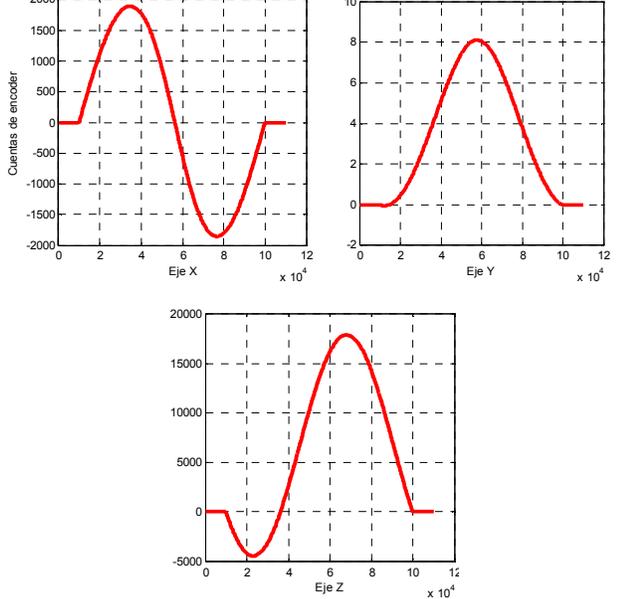


Figura 4. Sistema instrumentado.

Tabla 3. Casos de estudio.

<p>Caso 1: <i>prueba de movimiento del eje X</i></p>	<p>Esta prueba consiste en proporcionarle al controlador la trayectoria a seguir por el motor del eje X, mientras los ejes Y y Z permanecen inmóviles</p>	
<p>Caso 2: <i>prueba de movimiento del eje Y</i></p>	<p>Para este caso, se proporciona la trayectoria del eje Y al controlador, mientras los ejes X y Z permanecen inmóviles</p>	
<p>Caso 3: <i>prueba de movimiento del eje Z</i></p>	<p>En el caso tres la trayectoria proporcionada al controlador corresponde a la del eje Z, mientras los ejes X y Y permanecen inmóviles</p>	
<p>Caso de estudio 4: <i>movimiento coordinado de los tres ejes</i></p>	<p>Esta prueba consiste en proporcionarle al controlador las trayectorias de los tres ejes para efectuar movimiento coordinado</p>	

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los cuatro casos de estudio se presentan a continuación, en cada caso se presenta la grafica de comparación entre la referencia y el seguimiento del sistema, siendo el seguimiento la curva en color rojo y la trayectoria la curva en color azul.

5.1 Resultados del movimiento independiente de los ejes

- Caso 1:

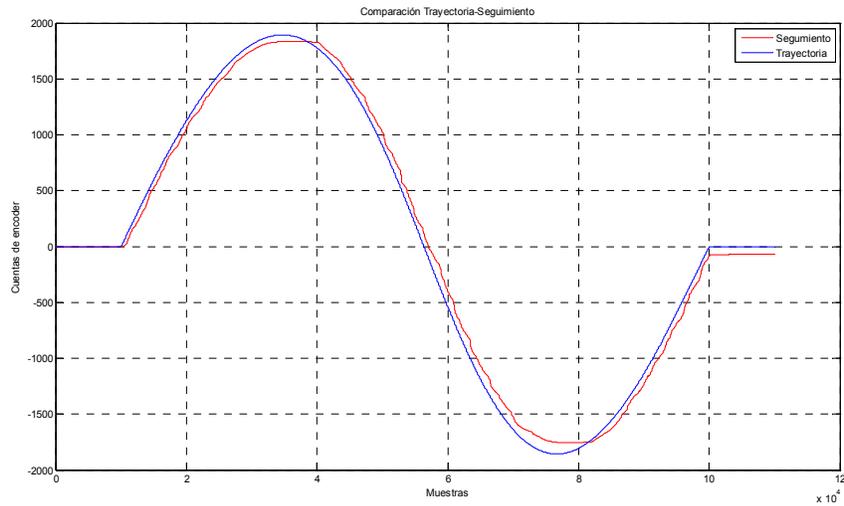


Figura 5. Respuesta obtenida del seguimiento para el eje X.

El seguimiento lleva la misma dinámica de la trayectoria aunque presenta error en el seguimiento, el cual puede ser eliminado con una identificación de la planta y una sintonización del sistema más exhaustiva.

- Caso 2:

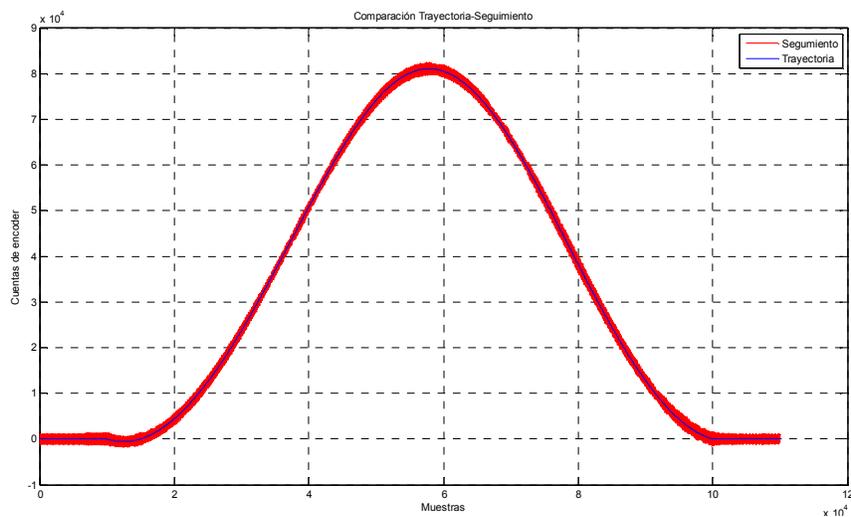


Figura 6. Respuesta obtenida del seguimiento para el eje Y.

En este caso se presentan ligeras oscilaciones alrededor de la trayectoria de referencia, las cuales se eliminan, como en el caso anterior, con una identificación y sintonización más adecuadas. Sin embargo, se observa de la Figura 6 que el sistema sigue la dinámica de la trayectoria.

- **Caso 3:**

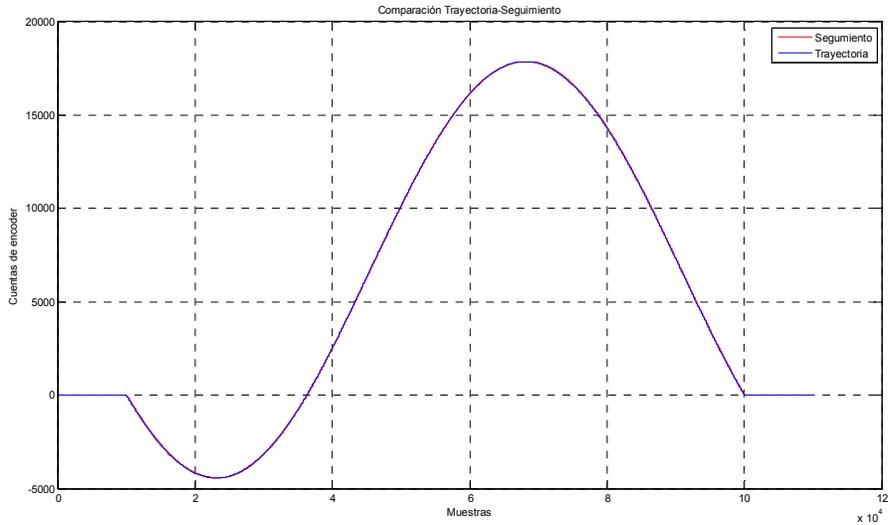


Figura 7. Respuesta obtenida del seguimiento para el eje Z.

Analizando la Figura 7, se observa que el seguimiento del sistema fue el mejor de los casos de movimiento independiente.

5.2 Resultados del movimiento coordinado

- **Caso 4:**

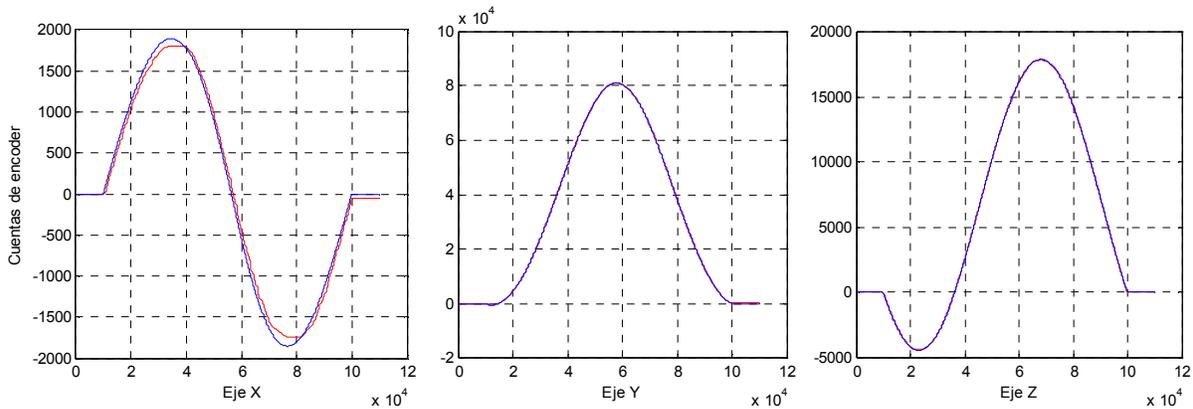


Figura 8. Respuesta obtenida en el movimiento coordinado.

La respuesta obtenida en la prueba del movimiento coordinado presenta un resultado similar al obtenido en las pruebas de movimientos independientes, sin embargo se observa de la Figura 8, que la respuesta del eje X es semejante al resultado obtenido a la respuesta del caso 1. La respuesta del eje Y no presentan oscilaciones como en el caso 2. La respuesta del eje Z se mantiene semejante a la obtenida en el caso 3.

5.3 Conclusiones

Se llevó a cabo la instrumentación (habilitación de movimiento) de los tres ejes de una máquina fresadora, originalmente la máquina se encontraba en condiciones inoperables debido a que carecía de instrumentación alguna, siguiendo la metodología descrita en este trabajo fue posible realizar pruebas del movimiento de las bancadas utilizando un controlador propio, que justifica a su vez la funcionalidad del sistema.

Contar con este sistema instrumentado permite contar con una base para el diseño, desarrollo y pruebas de algoritmos de control, monitoreo de señales, desarrollo de interfaces, etc, en maquinaria de tres ejes. Otra ventaja de este sistema es que el usuario puede modificar e incorporar los módulos que sean necesarios para el mejoramiento del sistema, tanto en el hardware como en el software.

6. REFERENCIAS

Alaniz Lumbreras, Pedro Daniel. 2003. Instrumentación y control de una Máquina-Herramienta de dos ejes.

Alaniz Lumbreras, Pedro Daniel. 2005. Unidad de CNC con sistemas de corte adaptable para la optimización de maquinado.

Altintas, Yusuf. 2001. Manufacturing Automation. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Univ of British Columbia, Cambridge. University Press. 886: 122-227.

Bravo Curiel, Agustín. 2004. Desarrollo de un Control Modular para Maquinaria aplicado a una Máquina de Inyección de Plástico.

Cuevas Gutiérrez, Carlos Cuauhtémoc. 2000. Detección de ruptura en herramientas de corte durante el torneado usando señales de emisión acústica.

García Quijada, Manuel. 2006. Sistema de supervisión de ruptura en herramientas de corte para tornos de control numérico computarizado. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Leal Tafolla, W. Baldo. 2004. Detección de ruptura de corte en el proceso de taladrado.

Morales Velázquez, Luis. 2007. Unidad de USB de Control de Posición y Generación de Perfiles para un Intercambiador Automático de Herramientas. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.

Morales Velázquez, Luis. 2010. Diseño de plataforma hardware-software para el desarrollo de aplicaciones industriales basadas en FPGA. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.

Osornio Ríos, Roque Alfredo. 2004. Diseño y construcción de una tarjeta controladora de 3 ejes. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.

Osornio Ríos, Roque Alfredo. 2007. Diseño de Sistema de Control para CNC de Alta Velocidad. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus San Juan del Río.

Rivera Guillen, Jesús Rooney. 2007. Perfiles Polinomiales de Movimiento para Máquinas CNC. FIMEE - Universidad de Guanajuato.

Romero Troncoso, René de Jesús. 2004. Procesamiento de Señales para la Detección de Ruptura de Herramientas en Sistemas de Manufactura por Control Numérico Computarizado. Universidad de Guanajuato.