

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Desarrollo de Procedimientos Automatizados para Habilitar una Fresadora Vertical CNC de 3 ejes a su Operación Sincronizada en 5 ejes.”

Documento de Tesis

que presenta, para obtener el grado de Doctorado en Ciencias

Presentado por:

M.I. GUILLERMO MARTÍN LIMÓN MOLINA.

Director de Tesis:

Dr. Álvaro González Ángeles.

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

ENERO DE 2018.

Índice.

	Contenido	Página
Índice de Figuras		iv
Índice de Tablas		vii
Resumen		viii
Abstract		ix
Capítulo 1. Introducción		1
1.1 Antecedentes.		1
1.2 Justificación.		15
1.3 Máquinas de Control Numérico por Computadora.		16
1.4 Maquinados Complejos CNC.		24
1.5 Hipótesis.		28
1.6 Objetivos.		28
1.6.1 Objetivo Principal		28
1.6.2 Objetivos Particulares		28
Capítulo 2. Marco Teórico		29
2.1 Datos Técnicos de la Máquina CNC HAAS VF-2.		29
2.2 Propuesta de Implementación de cuarto y quinto ejes rotativos.		33
2.3 Parámetros de Entrada y Salida de la Máquina CNC HAAS VF-2.		38
2.4 Ambiente de Diseño Asistido por Computadora Solidworks.		39
2.5 Ambientes de Manufactura Asistida por Computadora.		42
2.5.1 Mastercam.		43
2.5.1.1 Niveles de Producto Mastercam.		44
2.5.2 NX.		46
2.6 Labview.		47
2.7 Tipos de Maquinados CNC.		49
2.8 Visión por Computadora.		55
2.8.1 Procesamiento de Imágenes.		59
2.8.2 Mejoramiento de las Imágenes Adquiridas.		60
2.8.2.1 Calibración espacial.		61
2.8.2.2 Filtros espaciales.		61
2.8.2.3 Kernels de convolución.		63
2.8.3 Medición de Propiedades.		63
2.8.3.1 Región de interés.		63
2.8.3.2 Traslapes no destructivos.		65
2.8.3.3 Detección de bordes.		65
2.8.3.4 Métodos para la detección de bordes.		66
2.8.3.5 Exactitud a nivel de subpixel.		67
2.8.3.6 Detectores de bordes.		68
2.8.3.7 Sujeción.		71
Capítulo 3. Desarrollo Experimental.		73
3.1 Incorporación de Cuarto Eje a la Máquina CNC de Tres Ejes.		73

3.2 Incorporación del Quinto Eje a la Máquina CNC de Tres Ejes.	75
3.2.1 Métodos de Sincronización del Quinto Eje.	78
3.2.2 Limitantes de los Métodos Propuestos.	80
3.3 Incorporación de Ejes Adicionales a la Máquina CNC.	81
3.4 Pruebas con Motores a Pasos	89
3.5 Interfaz para Comunicación con HAAS VF-2	91
3.6 Comunicación entre Labview 2009 y los Servomotores	93
Capítulo 4. Resultados y Conclusiones.	97
4.1 Metodología Propuesta para la Incorporación de Ejes Rotativos a Fresadoras CNC con Tecnología Obsoleta	97
4.2 Valoración Didáctica del Desplazamiento en Ejes Existentes.	102
4.3 Uso de Gráficas de Desplazamientos para Evaluar la Sincronización de Ejes Adicionales.	104
4.4 Retrofit en Sistemas CNC para Migrar de 3 ejes a 5 ejes.	105
4.5 Trabajos Futuros	105
5. Bibliografía	107

Índice de Figuras

	Página
Figura 1. Motor V-12 de un avión Liberty	3
Figura 2. Sistema desarrollado por Parsons con el apoyo del MIT	4
Figura 3. Torno Paralelo Horizontal	7
Figura 4. Torno Revolver	8
Figura 5. Torno Copiador	8
Figura 6. Torno Automático	9
Figura 7. Torno Vertical	10
Figura 8. Centro de Torneado CNC	19
Figura 9. Máquina Fresadora CNC	20
Figura 10. Diagrama de bloques de un proceso a circuito abierto	22
Figura 11. Diagrama de bloques de un proceso a circuito cerrado con retroalimentación indirecta	23
Figura 12. Diagrama de bloques de un proceso a circuito cerrado con retroalimentación directa	23
Figura 13. Ejemplos de maquinados complejos: a) Partes de turbomaquinaria como álabes b) Partes biomédicas como prótesis de rodilla	27
Figura 14. Cortador plano (izquierda) y cortador esférico (derecha)	31
Figura 15. Cortador “nariz de toro”	31
Figura 16. Interfaz TRT-160	32
Figura 17. Vista de la tarjeta del CPU y la tarjeta de control de la HAAS VF-2	33
Figura 18. Tarjeta servoamplificadora (para un solo eje)	34
Figura 19. Controlador HAAS para servomotores	35
Figura 20. Modos para controlar un cuarto y quinto eje usando un TRT-160	36
Figura 21. Diagrama de bloques de la propuesta de integración de 5 ejes	37
Figura 22. Conexión del controlador de servomotores HAAS a un TRT-160. a) Modo de Operación Completa cuarto y quinto eje. b) Operación Indizada del	37

cuarto y completa del quinto eje. c) Operación Indizada de cuarto y quinto eje	
Figura 23. Módulo de relevadores de la máquina CNC HAAS VF-2	38
Figura 24. Ejemplo de un diseño básico en Solidworks	40
Figura 25. Intención de diseño o croquizado	40
Figura 26. Ejemplo de pieza en Mastercam X3	44
Figura 27. Programa de manejo de puerto serie. a) Panel Frontal. b) Diagrama de bloques	48
Figura 28. Ejemplo de maquinado con fresadora CNC usando un eje coordinado	50
Figura 29. Sierra eléctrica	50
Figura 30. Ejemplo de maquinado en 2 dimensiones en fresadora CNC, maquinado de contornos y cavidades	51
Figura 31. Maquinado en torno (2 dimensiones)	51
Figura 32. Maquinado de superficies en Mastercam X3	52
Figura 33. Ejemplo de pieza creada con 4 ejes simultáneos	53
Figura 34. Relación entre la Distancia Focal, FOV, Tamaño del Sensor y Distancia de Trabajo	57
Figura 35. Ejemplo de una pieza a inspeccionar	64
Figura 36. Imagen binaria resultado de la conversión de la Figura 40 a su equivalente en escala de grises	69
Figura 37. Ejemplo de la localización de un borde horizontal	70
Figura 38. Ejemplo de localización de un borde circular	71
Figura 39. Ejemplo de una sujeción horizontal	72
Figura 40. Procesos convencionales de CAD-CAM.	73
Figura 41. a) Primera prueba de maquinado con el cuarto eje. b) Segunda prueba de maquinado con el cuarto eje.	74
Figura 42. a) Proceso de Maquinado de la primera prueba. b) Proceso de Maquinado con sujeción de la segunda prueba	75
Figura 43. Prueba de la interfaz RS-232 a través de Labview.	76
Figura 44. Programa convertidor de código de 5 ejes a 4 ejes.	77

Figura 45. Método 1 para la sincronización del quinto eje.	79
Figura 46. Método 2 para la sincronización del quinto eje	79
Figura 47. Método 3 para la sincronización del quinto eje	80
Figura 48. Interfaz Humano-Máquina Propuesta para la Integración de los Ejes Rotativos	81
Figura 49. Datos Recibidos y Simulados	88
Figura 50. Simulación de Código Original de 5 ejes	89
Figura 51. Cable USB a RS-232	92
Figura 52. Cable DB-25 a DB-9 para RS-232	92
Figura 53. Cable DB-9 para RS-232	93
Figura 54. Programa en Labview 2009 para el control y monitoreo de servomotores	94
Figura 55. Programa en Labview 2009 para medición de ángulos	95
Figura 56. Desplazamientos deseados en los Ejes A y B.	96
Figura 57. Gráfica del ángulo deseado en azul contra el ángulo medido en rojo de los Ejes A y B.	96
Figura 58. Pieza de trayectorias multiejes	97
Figura 59. Código multiejes obtenido del proceso CAM	98
Figura 60. Convertidor de código desarrollado en Labview	99
Figura 61. Módulo para servomotores el cual cuenta con dos servomotores y una cámara web	100
Figura 62. Programa de procesamiento de imágenes que mide los desplazamientos en los Ejes A y B	100
Figura 63. Desplazamiento en los ejes deseados vs medidos por visión por computadora	101

Índice de Tablas

	Página
Tabla 1. Significado de algunos comandos del ISO 6983	25
Tabla 2. Clasificación de las fresadoras verticales HAAS de 3 ejes	30
Tabla 3. Sensores típicos de cámara y sus resoluciones	57
Tabla 4. Tipos de filtros espaciales	62

Resumen

Durante el desarrollo de este trabajo, se propone implementar una nueva metodología con la cual sea posible adecuar tecnología reciente a una máquina CNC que ya no cuenta con partes comerciales disponibles, por lo que al aplicar algún método propuesto por el fabricante no sería efectivo. Dicha metodología fue evaluada con la emulación de servomotores que equivalen al cuarto y quinto eje respectivamente.

Los movimientos de los servomotores serán analizados mediante simulación de trayectorias con software Backplot Editor y la medición de desplazamientos usando visión por computadora. Esta última técnica permite medir desplazamiento angulares sin alterar los mecanismos ya existentes en los servomotores.

Abstract

During the development of this paper work, we propose the implementation of a new methodology for using current technology to a CNC mill machine which is not able to find serviceable parts in the market. This methodology was evaluated by the emulations of two servomotors which will be equivalent to the fourth and fifth axis respectively.

The displacements of the servomotors will be analyzed by trajectory simulation with the Back Plot Editor software and we will also measure displacements using machine vision. This technique will allow to measure angular displacements without altering the servomotors kinematics.

Agradecimientos

Primeramente, deseo agradecer a Dios por las bendiciones otorgadas, por brindarme la oportunidad de ser padre y por contar con una familia que siempre me ha apoyado. En especial a mi amada esposa C. Teresa Abigail Gómez Cervantes, que siempre ha estado a mi lado en las buenas y en las malas. También agradezco la oportunidad de beca otorgada por parte SPSU (Sindicato de Profesores de Superación Universitaria) que sin ella no hubiese podido culminar mis estudios doctorales. Por otra parte, agradezco la beca manutención PROMEP (ahora llamado PRODEP) otorgada en el 2012 para solventar los gastos familiares, transporte y de vivienda, gracias a esta beca pude acondicionar mi casa (de recién casado) para hacerla habitable sobre todo en los meses calurosos de la ciudad Mexicali en verano.

Por último y no menos importante agradezco a mi primer director tesis el Dr. Víctor Nuño Moreno por su apoyo incondicional y por su constante orientación en el transcurso del Doctorado, aprovecho también para agradecer a mi nuevo director de tesis el Dr. Álvaro González Ángeles que también me estuvo apoyando en mi formación y debido a su valiosa colaboración pude publicar mi primer artículo en revista internacional. Un saludo a los miembros del comité restantes que me permitieron continuar con mi trámite de obtención de grado.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

A manera de concepto se tiene que el Control Numérico es la operación de una máquina herramienta por medio de una serie de instrucciones codificadas formadas esencialmente por números, letras del alfabeto y símbolos que la unidad de control puede entender [1]. Estas instrucciones son convertidas en señales eléctricas que permiten a los actuadores y elementos de control realizar operaciones de maquinado sobre una pieza de trabajo.

Una forma de Control Numérico fue utilizada en 1725 en la época de la revolución industrial, cuando las máquinas de tejer en Inglaterra usaban unas tarjetas perforadas para imprimir varios patrones en la tela. En 1863, el primer piano que se tocaba solo fue patentado; usaba una serie de rollos de papeles perforados, que permitían el paso del aire para controlar el orden de las teclas que serían tocadas automáticamente.

El principio de producción en masa, desarrollado por Eli Whitney, cambió muchas de las operaciones y funciones que normalmente eran elaboradas por artesanos expertos a su elaboración por medio de máquinas herramientas. A medida que mejores y más precisas máquinas herramientas iban saliendo, el sistema de manufactura intercambiable estaba siendo aceptado con mayor rapidez por la industria con el fin de producir piezas idénticas en grandes cantidades.

Un poco atrás de la década de los 50's existían dos métodos de producción en la industria de transformación: *Producción a medio volumen*, la cual era soportada por procesos de dos máquinas de operación manual y con velocidades de producción muy bajas, pero con capacidad de fabricar diversos productos, y la *Producción a Alto Volumen*, realizada en líneas automatizadas, y debido a esto únicamente se podía fabricar un solo producto a altas velocidades. La desventaja de esta última, es que las máquinas eran costosas, debido a que el equipo se diseñaba a la medida del lote de producción a fabricar,

su compra se justificaba solamente si los volúmenes de producción eran lo suficientemente altos para solventar la inversión.

Desde la segunda guerra mundial la demanda en variedad de productos transforma el desarrollo tecnológico y los procesos de competencia internacional, lo que permitió que aparecieran nuevos productos con mayor frecuencia. Un producto no podía estar en el mercado por mucho tiempo, si no ofrecía cambios en su diseño. La mayor parte de los cambios no eran posibles de fabricarse en las rígidas líneas de producción automatizada, debido a que estos sólo permitían cambios mínimos en su diseño y los operadores que usaban máquinas manuales no contaban con la experiencia necesaria para hacer estos cambios de diseño.

Las máquinas automatizadas de producción se caracterizaban por tener procesos controlados por sistemas hidráulicos, neumáticos y electromecánicos los cuales presentaban gran dificultad para hacer modificaciones, debido al uso de levas o interruptores de fin de carrera para realizar un proceso secuenciado de operaciones sobre la máquina, y cualquier cambio en el diseño de la pieza requería un cambio en estos elementos, de tal manera que fueron muchos los casos en una máquina automatizada en la cual no podía ser usada para fabricar una pieza rediseñada.

Después de la segunda guerra mundial, la demanda de productos nuevos fue aún mayor, se ocupaba más variedad en productos, componentes y subensambles en una diversidad de formas y diseños cada vez más complicados, por lo que esto dificultó aún más los procesos automatizados de corte. Se necesitaba un nuevo sistema de control que pudiera procesar señales a alta velocidad para mantener de forma continua y simultánea la herramienta de corte en movimiento y con un alto grado exactitud.

Con lo anterior se vio la necesidad de crear el Control Numérico, para cumplir con las altas demandas de productos, la variedad de formas y tamaños cada vez más complejos.

El Control Numérico de las máquinas herramienta fue concebido para dar solución a problemas técnicos surgidos por el diseño de piezas cada vez más difíciles de manejar. En 1942, la compañía Bendix en Estados Unidos de América, tuvo problemas de fabricación con una leva tridimensional para el regulador de una bomba de inyección para motores de avión como el de la Figura 1.

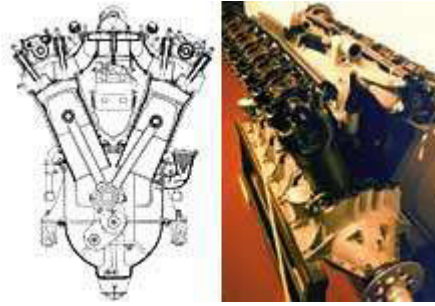


Figura 1. Motor V-12 de un avión Liberty.

El perfil especial de la leva antes mencionada era prácticamente imposible de realizar con máquinas herramientas convencionales; la dificultad venía de combinar los movimientos de la herramienta simultáneamente a lo largo de varios ejes de coordenadas. Debido a lo anterior se acordó entonces en confiar los cálculos a una máquina automática que definiera un gran número de puntos de las trayectorias.

En 1944, John T. Parsons [2], constructor americano de hélices de helicóptero, concibe un mando automático con entrada de información numérica, la idea fue utilizar tarjetas perforadas en un lector que permitiera traducir las señales de mando a los ejes cartesianos (plano xy), lo cual permitió a Parsons desarrollar su sistema digital.

Con el apoyo de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América (USAF por sus siglas en inglés), Parsons junto con el laboratorio de servomecanismos del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés), desarrollo un nuevo sistema con algunas variantes (Figura 2).

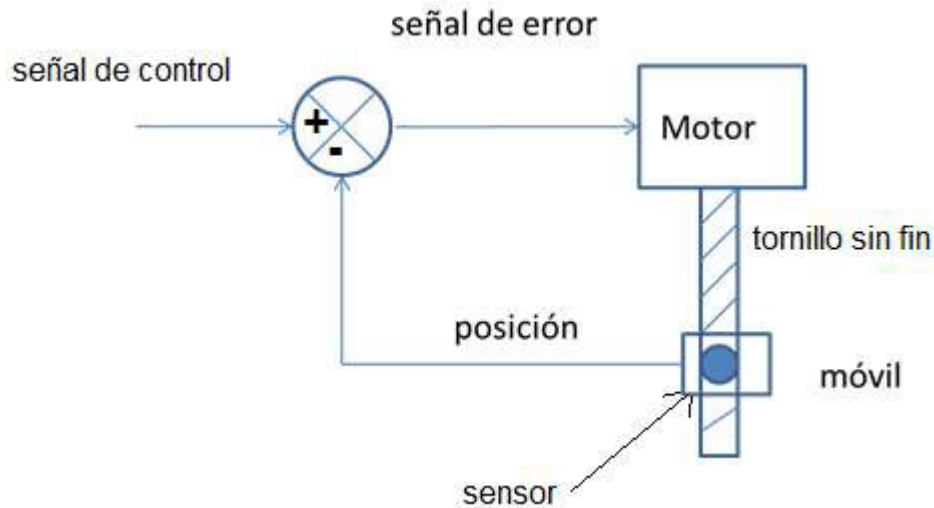


Figura 2. Sistema desarrollado por Parsons con el apoyo del MIT.

Posteriormente en 1951 el MIT se hizo cargo del proyecto totalmente y en 1952 se construyó la primera máquina de maquinado vertical con movimiento simultáneo en 3 ejes, esta fue controlada por un nuevo tipo de controlador, la Cincinnati-Hidrotel Milling Machine, fue un híbrido análogo digital el cual usaba una cinta perforada en código binario usada como medio de almacenamiento del programa de maquinado.

En base a los trabajos anteriores, en 1953 se utiliza por primera vez el nombre NC (Numerical Control); con la evolución de los microprocesadores, el control numérico se desarrolló con mayor rapidez mediante el uso de la computadora. En la actualidad se usa una lógica por software, en donde las acciones de control son llevadas a cabo por medio la computadora a esto se le llama Control Numérico Computarizado (CNC).

Con el surgimiento del CNC, se promovió la transferencia de tecnología a la industria, sin embargo, no se logró el éxito deseado, dada la necesidad de contar con equipo de ingenieros y técnicos preparados en electrónica, control digital y procesos de fabricación con la nueva tecnología. Otra consideración era el alto costo del equipo.

Por tal motivo en la mayoría de las grandes empresas de la actualidad existe personal calificado en materia de máquinas CNC, esta demanda sigue aumentando, de ahí la importancia de la formación en escuelas y empresas de personal con certificados en:

- Técnicos en Procesos Industriales
- Técnicos en Máquinas Herramienta
- Diseñadores en CAD/CAM
- Técnicos en Producción.

Las especialidades anteriores se apoyan con la tecnología del Control Numérico Computarizado, por tal motivo, por ejemplo, para la carrera de Técnico en Procesos Industriales sus laboratorios deben estar equipados con los siguientes programas y máquinas:

- Software de Diseño Asistido por Computadora (como Solidworks, NX 7.5 o superior y/o CATIA).
- Software de Manufactura Asistida por Computadora (como Mastercam, NX 7.5 o superior y/o CATIA).
- Tornos y fresadoras didácticas de Control Numérico Computarizado.
- Centro de Torneado de Control Numérico Computarizado.
- Centro de Maquinado (Fresadora) de Control Numérico Computarizado.
- Máquinas Herramientas Convencionales.

Para resolver la situación que se tenía de la transferencia de tecnología en la década de los 50's la USAF decidió patrocinar la construcción de 100 máquinas de Control Numérico, para fabricar partes de aviones por 60 millones de dólares. Los contratos fueron ganados por 4 fabricantes de máquinas herramienta: Kearney and Tracker (Bendix), Giddins and Lewis (GE), Morey (General Dynamic) y EMI (Cincinnati).

Las máquinas construidas por estos fabricantes se vendieron entre 1958 y 1960 a varias compañías de la industria de la aviación, estos usuarios requirieron de todo un

proceso de capacitación, lamentablemente no se logró la transferencia de tecnología y el resultado fue de varias máquinas dañadas, ante este fracaso los usuarios discontinuaron el uso de estas máquinas. A pesar de esto la USAF insistió en la promoción de esta tecnología.

Los problemas de la transferencia de tecnología se fueron resolviendo gradualmente, mejorando y simplificando el sistema de control, impartiendo cursos de programación, se formaron técnicos en mantenimiento y finalmente se logró un adecuado dominio de la técnica por los usuarios finales entre 1961 y 1962, con esto último se pudo convencer de las ventajas de esta tecnología a las compañías del sector aeroespacial las cuales compraron las nuevas máquinas CNC.

En el año 1960 en [2] indicaba que en la Exhibición Machina Tool Show en Chicago se mostraron 100 máquinas CNC, la mayoría solamente tenían procesos de corte punto a punto y costos menores de \$50,000 dólares y en 1962 ya se podían obtener máquinas barrenadoras con una resolución en su movimiento de ubicación en coordenadas de ± 1 milésima de pulgada con precios inferiores a los \$10,000 dólares.

Las máquinas herramienta convencionales han sido un factor importante para la producción de piezas en serie, en este marco de referencia, la aparición de las máquinas herramienta con control numérico tiene una estrecha relación con las que se indican a continuación:

Torno Paralelo Horizontal. Es una de las máquinas herramientas más antiguas para la fabricación de piezas en la industria metalmecánica, con el cual es posible crear aún en la actualidad piezas redondas, dentados y piezas que combinen ambas características. Estas máquinas herramienta operan haciendo girar la pieza a fabricar que está sujeta en el cabezal, mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, removiendo el excedente de material acorde a las condiciones de fabricación adecuadas. En la Figura 3 se muestra un ejemplo.



Figura 3. Torno Paralelo Horizontal

Torno Revolver. Este es un torno de mediana producción que se emplea para realizar cualquier número de partes similares, es decir en las que sea posible el trabajo simultáneo de varias herramientas con el fin de disminuir el tiempo de fabricación. Las piezas que presentan esta condición son aquellas que, partiendo de barras, tienen una forma final de casquillo o similar. Una vez que la barra queda bien sujeta mediante pinzas o con un plato de garras, se va taladrando, mandrilando, roscando o escariando la parte interior y a la vez se puede ir cilindrando, refrendando, ranurando, roscando o cortando con herramientas de torneado exterior. Este torno lleva un carro con una torreta giratoria en las que se insertan las diferentes herramientas que realizan en el proceso de fabricación de la pieza. Un ejemplo de este torno se encuentra en la Figura 4.



Figura 4. Torno Revolver

Torno Copiador. Este tipo de torno opera con un dispositivo hidráulico y electrónico (ver Figura 5) que permite el maquinado de piezas de acuerdo a las características de la misma siguiendo el perfil de una plantilla que reproduce una pieza igual a la guía. Los tornos copiadores se utilizan para el maquinado de aquellas piezas que tienen diferentes escalones de diámetros, que han sido previamente forjadas o fundidas y que tienen poco material excedente. También son utilizados en el trabajo de la madera y del mármol artístico para dar forma a columnas con fines artesanales o arquitectónicos.



Figura 5. Torno Copiador

Torno Automático. A este tipo de torno se le llama torno automático ya que su proceso de trabajo está completamente automatizado. La alimentación del material para cada pieza se hace de forma automática, a partir de una barra larga que se inserta en un tubo que cuenta con un cabezal y se sujeta mediante pinzas de sujeción hidráulica. Estos tornos pueden ser de uno o varios husillos; los de un husillo se emplean para el fabricado de piezas pequeñas que se requieren en grandes lotes de producción. Cuando se trata de fabricar piezas de dimensiones mayores se utilizan los tornos automáticos multihusillos donde en forma programada cada husillo realiza su parte del proceso de fabricación de la pieza. En la Figura 6 se muestra un ejemplo.



Figura 6. Torno Automático

Torno Vertical. Es otro tipo de torno, donde el eje de movimiento se mueve en forma vertical, es comúnmente utilizado para fabricar piezas de gran tamaño, que están sujetas a una base por varios sujetadores, dichas piezas por su peso no es posible colocarlas en forma horizontal para ser fabricadas por los tornos anteriormente mencionados. Un ejemplo de este torno es mostrado en la Figura 7.



Figura 7. Torno Vertical

Posteriormente surgieron los tornos y fresadoras CNC con la finalidad de tener mayores volúmenes de producción y maquinar piezas aún más complejas.

En una máquina CNC, como se mencionó anteriormente la computadora controla la posición y la velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Debido a esto es posible realizar movimientos como círculos en fresadoras manuales, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales como es el caso de los moldes de inyección de plástico y troqueles.

Debido a que el CNC utiliza una computadora principal, es posible revisar, modificar y/o actualizar programas de piezas en cualquier momento, con el propósito de hacer más eficientes las trayectorias y agregar operaciones adicionales sobre una pieza.

En la actualidad las computadoras son cada vez más pequeñas y económicas, con lo que el uso de CNC se ha extendido a todo tipo de maquinaria como: tornos, rectificadoras, electroerosionadoras, máquinas de coser, entre otras. Por ejemplo, en tornos CNC es posible ahora desplegar menús con opciones y gráficos avanzados, lo que hace más fácil la programación.

Una de las técnicas de hoy en día es el uso de simuladores que permiten a una persona visualizar y analizar las operaciones de una máquina herramienta. Algunos simuladores son tan avanzados que nos permite ver un modelo virtual de nuestra máquina herramienta lo que permite observar el proceso de remoción de material. Lo anterior permite mejorar la calidad de los programas CNC, a su vez permite eliminar colisiones del herramental y de la máquina debido a errores en la programación, con el objetivo de generar procesos de maquinado eficientes que maximicen la productividad de la máquina herramienta en cuestión.

Las ventajas de la simulación de máquinas herramienta CNC son:

- *Modelado Rápido.* Aditamentos, cambiadores de herramientas, fixturas, entre otros elementos, pueden ser agregados para visualizar en forma virtual un proceso de maquinado lo más apegado a la realidad como sea posible.
- *Entrenamiento.* Nuevos operadores de máquinas herramientas CNC pueden ser entrenados sin el riesgo de dañar el herramental o la máquina en cuestión.
- *Información de Proceso.* Remoción de material y datos de maquinado pueden ser continuamente monitoreados.
- *Detección de Colisiones.* La simulación de sistemas CNC puede detectar en forma automática cuando se produzca una colisión, puede detener el proceso o hacer una señalización que indique en que parte del proceso se produjo una colisión.
- *Revisiones de Ingeniería.* Ingenieros en Manufactura y programadores pueden evaluar el controlador de la máquina y el proceso de maquinado sin la necesidad de quitarle tiempo valioso de operación a la máquina y/o evitar dañarla al hacer alguna prueba de algún producto nuevo.

El desarrollo industrial de Baja California ha orientado sus esfuerzos a la creación de clústeres industriales que ofrecen la posibilidad de crear empleos para recurso humano altamente especializado. De esta manera, se han propuesto la formación de clústeres, entre ellos la industria metalmecánica, aeroespacial, automotriz, electrónica especializada y en la

etapa embrionaria el de bioingeniería, entre otros [3]. Para apoyar la competitividad industrial, es necesaria la formación de recursos humanos de alto nivel, enfocándolos hacia la creación y desarrollo de tecnología de manufactura automatizada.

A nivel nacional también se observa una tendencia similar de crecimiento en los clústeres antes mencionados, ejemplo de lo anterior es que es la creación de la Agencia Espacial Mexicana (AEXA, actualmente lleva las siglas de AEM) en julio del 2005 [4].

Este tipo de tecnología se ha utilizado para la fabricación de piezas y componentes mecánicos complejos, los cuales se han basado fundamentalmente en los sistemas CNC (Control Numérico Computarizado) [5]. Para esto, se necesita disponer de sistemas que puedan trabajar con varios ejes de maquinado o multiejes.

A nivel internacional una gama de aplicaciones en la industria militar, aeronáutica y área aeroespacial, los sistemas multiejes se convierten día con día en la forma óptima para manufacturar geometrías complejas [6]. Por otro lado, investigadores han desarrollado nuevos algoritmos de maquinados de 5 ejes con el propósito de producir de manera eficiente superficies complejas como es el caso de [7] y [8]. Con lo anterior se hace evidente que hay una tendencia en la actualidad hacia los maquinados y superficies complejas.

Para que exista un efectivo sistema multiejes, los subsistemas (servomotores de los ejes adicionales) deben de estar adecuadamente sincronizados para lograr establecer maquinados complejos de una manera satisfactoria. Las comunicaciones en tiempo real de un canal de tráfico ordinario deben ser controladas y los retardos de transmisión deben de mantenerse en un nivel aceptable. A nivel de control de movimientos, el retardo de transmisión es un parámetro importante y es frecuentemente usado para definir si el estado de transmisión de datos satisface los requisitos de comunicación en tiempo real o no [9].

A su vez los sistemas deben ser lo suficientemente flexibles para que estos puedan ser capaces de operar de una manera sincronizada en su totalidad de elementos. Hoy en día

se demandan Sistemas de Control y Monitoreo (CMS por sus siglas inglés) o Interfaces Humano-Máquina (HMI por sus siglas inglés) que puedan monitorear y controlar procesos de manufactura en tiempo real tal es el caso de [10] en el cual se propone un CMS que se basa en una arquitectura abierta llamada CORBA (Common Object Request Broker Architecture), la cual funciona por medio de sistemas cliente-servidor que permite extraer beneficios combinados del control orientado a objetos y el computo distribuido.

Los sistemas tradicionales de CNC, están frecuentemente basados en un control centralizado y en muchas ocasiones este no es capaz de cumplir los requerimientos de trabajo a altas velocidades, precisión, y con rápida ejecución para ser adecuados en los nuevos sistemas de producción [11]. Por lo que es necesario establecer protocolos de comunicación adecuados y las respectivas interfaces para poder lograr adaptación de nuevos sistemas. También se observa una tendencia hacia la migración hacia el nuevo estándar que viene a sustituir el tradicional código G M, este es el STEP-NC [12].

El diseño de sistemas de manufactura eficientes requiere un desarrollo modular, intercambiable, independiente del hardware y una arquitectura CNC reconfigurable [13]. Por lo que es posible hacer la migración de 3 a 5 ejes al intercambiar la cinemática dependiente en las funciones de interpolación. Dicho de otra manera, es posible crear movimientos sincronizados a través de micro-desplazamientos de ejes individuales, que al final y en la suma de todos los movimientos estos parezcan como si fueran continuos.

En los años recientes debido a la alta productividad y precisión, se determina que la tecnología de 5 ejes genera varias mejoras que pueden remplazar a los maquinados de 3 ejes con el objeto de manufacturar superficies complejas. Sin embargo, los maquinados con superficies complejas están todavía en la fase inicial [8], es decir aun esta tecnología no está disponible con lo que respecta al dominio público, eso incluye empresas a nivel nacional e internacional. También existe una tendencia clara hacia la adecuación de nueva tecnología para mejorar sistemas CNC ya existentes, dicho en otras palabras, se usa el “retrofit” en máquinas herramientas convencionales como en [14].

Expertos e investigadores han desarrollado muchos estudios respecto a la generación de operaciones con herramientas (tool path), con lo cual han determinado movimientos de herramientas eficientes, estrategias para posicionamiento de cortadores y para eliminar ciertos problemas de interferencia como es el caso de [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24], incluso hay investigadores que han aprovechado las bondades y las altas velocidades de las tasas de muestreo para tomar acciones de control sobre ciertos sistemas CNC limitados por hardware como el de [25]. Hasta la fecha se han encontrado muy pocos trabajos que mencionen migraciones de 3 a 5 ejes.

Sin embargo, existen empresas que dedican a hacer adecuaciones de tecnología para adecuar funciones nuevas a máquinas CNC de modelos viejos u obsoletos, con lo que es posible que los usuarios de este tipo de máquinas ahorren en la compra de una máquina nueva que tiene un alto costo de capital. De estas empresas destacan Fanuc Robotics tal y como se describe en [26] como empresas que operan en México.

En este trabajo, se presenta un proyecto de integración que propone un sistema combinado de cuarto y quinto eje para una máquina fresadora vertical, la que fue construida originalmente con tres ejes CNC.

1.2 Justificación

La importancia de este proyecto radica en que se obtendrán nuevos conocimientos correspondientes a procedimientos y metodologías para la integración de sistemas multiejes en máquinas CNC, con lo cual se puede tener la posibilidad de fabricar piezas complejas, usando materiales avanzados, para ser utilizadas por la industria aeroespacial, biomédica, automotriz, entre otras.

Con lo que al integrar un cuarto y quinto eje se pueden realizar maquinados multilaterales con el giro del cabezal con el cortador sobre la pieza, esto permite una mayor accesibilidad a las áreas difíciles de alcanzar con máquinas herramientas convencionales.

Cabe mencionar que en este trabajo se llegará a nivel emulación usando entradas y salidas digitales de máquinas CNC y servomotores.

Una pieza a maquinar con tres ejes permite pocas modificaciones, las cuales normalmente se hacen de forma manual con la experiencia de un operador técnicamente capacitado, pero con cinco ejes los ángulos de ajuste se pueden definir desde el software de aplicación para ser configurados de la manera que se requiere conseguir, con un mejor acabado de superficies, así como conseguir un mínimo error en la geometría de la pieza en cuestión.

Con lo anterior también se obtendrá conocimiento acerca del sistema de control en lazo abierto, para la sincronización de los ejes x, y, z ya existentes con los ejes rotativos cuarto y quinto.

Otro impacto que se contempla que tendrá este trabajo de tesis, es que fortalecerá a los nuevos programas académicos a nivel licenciatura y posgrado con la generación de conocimiento en temas de manufactura avanzada, ya que se podrán proporcionar las bases para habilitar métodos y sistemas de fabricación en laboratorios de maquinados complejos, los cuales requieran la adición de los ejes rotativos antes mencionados. Sin mencionar que se describe una metodología que permite adecuar sistemas simplificados CNC a bajo costo y hechos a la medida de la aplicación deseada.

1.3 Máquinas de Control Numérico por Computadora

El propósito principal por el cual fueron creadas las máquinas CNC es manufacturar piezas con geometrías complejas de una forma precisa. Así fue como primeramente el controlador numérico fue adaptado a las máquinas fresadoras y máquinas rectificadoras. Sin embargo, recientemente ha sido necesario aplicar sistemas CNC con el propósito de incrementar la productividad y los tipos de máquinas CNC ha variado hasta incluir máquinas de torno, centros de maquinado, máquinas de barrenados y roscados. Particularmente, la aplicación de los sistemas CNC se ha extendido a máquinas-

herramientas no convencionales, como las máquinas cortadoras por hilo de electroerosión y las máquinas cortadoras por láser como adición a las máquinas convencionales de corte de metales [5].

Como se sabe, el éxito de las máquinas de control numérico dependió de dos elementos: la mejora del controlador electrónico y la programación. El controlador necesita para fabricar una pieza una serie de instrucciones, las cuales se encuentran en un programa que indica paso por paso los procesos de fabricación que se van a realizar sobre la pieza. Este programa requiere estar escrito en un código y después ser almacenado o grabado en un medio, para ser transmitido al controlador a través de un lector. Los primeros lectores fueron de cintas perforadas y la información contenida en esta se transfería a la memoria del controlador por medio de un lector óptico.

Ante la complejidad cada vez más grande en los diseños de las piezas, es requerido un sistema de cómputo con mucha más capacidad en memoria, fue así como surgieron protocolos de comunicación entre computadoras y el controlador al grado de que actualmente se puede estar enviando el código de un programa muy extenso a través del puerto RS-232, y este simultáneamente se estará ejecutando con la fabricación de la pieza. A este procedimiento se le conoce como Control Numérico Directo (DNC por sus siglas en inglés). El concepto nació en 1955 cuando el MIT logró integrar la computadora Whirwind a una máquina CNC [5].

El desarrollo de la tecnología computacional transformó, abarató y a la vez hizo más confiable el controlador electrónico de las máquinas de control numérico. En la actualidad el almacenamiento se hace con memorias de semiconductor, que tienen mucha mayor capacidad que las tarjetas perforadas de los años 50s y 60s, hoy en día es posible también transferir programas vía puerto USB.

Las máquinas de tipo fresadora, son las que generalmente la herramienta se mueve en el eje Z y una bancada mueve la pieza de trabajo en el plano XY. A estas se les integraron las rutinas en memoria de semiconductor a través del controlador CN, lo cual

permitió un incremento en la capacidad para realizar varias operaciones secuenciales diferentes, que anteriormente se realizaban en máquinas separadas. A estas máquinas con operaciones integradas se les llamó Centros de Maquinado Vertical.

Más adelante se instalaron subrutinas preprogramadas llamadas ciclos enlatados, los cuales tienen la característica de realizar barrenos o cilindros en forma de lata. Estas rutinas fueron grabadas en la memoria de semiconductor, ofreciendo la oportunidad de ejecución de un programa desde la memoria, lo cual presenta ventajas de edición y a la vez disminuye errores por lectura de las cintas perforadas.

Cabe mencionar que en la actualidad se pueden realizar todo tipo barrenos y roscados con hasta 12 ciclos preprogramados. Como elementos externos que se pueden agregar a estos centros de maquinado tenemos sistemas de carga y descarga automatizados para el manejo de las piezas tanto en forma de materia prima como de producto terminado. Lo anterior es posible con el uso de las entradas y salidas digitales de las máquinas CNC. Los sistemas de carga y descarga requieren trabajo de automatización para ser integrados.

El control numérico por computadora (CNC) ha traído cambios notables a la industria de las máquinas-herramienta [27]. Este tipo de máquinas han permitido que la industria produzca piezas a una velocidad y con una precisión que en tiempos pasados fuera difícil de lograr. Cuando el programa de la pieza se elabora de la forma correcta, se puede reproducir una misma pieza cualquier cantidad de veces con la misma exactitud. Otra característica es que los comandos de control son ejecutados con una velocidad, exactitud, eficiencia y confiabilidad elevada. Debido a esto, en la mayoría de los casos las máquinas-herramienta de usos comunes y operados a mano, están siendo reemplazadas por las máquinas del tipo CNC.

También la automatización industrial ha progresado, la tecnología de máquinas CNC ha evolucionado para permitir la construcción de la Automatización Flexible (FA por sus siglas en inglés) o Sistemas de Manufactura Flexibles (FMS por sus siglas en inglés). Lo anterior es posible a través de la interconexión de equipos de producción como robots,

Vehículos Guiados Automáticamente (AGV por sus siglas en inglés), casetas automatizadas y computadoras [27].

Los sistemas CNC no solo han sido utilizados como máquinas-herramientas sino también para otros procesos que requieren movimientos controlados por servo-sistemas, tales como: máquinas cortadoras, máquinas para dibujo, máquinas para corte de madera, máquinas de medición por coordenadas (CMM), entre otras.

El flujo de tareas requeridas para producir piezas en una máquina CNC se puede clasificar en tres tipos:

1. Tareas fuera de línea (Offline Tasks): Tales como el Diseño Asistido por Computadora (CAD), Planeación de Procesos Asistido por Computadora y la Manufactura Asistida por Computadora (CAM).
2. Tareas en línea (Online Tasks): Maquinados CNC, monitoreo y medición en lugar de las operaciones.
3. Tareas posteriores (Post-line tasks): Inspección Asistida por Computadora (CAI) y post operaciones.

Las máquinas CNC pueden ser clasificadas como: “Máquinas Cortadoras” y “Máquinas No-Cortadoras” [5]. Una máquina cortadora es un tipo de máquina que realiza un proceso de eliminación de material para fabricar una pieza. Ejemplos de estos tenemos máquinas fresadoras, máquinas de torno y máquinas EDM (Electroerosión), ya sea por láser o por hilo. Las máquinas no cortadoras cambian la forma de los materiales por medio de la aplicación de fuerzas, las prensas son buenos ejemplos de este tipo de máquinas.

En este documento nos enfocaremos a las máquinas cortadoras. Un centro de torneado CNC, el cual se muestra en la Figura 8, es capaz de maquinar piezas redondas en cuestión de unos pocos minutos, lo que en forma manual tomaría unas horas en producir. El torno CNC está diseñado para maquinar piezas en un mandril o en algún otro medio de sujeción y manejo.



Figura 8. Centro de Torneado CNC.

Un centro de maquinado vertical CNC, el cual se muestra en la Figura 9, es capaz de llevar a cabo una gran variedad de operaciones sobre la pieza de trabajo cambiando sus propias herramientas de corte. Existen dos tipos de centros de maquinado, el vertical y el horizontal. El centro de maquinado vertical, cuyo husillo está en posición vertical, es utilizado principalmente para piezas planas donde se requiere un maquinado de tres ejes. El centro de maquinado horizontal cuenta con el husillo en la posición horizontal, permite que las piezas sean trabajadas en cualquier lado en una disposición, siempre que la máquina esté equipada con una mesa orientable. En la actualidad se cuenta con centros de maquinado vertical de 5 ejes y máquinas con husillos tanto verticales como horizontales, con el solo objetivo de poder realizar maquinados de superficies complejas como lo son álabes de una turbina, trabajando en cualquier lado y a un determinado ángulo. Esto se logra en los centros de maquinado verticales de 5 ejes con mucha rapidez.



Figura 9. Máquina fresadora CNC.

Otro tipo de Centro de Maquinado son las máquinas por electroerosión (EDM por sus siglas en inglés), las cuales utilizan un proceso de erosión por chispa controlada entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo para eliminar metal [27]. Las dos máquinas EDM más comunes son: la de corte por hilo metálico y la de tipo ariete vertical. La EDM de corte por hilo metálico utiliza un alambre móvil para cortar los bordes internos y externos de una pieza. La EDM vertical del tipo ariete, comúnmente conocida como la máquina de penetración de dados, se utiliza con una herramienta formadora para reproducir un contorno.

El maquinado por electroerosión, el maquinado electroquímico, el rectificado electrolítico, el maquinado vertical de 5 ejes y el maquinado láser como en el caso de [6], han hecho posible manufacturar piezas con materiales modernos y producir formas más complejas.

La ejecución de los procesos de corte y las rutinas de posicionamiento juegan un papel muy importante en el controlador electrónico. Los movimientos principales de la herramienta y la mesa de trabajo se realizan a través de tres tipos de control: movimiento de punto a punto, movimiento para cortes rectos y movimiento para cortes en contorno. Para realizar estos movimientos se utilizan mecanismos rotacionales precisos y mensurables

como son los servomotores. La unión del servomecanismo con el servomotor genera un dispositivo controlado por señales eléctricas, para el cual se monitorean simultáneamente los movimientos y distancias recorridas, este conjunto recibe instrucciones por medio de un comparador lógico y un amplificador.

El matemático francés Rene Descartes creo el Sistema de Coordenadas Cartesiano (conocido también como Sistema de Coordenadas Rectangulares). Con este sistema, cualquier punto en específico puede ser descrito matemáticamente en términos de cualquier otro punto a lo largo de tres ejes perpendiculares [1].

Este concepto encaja perfectamente en las máquinas herramienta, debido a que su construcción es basada en tres ejes de movimiento (X, Y, Z) más ejes rotacionales en sistemas multiejes. En una fresadora vertical sencilla, el eje X representa el movimiento horizontal de la bancada (mesa XY), el eje Y representa el movimiento cruzado de acercamiento o de distanciamiento de la columna y el eje Z representa el movimiento vertical del husillo. Los sistemas CNC utilizan el Sistema de Coordenadas Rectangulares para permitir que el usuario pueda localizar puntos de una manera precisa e independiente de cada uno.

Cuando los puntos están ubicados en una pieza de trabajo, dos líneas de intersección son utilizadas, una vertical y otra horizontal. En el punto donde estas líneas se intersectan es llamado el origen o cero de trabajo.

Podemos decir que el controlador es el cerebro que organiza, coordina, ejecuta y verifica todo el proceso de fabricación, esto permite los altos niveles de funcionalidad, flexibilidad y precisión. La función principal de una máquina CNC es posicionar la herramienta o mesa de trabajo de acuerdo a los datos contenidos en un programa previamente diseñado. Existen dos sistemas de posicionamiento por servomecanismos: servomecanismos de circuito abierto y servomecanismos de circuito cerrado. La diferencia entre uno y el otro radica en sus formas de posicionar la herramienta y la bancada ya sea verificando o no el punto de ubicación de estas.

Un ejemplo común de un sistema de circuito abierto (Figura 10) es el control que se utiliza en una máquina lavadora de ropa automática, el control activa y desactiva motores, válvulas, relevadores, solenoides, entre otros, en una secuencia rígida hasta completar todo el ciclo sin verificar que se hayan hecho los procesos relacionados con la activación o desactivación de los dispositivos de movimiento.

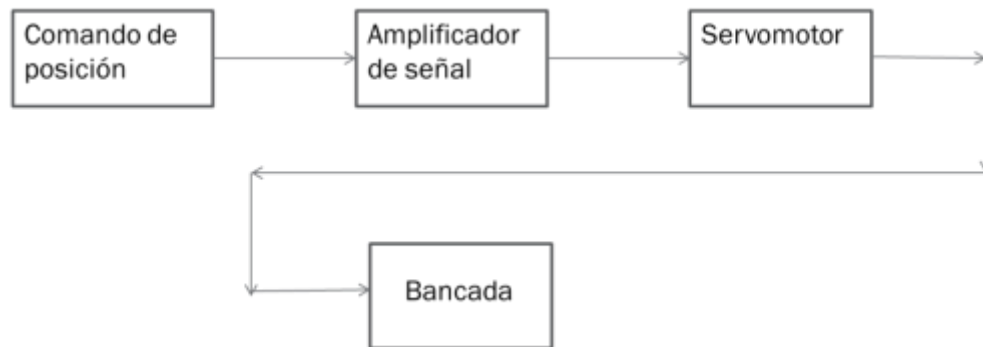


Figura 10. Diagrama de bloques de un proceso a circuito abierto

El caso de los sistemas de control de circuito cerrado (Figura 11), su diferencia radica en que al mismo tiempo en que se generan las señales o pulsos para activar o desactivar los dispositivos de movimiento (servomecanismos) se tiene la posibilidad de verificar los posicionamientos, velocidades, avances, cargas o fuerzas que se están generando en el momento del proceso, esto se realiza por medio de métodos de monitoreo, con el cual el controlador principal compara las mediciones obtenidas con las indicadas en el programa, y así se realizan ajustes en caso de ser necesarios, o bien activar señales de alarma en caso de sobrecargas o violación del sistema de seguridad.

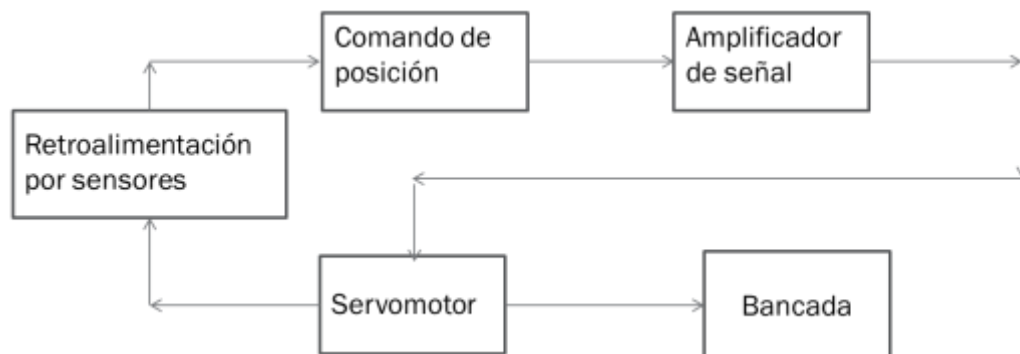


Figura 11. Diagrama de bloques de un proceso a circuito cerrado con retroalimentación indirecta

En la Figura 11 se observa un ejemplo de circuito cerrado con retroalimentación indirecta, se clasifica de esta manera debido a que la medición de la posición se hace en el actuador (servomotor) y no directamente en la herramienta o bancada en este caso. Este método puede generar errores del tipo sistemático, ya que no se toma en cuenta el mecanismo, únicamente la posición en que se encuentra el servomotor.

En el caso de la Figura 12 los errores por la medición indirecta son eliminados por medio de medir la variable de la posición directamente en la herramienta o bancada. En esta configuración es posible determinar con mayor exactitud la ubicación de la pieza a ser fabricada y el proceso que se está realizando, lo cual permite altos niveles de precisión en la escala de diezmilésimas de pulgada en la mayoría de los casos.

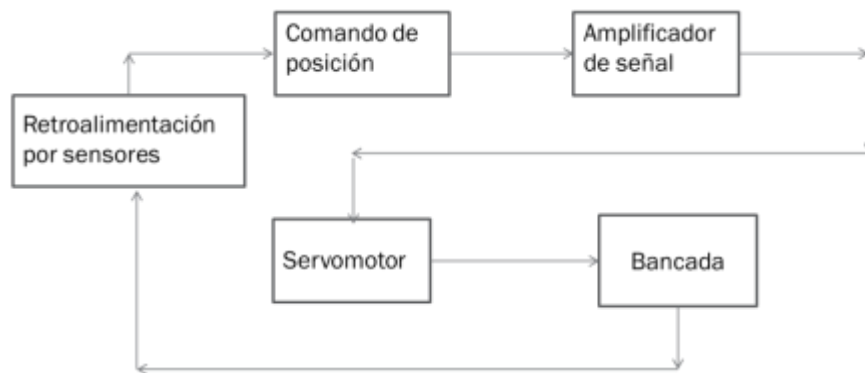


Figura 12. Diagrama de bloques de un proceso a circuito cerrado con retroalimentación directa

En la actualidad la programación en código G y M para mecanizar una pieza es una actividad común y rutinaria en la industria. Los fabricantes de las máquinas de control numérico han estado trabajando para simplificar la actividad de programación de tal forma que se han integrado muchos ciclos preprogramados que realizan procesos de forma automática principalmente en lo referente a las rutinas de barrenado, roscado y cavidades circulares, esto ha sido de gran ayuda para fabricación de piezas más complejas, pero conforme avanza la competitividad industrial surge una gran variedad de diseños y formas cada vez más complicadas, que requieren mecanizar superficies irregulares. Por ejemplo, este es el caso de la fabricación de moldes de envases que usan las inyectoras de plástico.

1.4 Maquinados Complejos con CNC

Hoy en día las máquinas de control numérico siguen evolucionando al grado de que se necesitan cada vez mayores capacidades de cómputo, que permitan controlar herramientas de corte y los mismos desplazamientos simultáneos de 3 o más ejes, con los cuales se generan superficies muy complejas en su forma o diseño. Desde el concepto de APT (acrónimo de Automatic Programmed Tool) desarrollado por el MIT en 1958 se cuidó especialmente este punto, debido a que su visión inicial se fundamentó en la fabricación de superficies irregulares y geometrías complejas para la industria de aviación. En esta concepción inicial para la generación de un programa computarizado, se identificaban cada uno de los elementos geométricos del diseño de la pieza de trabajo a través de definirlos explícitamente con variables como se indica en el siguiente ejemplo:

P1 = PUNTO/ CENTRO, CIR1 (con esta instrucción se define un punto en el centro de un círculo).

L1 = LINEA/PT1, PT2 (aquí se define una línea entre dos puntos).

C = CIRCULO/CENTRO,

P1, RADIO (de esta manera se define un círculo con centro y radio)

El formato APT no se popularizó tanto como el formato de lenguaje máquina, debido a que se requería de todo un sistema de cómputo que en los años de inicio de esta tecnología resultaban bastante caros para convertir esta información descriptiva de la geometría de la pieza en lenguaje máquina los cuales a su vez deberían ser entendidos por el controlador usando códigos binarios. Los códigos que comúnmente se usaban en estas máquinas son el EIA RS-244B (EIA es acrónimo de Electronic Industries Association) y el ASCII (acrónimo de American Standard Code Information Interchange), este último fue el más utilizado para establecer comunicación entre una computadora y el controlador para cargar y descargar programas a través de un cable conectado a un puerto serial RS-232.

Posteriormente ISO (acrónimo de International Organization of Standardization) propuso un código de uso generalizado el ISO 6983 conocido como código G (G M para algunos otros autores) y se basa en lo que a continuación se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Significado de algunos comandos del ISO 6983.

Código	Significado
G	Definición de movimiento del cortador
X, Y, Z	Coordenadas en las direcciones X, Y o Z
R	Radio de arco o círculo
F	Velocidad de corte
S	Velocidad de giro de la herramienta
T	Referencia a una herramienta específica
M	Movimiento Auxiliar de máquina

Estas letras se combinan con información numérica generando así instrucciones que definen movimientos, distancias, velocidades y también activación y desactivación de movimientos automáticos como sería un cambio de herramienta, encendido o apagado de la bomba de refrigerante.

En la actualidad es generalizado el uso de diseño gráfico por computadora en la mayoría de las empresas del sector industrial, estas utilizan los paquetes de computo CAD para hacer sus planos, diseños de piezas y productos. Esta información se graba en memoria con la facilidad de que se puede imprimir un plano o diseño tantas veces como se requiera.

Desde la creación de los lenguajes APT por el MIT en los años 50 se tenía la clara visión de integrar modelos gráficos de diseños de piezas y a partir de estos, proceder a su fabricación sin tener que realizar el programa en códigos de forma manual. Esta idea actualmente es una realidad, la integración del diseño gráfico con la manufactura automatizada se realiza a través de convertir todas las entidades geométricas (líneas, círculos, perfiles, barrenos, cavidades, roscas, etc.) contenidas en un dibujo computarizado en comandos de corte y movimiento, así como la activación de cambios automáticos de herramientas, encendido y apagado del giro de herramienta, bomba refrigerante,

compensaciones de diferentes herramientas, hasta la consideración de materiales diferentes, lo cual implica ajustes en velocidades y avances de corte.

El cruce de información de piezas dibujadas en computadora con las operaciones de maquinado para realizar una pieza ya terminada, genera automáticamente un programa en formato APT o en código GM, el cual será ejecutado por la máquina de control numérico. A este sistema de conversión de gráficos a programa de control numérico se le conoce como CAM.

Cuando se habla de fabricar piezas con geometrías que no se pueden maquinar en dos o tres ejes convencionales, nos estamos refiriendo a maquinados complejos. Estos normalmente hacen referencia a cuatro o cinco ejes sincronizados para la generación de una pieza. Por lo que se debe tratar de una superficie o geometría compleja, que dada esa característica, no se puede generar su código maquinado en forma manual, y por lo tanto requiere de un proceso CAD/CAM donde se genera una gran cantidad de líneas de código.

El maquinado con cinco ejes consiste en un proceso de fabricación que utiliza máquinas cortadoras como lo son las máquinas de corte por fresado o torneado. La mayoría de las máquinas de torneado, fresado o conjuntas, utilizan tres ejes, X, Y, Z, para estos procesos de fabricación. Es decir, planteando un cubo espacial, los tres ejes son los movimientos que puede desarrollar la máquina para fabricar la pieza que está sujeta al husillo. El movimiento de los cortadores de la máquina es en estos tres ejes que conforman la forma de la pieza, con la ayuda de los programas respectivos y del técnico profesional que la opera.

El problema es que no se puede mover la pieza para realizar un maquinado posterior, así como uno lateral. Para ello los técnicos con mayor experiencia pueden girar la pieza del husillo o colocar los cortadores adecuados para ello. El problema es que para piezas pequeñas como son las de relojería, conviene que la pieza no sea cambiada o extraída de la bancada en todo el proceso de fabricación. De ahí la importancia del uso de máquinas de cinco ejes.

La limitante técnica de falta del cuarto y quinto eje en la fresadora vertical HAAS VF-2, no permite su utilización para hacer maquinados complejos, tales como álabes de turbinas, prótesis biomédicas, partes de maquinaria y equipos como los que se presentan en la Figura 13.

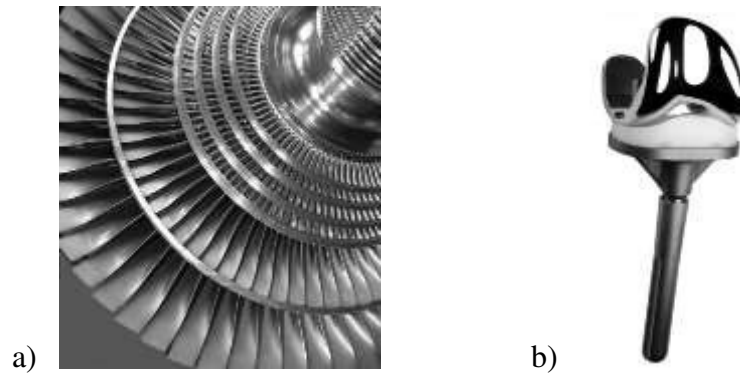


Figura 13. Ejemplos de maquinados complejos: a) Partes de turbomaquinaria como álabes b) Partes biomédicas como prótesis de rodilla.

Esta limitación tecnológica, afecta al alcance de uso en este tipo de fresadoras de tres ejes en la industria de manufactura actual. Por lo que bajo estas condiciones, y para mejorar el grado de competitividad industrial, se requieren mayores inversiones económicas y en infraestructura, para poder así atender las necesidades del desarrollo tecnológico que demande la industria en lo que respecta a la manufactura de piezas complejas. Esa es la razón por la cual en este trabajo de tesis se propone desarrollar metodología para integrar un cuarto y quinto eje a una máquina CNC.

1.5 Hipótesis

Por medio del desarrollo de una nueva metodología y automatización de procesos se puede emular una máquina CNC de 3 ejes para operación sincronizada en 5 ejes, para lo cual dicho conocimiento permitirá la manufactura de piezas mecánicas complejas utilizadas en las áreas de metalmecánica, electrónica especializada, aeroespacial y bioingeniería.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo Principal

Desarrollar un sistema de control automatizado para emular un sistema multiejes (cuarto y quinto ejes rotatorios) cuyo aporte permitirán a un usuario a hacer maquinados sobre superficies complejas orientadas a la manufactura de componentes y partes utilizadas en la industria automotriz, aeroespacial y bioingeniería.

1.6.2 Objetivos Particulares

1. Analizar las capacidades y requerimientos para migrar una máquina CNC de 3 ejes a 5 ejes sincronizados.
2. Desarrollar metodología para la operación de 4 ejes sincronizados.
3. Desarrollar metodología para la operación de 5 ejes sincronizados.
4. Desarrollar una interfaz gráfica para operación del sistema desarrollado.
5. Analizar trayectorias de 5 ejes de manera simulada, medida y emulada.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Datos Técnicos de la Máquina CNC HAAS VF-2

En este documento se desarrolla la metodología para habilitar una máquina CNC vertical tipo fresadora (HAAS VF-2) para que trabaje en 5 ejes coordenados. Lo anterior lleva como propósito de tener la capacidad para maquinar piezas complejas con materiales desarrollados recientemente.

Una fresadora HAAS VF-2 es una máquina CNC que cuenta con tres ejes coordenados, una bancada (mesa de trabajo) que se mueve en el eje X y en el eje Y, además cuenta con un husillo (herramental) que se mueve en el eje Z. La diferencia de esta fresadora con las demás del mismo proveedor son las dimensiones de maquinado [28].

La fresadora vertical HAAS VF-2 cuenta con las siguientes desventajas:

- Alto costo de la inversión inicial.
- Requiere de operación por parte de mano de obra calificada y especializada en lo que respecta a fresadoras con multiejes.
- El proveedor no proporciona información acerca de la programación avanzada
- La modificación de la máquina CNC requiere de personal calificado y reconocido por HAAS.

Las máquinas fresadoras CNC utilizan diferentes tipos de cortadores que se diferencian por su forma, material, diámetro y número de dientes.

En la Tabla 2 se muestra la clasificación de las máquinas CNC fresadoras verticales.

Tabla 2: Clasificación de las fresadoras verticales HAAS de 3 ejes.

Máquina	Máxima distancia en X (pulgadas)	Máxima distancia en Y (pulgadas)	Máxima distancia en Z (pulgadas)
VF-E / VF-0 / VF1	20	16	20
VF-EXT / VF-OE	30	16	20
VF-2	30	16	20
VF-3	40	20	25
VF-4	50	20	25
VF-5	50	25	25
VF-6	64	32	30
VF-7	84	32	30
VF-8	64	40	30
VF-9	84	40	30
VF-10	120	32	30
VF-11	120	40	30
HS-1/1R/1RP	24	20	22
HS-2RP	38	35	30

Los cortadores planos (flat endmills) como los que se muestran en la parte izquierda de la Figura 14, son utilizados para alisar la parte superior de los materiales, también son utilizadas para hacer contornos y devastados.

Las fresas esféricas tienen la parte inferior hemisférica (redonda) tal y como se muestra a la derecha de la Figura 14. Este tipo de fresas son útiles para producir superficies no planas [29]. Un cortador esférico tiene un radio de esquina igual a la mitad del diámetro del cortador, por ejemplo si un cortador esférico tiene un diámetro de 0.25 pulgadas, este tendrá un radio de esquina de 0.125 pulgadas.



Figura 14. Cortador plano (izquierda) y cortador esférico (derecha)

Si el cortador tiene un radio menor a la mitad del radio del cortador, se dice que es una “nariz de toro”, tal y como se muestra en la Figura 15. Estos cortadores son planos en el fondo, pero tienen un radio en la esquina, lo que permite combinar beneficios de un cortador plano y uno esférico.

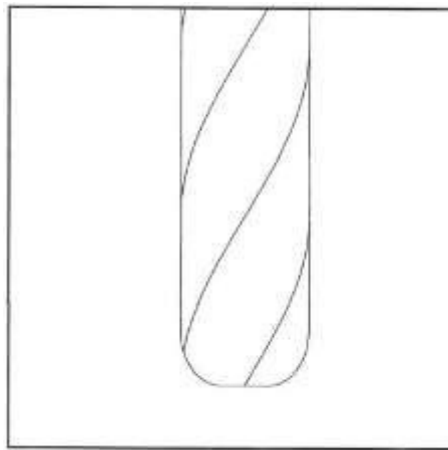


Figura 15. Cortador “nariz de toro”

Para lograr la integración de cuarto y quinto eje los ejes rotativos a la fresadora CNC HAAS VF-2, es necesario instalar la interfaz TRT-160 de HAAS Automation. El TRT-160 es una mesa rotativa completamente automatizada que cuenta con la característica de ser programable. Esta unidad se encuentra conformada por dos partes: la mesa mecánica que se usa para sostener la pieza de trabajo y unidad electrónica que controla la rotación de la mesa. En la Figura 16 se muestra la forma en que se monta sobre la mesa de trabajo [30].

Para instalar el TRT-160 es necesario usar un montacargas que permita montarlo sobre la bancada, debido a su peso.

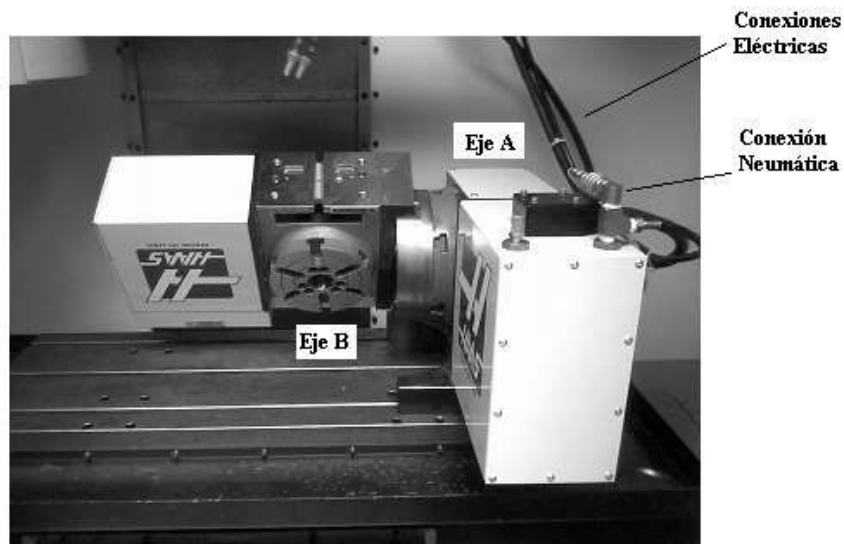


Figura 16. Interfaz TRT-160

Posteriormente para agregar la funcionalidad de los ejes rotativos, se contempla utilizar controladores especiales que interconectarán en forma externa a los controladores ya existentes en los ejes x, y, z, logrando habilitar los ejes A y B respectivamente. Una vez habilitados los ejes adicionales, se manejará un método electrónico para sincronizarlos con los tres ejes con los que cuenta la CNC vertical.

Para lograr la realización de estos controladores se requiere primero caracterizar los procedimientos y técnicas utilizadas en la industria de las máquinas CNC, verificando su arquitectura, su procedimiento de administración y conversión, a través de procesadores y las etapas del control típico desarrollado por los fabricantes tradicionales como lo serían GE automation y HAAS [31].

Se han observado ciertas limitantes acerca de la implementación del cuarto y quinto eje en la fresadora CNC HAAS VF-2. El problema se basa principalmente en el quinto eje, debido a que el modelo de la tarjeta de control mostrada en la Figura 17 que se tiene disponible, es un modelo obsoleto y solo cuenta con conectividad para 4 ejes. Por lo que se tiene que el quinto eje no se puede sincronizar con los ejes ya existentes.

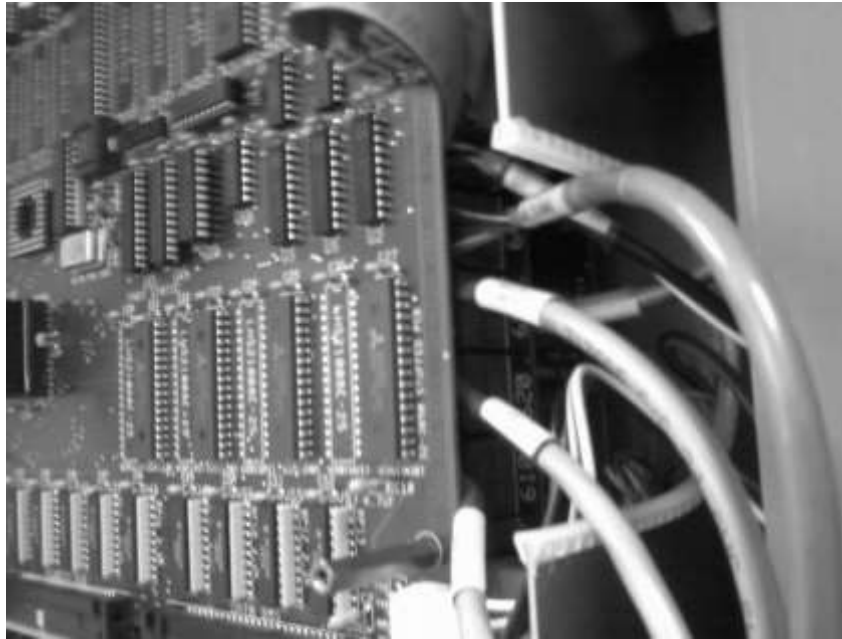


Figura 17. Vista de la tarjeta del CPU y la tarjeta de control de la HAAS VF-2

Debido a este limitante, únicamente se puede agregar un cuarto eje completamente sincronizado y el quinto eje indizado, este último a través de un controlador para servomotores HAAS. Esto abre la oportunidad para trabajar en la sincronización por medios externos del quinto eje.

Con la información acerca de las limitantes antes mencionadas se propone usar las entradas y salidas digitales de la máquina CNC para lograr pasar el eje indizado a un eje completamente sincronizado, por medio del cual se pretenden generar micro desplazamientos utilizando las técnicas de programación de los códigos G y M.

2.2 Propuesta de Implementación de cuarto y quinto ejes rotativos

Una vez completado el análisis de capacidades y tomando en cuenta las limitantes de la fresadora vertical HAAS VF-2, como fase inicial tenemos el montaje de la interfaz TRT-160. Posteriormente se describirá cómo se agregará funcionalidad al cuarto y quinto eje respectivamente.

En una segunda etapa se realizarán y construirán interfaces de control independientes para realizar movimiento por eje rotatorio unitario, verificando el control por código G y M. Mediante el uso de post procesadores convencionales de las series 10 M de Fanuc [32]. Cabe mencionar que los modelos existentes tienen como fundamento este tipo de controladores para comprobar su efectividad.

Lo anterior se pretende llevar a cabo con la tarjeta servoamplificadora para un solo eje, como el que se muestra en la Figura 18. Una vez instalado y analizado se realizaron pruebas de control simultáneo con el propósito de verificar su implementación. Cabe mencionar que este mismo modelo de tarjeta la utilizan los ejes lineales ya instalados. La diferencia destaca en que el software HAAS es el que habilita y decide si lo que va a controlar es un eje lineal o un eje rotativo; esto último se lleva a cabo al dar de alta en el software el cuarto eje dentro de los parámetros de la máquina fresadora CNC.

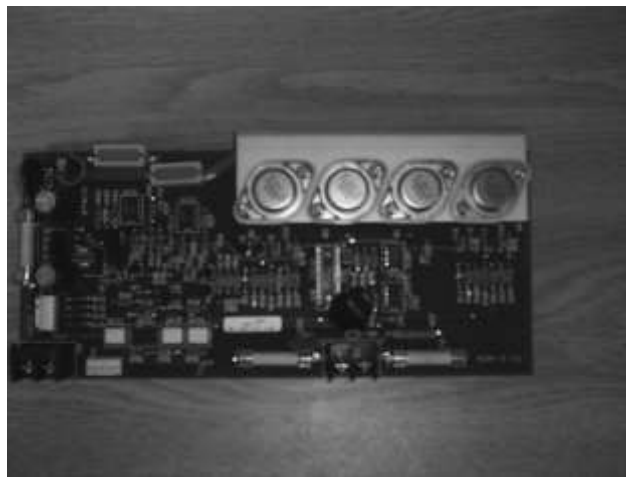


Figura 18. Tarjeta servoamplificadora (para un solo eje)

En la Figura 19 se muestra un controlador externo marca HAAS, para servomotores, con el que se pretende en una tercera fase habilitar el quinto eje de un centro de maquinado vertical CNC (o fresadora), analizando así su viabilidad y su futura implementación. Este controlador ya está configurado para ser utilizado con ejes rotativos, aunque también puede utilizarse para controlar ejes lineales, pero dado que la pantalla se muestra en grados, no es práctico utilizarlo para ejes lineales.



Figura 19. Controlador HAAS para Servomotores

En la Figura 20 se muestran los diferentes modos en que los ejes rotativos se pueden implementar, para el modo Operación Completa de cuarto y quinto eje (Figura 20a), esto es el equivalente a dos ejes completamente sincronizados. Se usan las tarjetas servoamplificadoras (Figura 18), en el modo de Operación Indizada del cuarto y completa del quinto eje (Figura 20b) es el equivalente a un eje indizado y un eje completo. En este modo se usan una tarjeta servoamplificadora y un controlador externo para servomotores HAAS (Figura 19). Por último en el modo de Operación Indizada de cuarto y quinto eje (Figura 20c) que se representa por medio de los dos ejes rotativos indizados, se usa un controlador para servomotores que es capaz de controlar dos ejes, muy similar al de la Figura 19.

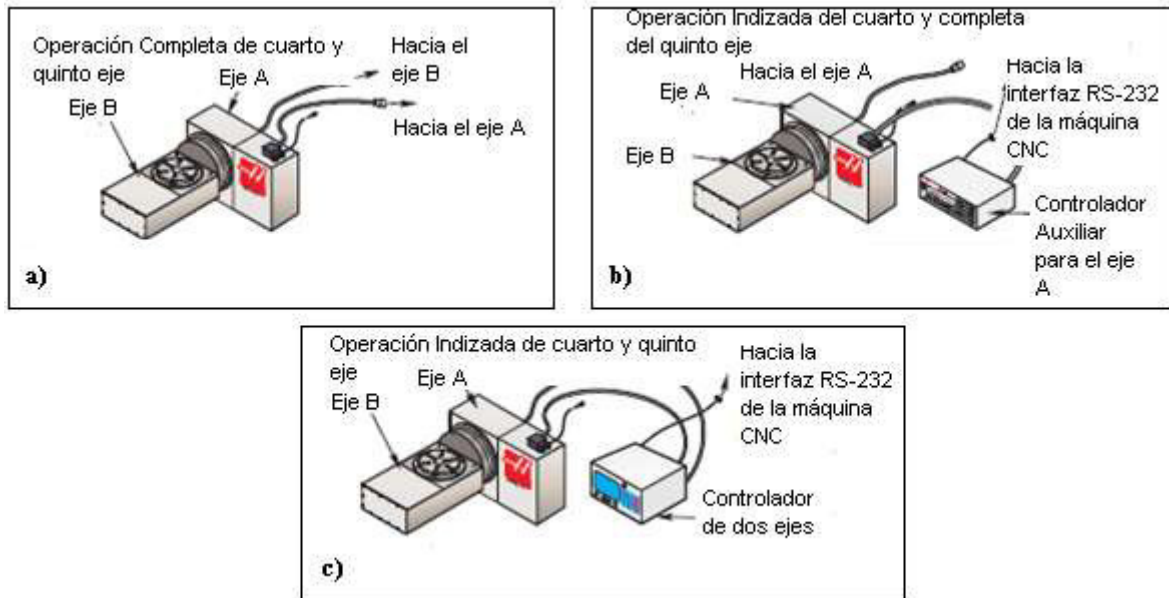


Figura 20. Modos para controlar un cuarto y quinto eje usando un TRT-60. a) Modo de Operación Completa cuarto y quinto eje. b) Operación Indizada del cuarto y completa del quinto eje. c) Operación Indizada de cuarto y quinto eje

La diferencia de la operación completa y la forma indizada es que en el primero los ejes operan en forma simultánea con el control y en la otra forma, los ejes se operan de manera semiautomática, por lo que los ejes operan en el modo indizado.

Un eje indizado, es cuando éste solo hace funciones de posicionamiento y no se mueve en sincronización con el código GM y con el resto de los ejes coordenados.

Tomando en cuentas las limitantes antes descritas, la operación completa de los ejes rotativos no se podrá llevar a cabo por lo que uno de los ejes, en este caso el quinto, tendrá que dejarse indizado. Por lo que la propuesta de integración quedará como se muestra en la Figura 21 que es el equivalente al mostrado en la Figura 20b, pero con la diferencia de que se buscará la manera de obtener una operación completa.

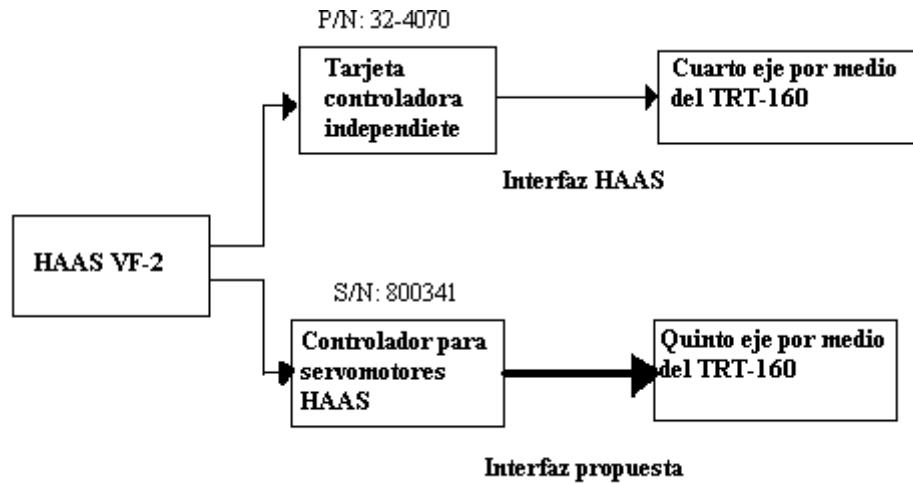


Figura 21. Diagrama de bloques de la propuesta de integración de 5 ejes

En el diagrama de la Figura 21 se observa una línea más gruesa que dice “interfaz propuesta”. En esta interfaz se desarrollarán las aplicaciones de control que se pretenden integrar para realizar el control de forma sincronizada del quinto eje.

En la Figura 22 se muestra la conexión de un eje indizado, en donde se pueden ver las conexiones del controlador para servomotores HAAS (Figura 21) a un eje rotativo del TRT-160, un quinto eje en este caso, ya que este controlador externo solo sirve para controlar un solo eje y en la Figura 22 se muestra la conexión para un eje unitario.

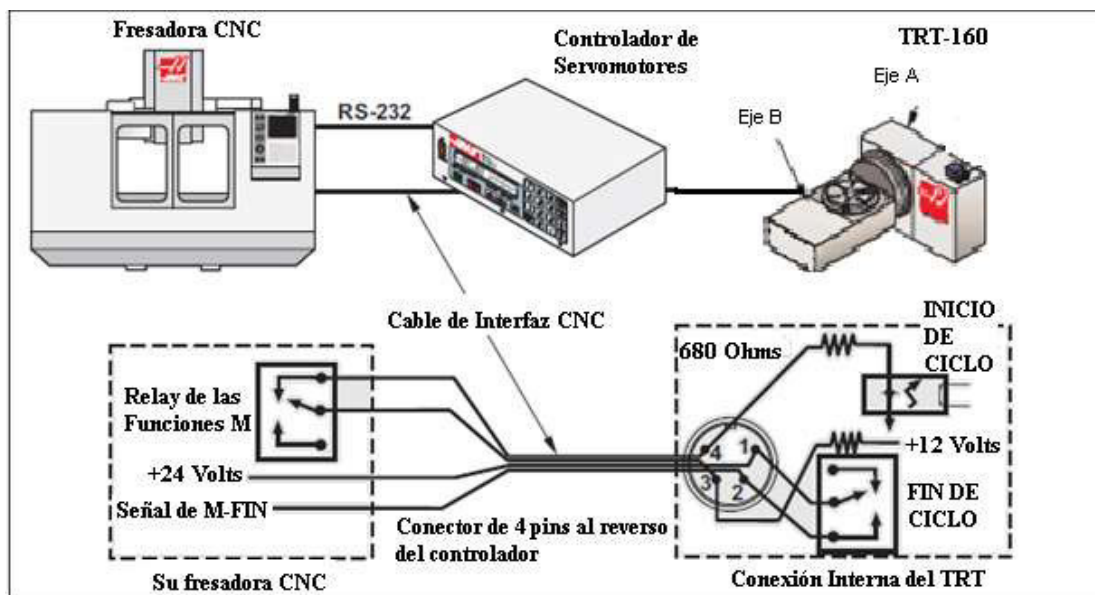


Figura 22. Conexión del controlador de servomotores HAAS a un TRT-160

El controlador externo se conecta a través de una interfaz RS-232 y un conector especial que envía señales de control en ambas direcciones. La interfaz del puerto serial solo se utiliza para hacer la sincronización de código numérico y el eje rotativo en cuestión, en otras palabras se usa para hacer el control numérico directo (DNC).

2.3 Parámetros de Entrada y Salida de la Máquina CNC HAAS VF-2.

Acercas de los parámetros de entrada y de salida de una fresadora vertical CNC marca HAAS, estos tienen que ser habilitados antes de ser utilizados. El software HAAS cuenta con salidas digitales opcionales (Figura 23) que usan con los códigos M21-M28 respectivamente [33].

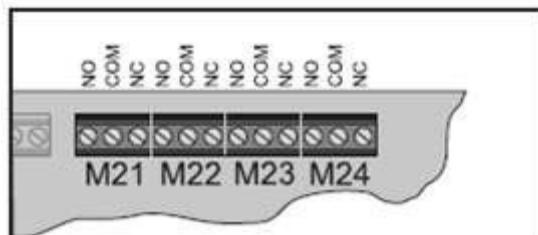


Figura 23. Módulo de Relevadores de la Máquina CNC HAAS VF-2

Por ejemplo si se utiliza el código M23 se habilitará el relevador que lleva dicho nombre por un cierto tiempo y luego se apagará. Adicionalmente existen los códigos M51-M58 que activan la salida respectiva y la dejan encendida, así como los M61-M68 que hacen lo opuesto.

Las señales de entrada son tomadas de dispositivos ya conectados a la máquina CNC tales como el sensor de la puerta, el sensor indicador de presión baja, el sensor de nivel de aceite, entre otros. Cabe mencionar que existen entradas adicionales que pueden ser utilizadas por el usuario.

Las entradas digitales se monitorean a través de la función M96 que usa parámetros P y Q. Donde P indica la línea a la que la instrucción saltará cuando una condición se cumpla, y Q indica el número entrada (0-63) a ser probada [33]. Un ejemplo de esto es:

N04 G28 (la letra N se utiliza para indicar el número de línea de un programa)
N05 M96 P10 Q8 (prueba la entrada #8, hasta que sea cerrada)
N10... (Programa de fabricación)
M30 (fin de programa)

Otra forma de establecer comunicación con la máquina CNC es por medio de la interfaz RS-232 que actualmente se utiliza en forma bidireccional para transmisión y recepción de programas de piezas a fabricar. También suele ser usada para mandar información acerca de la posición de la herramienta en ese momento por medio de la instrucción G102.

2.4 Ambiente de Diseño Asistido por Computadora Solidworks

El software para diseño mecánico Solidworks es una herramienta para modelado sólido paramétrico, basada en operaciones. Se pueden crear modelos de sólidos en 3D totalmente asociativos con o sin restricciones por medio de relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención de diseño [34].

Un modelo sólido es el tipo más completo de modelo geométrico utilizado en los sistemas CAD. Contiene toda la geometría de superficie y la alámbrica necesaria para describir detalladamente una geometría de aristas y las caras del modelo.

Un modelo sólido paramétrico es cuando depende de sus cotas y las relaciones utilizadas para crear una operación de diseño. Debido a lo anterior, es posible realizar cambios en las dimensiones de un sólido de una manera rápida y sencilla como se observa el ejemplo de la Figura 23.

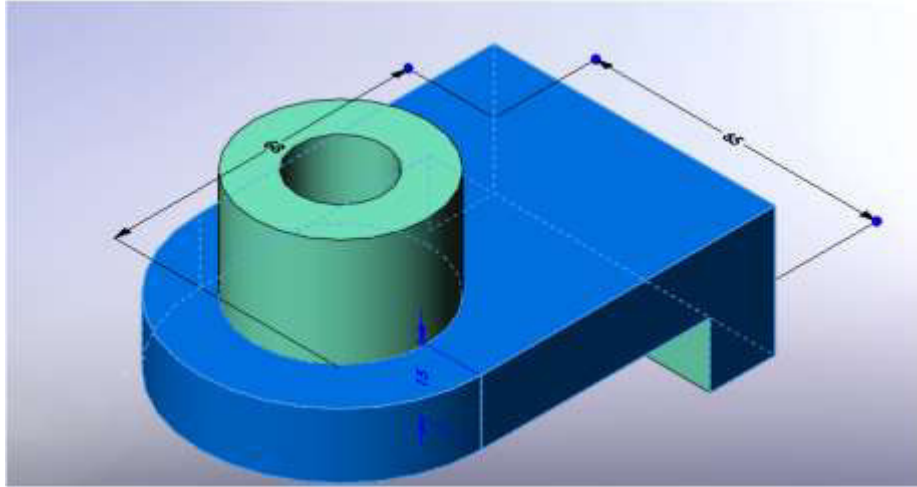


Figura 24. Ejemplo de un diseño básico en Solidworks

Cuando se dice que un modelo es asociativo se debe a que el software de diseño hace referencia a los dibujos y ensambles, por lo que los cambios efectuados en el modelo se reflejan en los ensambles y dibujos relacionados.

Para empezar un diseño en Solidworks es necesario iniciar con un croquis en 2D, como se aprecia el ejemplo de la Figura 25. El croquizado (bosquejo) es el acto de crear un perfil en un plano compuesto por geometrías de estructura alámbrica. Los tipos de geometría más comunes son líneas, arcos, círculos y elipses.

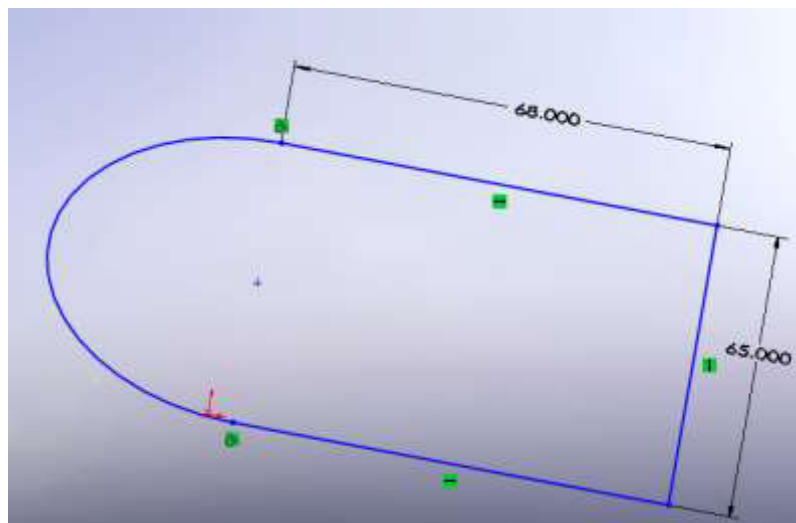


Figura 25. Intención de diseño o croquizado

Solidworks ofrece una completa variedad de herramientas para hacer croquis de una geometría con varios perfiles. Las herramientas más comunes son: línea, círculo, arco con centro en extremos y rectángulo de esquinas.

Una vez que el croquis se ha completado, este puede ser extruido para crear una primera operación. Cabe mencionar que existen varias opciones para extruir un croquis como son el ángulo de salida y la profundidad de la extrusión. En la mayoría de las ocasiones, las extrusiones se realizan en una dirección normal al plano de croquis.

Las salientes se utilizan para agregar material al modelo. Esta operación es similar a la operación de Extruir (se hace con la misma función), en la cual se puede agregar otro croquis sobre la cara de una pieza y extruirlo para generar una saliente.

Existen muchas más operaciones que el software de diseño Solidworks es capaz de manejar, algunas de las más utilizadas son las operaciones de: barrenado, extruir corte, revolución y recubrimientos.

En los que respecta a la operación de barrenos, esta función permite agregar una cierta cantidad de barrenos de diferentes tipos a partir de puntos en un croquis o partiendo desde cero. Los barrenos pueden ser creados con una longitud definida o que atraviesen una o varias superficies.

Para crear un corte sobre una pieza es necesario crear un croquis y de ahí usar la operación de Extruir Corte donde posteriormente se usan los mismos pasos que en las operaciones de barrenos, donde es posible crear el corte a una dimensión fija o hasta que llegue a una superficie.

Otra operación importante es la de revolución, donde es posible crear una superficie de revolución siempre y cuando se tenga un croquis que esté cerrado y bien definido, y una vez definido el eje de revolución es posible crear la revolución de la superficie en la angulosidad deseada, por defecto es a 360°.

Con la operación de recubrimientos es posible unir dos o más superficies con material, lo que permite crear piezas que tengan diferentes perfiles con una sola operación.

La aportación de este software para este trabajo es la parte del diseño de las piezas que van desde las geometrías básicas hasta las geometrías complejas que requieran operaciones de maquinados con cuarto y quinto eje.

2.5 Ambientes de Manufactura Asistida por Computadora

Un ambiente de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) puede hacer que el proceso de programación de una máquina CNC sea más sencillo, lo anterior se logra por medio de la examinación de los mejores técnicos en máquinas herramienta en su trabajo y luego pasando estos procedimientos en una lógica por software.

Al utilizar la misma lógica que los mejores técnicos utilizan permite que el sistema muestre guías para nuevos programadores y a su vez proporciona un ambiente para programadores experimentados. La guía nunca debe ser usada para poner límites en la operaciones de maquinado.

La programación en sistemas multiejes puede ser comparada con el proceso artístico de la escultura, lo que significa que los programadores de CNC deben tener la completa libertad de decidir cómo van a cortar una pieza [35].

Los sistemas CAM también proveen de un ambiente de prueba libre de riesgo, con el propósito de observar cada movimiento de la máquina CNC. Cada componente de la máquina CNC y cada movimiento puede ser definido en el sistema CAM y ser ejecutado en tiempo real en la computadora. La ventaja es que no hay puertas o refrigerante que obstruya la vista y no se le quita tiempo de uso a la máquina.

Es posible obtener en el mejor programa en código numérico cuando el desarrollador del software trabaja en conjunto con los fabricantes de máquinas CNC. Este trabajo en conjunto permite que las empresas trabajen juntas en máquinas reales y en piezas reales para obtener mejores trayectorias de herramienta y una mejor salida de código numérico para que se fabrique exactamente lo que se ve en pantalla.

Cuando se recibe un archivo de post procesado como en el caso anterior se sabe que ha sido probado con la máquina CNC que el técnico utiliza. Actualmente no es posible que el post procesador con que se cuenta sea 100 % compatible con la máquina CNC que se usa, la mayoría de estos son genéricos y presentan ligeros desperfectos en el mejor de los casos. En este documento se trabajó con una creación propia de una aplicación generada en Labview que permite adecuar el código numérico de un software CAM a nuestro prototipo, esta aplicación es llamada convertidor de código.

2.5.1 Mastercam

Fue fundado en Massachusetts en 1983 [36] por CNC Software, Inc. Es uno de los primeros programas usados para Diseño Asistido por Computadora (CAD) / Manufactura Asistida por Computadora (CAM).

CNC Software Inc. fueron los primeros en introducir un software CAD/CAM diseñado para los maquinistas e ingenieros [37]. Mastercam empezó utilizando principalmente diseño en 2D que permite a los operadores de máquinas CNC diseñar piezas en forma virtual en una computadora y guiados por el control numérico computarizado (CNC) para la parte de manufactura de productos.

El programa de Mastercam cuenta con herramientas predefinidas para hacer operaciones de contornos, barrenos, cavidades, caras, engravados, superficies, operaciones multiejes, entre otras. Un ejemplo de esto se observa en la Figura 26.

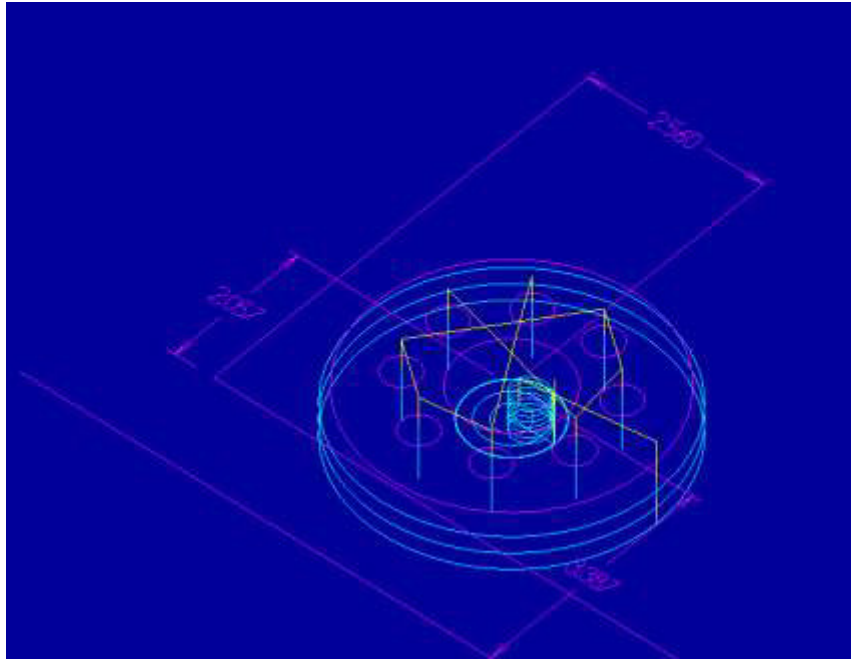


Figura 26. Ejemplo de pieza en Mastercam X3

2.5.1.1 Niveles de Producto de Mastercam

Con la aparición del Mastercam X (10), la aplicación se volvió realmente basada en Windows, en comparación a sus versiones anteriores que son basadas en DOS [36]. Mastercam proporciona soporte para varios tipos de máquinas, cada una con la opción de niveles de funcionalidad, y también posee de elementos adicionales para modelado de sólidos, maquinados en 4 ejes y 5 ejes.

Los diferentes niveles de producto del programa de Mastercam son:

- *Design*. Permite crear geometrías en 3D a través de los diseños de las redes alámbricas, lo que le da la facilidad de importar y exportar archivos de CAD que no pertenezcan a Mastercam.
- *Mill Entry*. Incluye la parte de Design, además se añaden varios recorridos de herramientas (toolpaths), construcción de planos frontales y planos para las herramientas, opciones para generar código numérico (posting), verificaciones entre otras opciones.

- *Mill, Level 1.* Incluye Mill Entry, más creación de superficies y muchos otros recorridos de herramientas para todos los planos de construcción y herramientas, maquinados de alta velocidad, editor de recorridos de herramientas, transformadas y definición de la materia prima.
- *Mill, Level 2.* Incluye Mill, Level 1, más recorridos adicionales de herramientas, proyecciones de recorridos de herramientas, devastado de superficies y acabados de superficies, límites de contención, revisión de partes de sujeción, entre otras aplicaciones.
- *Mill, Level 3.* Incluye Mill, Level 2, en adición cuenta con recorridos de herramientas en 5 ejes, devastado y acabados de superficies más poderosos, entre otras opciones.
- *5-Axis add-on.* Contiene devastados en 5 ejes, acabados, contornos, cortes profundos, barrenos, entre otros maquinados en 5 ejes.
- *Lathe Entry.* Permite crear geometrías en 3D, exportación e importación de archivos no procedentes de Mastercam, varias rutas de herramientas y generación de código numérico.
- *Lathe, Level 1.* Incluye Lathe Entry, además cuenta con creación de superficies, caminos de herramientas de 6 ejes, definición de materia prima, entre otras funciones.
- *Router Entry.* Es similar que Mill Entry y Lathe Entry de los cuales aceptan formatos no nativos de Mastercam pero ahora para este tipo de máquinas.
- *Router Plus.* Similar a Mill Level 1, pero para máquinas Router.
- *Router Pro.* Incluye Router Plus, en adición cuenta con generación de islas de geometrías reales (True Shape geometry nesting), funcionalidad de caminos para herramientas en 5 ejes, devastados múltiples y acabados de superficies, entre otras funciones.
- *Wire.* Permite crear geometrías en 2D y 3D, dimensionar, crear caminos de hilo en 2 y 4 ejes, elementos de energía personalizables, entre otras opciones.

- *Art.* Diseño rápido en 3D, permite transformar geometrías en 2D a 3D, conversión de geometrías de 2D de trabajos artísticos a geometrías maquinables, además incluye rutas de herramientas rápidas, devastados y acabados.

Este software en particular nos servirá en este trabajo para la generación de la operaciones de maquinado necesarias para hacer la manufactura de piezas. Para realizar esta operación nosotros requerimos partir de un diseño previamente elaborado en Solidworks, posteriormente este debe ser grabado en un formato que sea reconocido por el Mastercam X3; dicho formato es IGES (Initial Graphics Exchange Specification) con extensión .igs. Una vez hecho esto se procede a generar las operaciones necesarias para realizar el maquinado, para el cual el producto final el código numérico (NC) que usará directamente en la máquina CNC por medio del uso de post procesadores.

2.5.2 NX

NX de la compañía Siemens es un software de diseño integral, que proporciona soluciones de ingeniería y manufactura [38].

El software de NX es un ambiente de diseño que permite realizar operaciones CAD con la misma e inclusive en algunos casos con mayor facilidad que Solidworks, a su vez también posee herramienta de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), las cuales permiten realizar las operaciones de elemento finito sobre la piezas previamente elaboradas en este ambiente de diseño. NX también cuenta con herramientas CAM que permiten generar programas en código numérico con el cual es posible realizar operaciones muy similares al software de Mastercam.

Otra característica importante es que permite importar directamente piezas nativas de Solidworks para que sean utilizadas para generar operaciones de maquinado sin la necesidad de cambiar el formato de la pieza en cuestión. También es posible importar otros formatos como de CATIA V5, AutoCAD, ProE, entre otros.

Este software fue utilizado también en este documento para generar las piezas y los códigos numéricos de las mismas. Debido que tiene varias funciones de CAD y CAM que nos interesan.

2.6 Labview

El programa de Labview genera un entorno de programación gráfica, que es conocida como lenguaje G por algunos autores [39]. Originalmente Labview fue creado por National Instruments en 1976 para funcionar en computadoras MAC, salió al mercado en 1986. Ahora se encuentra disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux.

Los programas desarrollados con Labview se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs que originalmente se utilizaban para el control de instrumentos, hoy en día Labview puede ser utilizado para Instrumentación Electrónica y programación embebida [40].

Como se ha dicho Labview es una herramienta gráfica de programación, lo que significa que los programas no se escriben, sino se dibujan, lo que facilita su comprensión. Entonces para programar en Labview es necesario usar los bloques pre-diseñados y una vez conectados entre sí es posible crear un proyecto para una aplicación específica. En la Figura 27 se observa un ejemplo claro de esto, en donde se observa una aplicación con el cual es posible establecer comunicación por puerto serie RS-232.

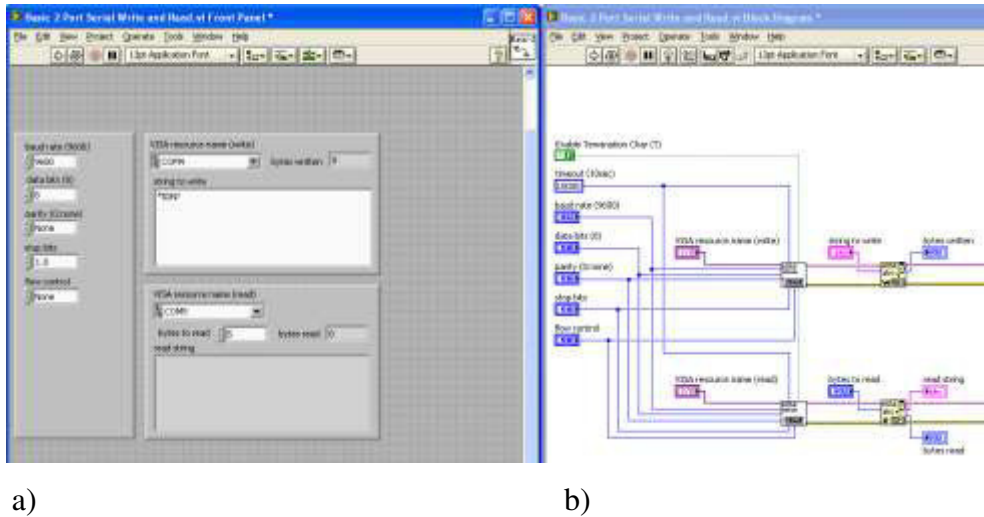


Figura 27. Programa de manejo de puerto serie. a) Panel Frontal. b) Diagrama de bloques

Cada Instrumento Virtual (VI) consta de dos partes diferenciadas:

- *Panel Frontal.* (Es la interfaz con el usuario) Se utiliza para que usuario interactúe con el programa que se está ejecutando. Los usuarios pueden mover controles y obtener datos del programa en tiempo real.
- *Diagrama de Bloques.* Este es el programa propiamente dicho, aquí se define la funcionalidad del programa en base a los bloques y a su interconexión. Es posible conectar un VI con otros VI's.

El programa de Labview presenta facilidades para el manejo de interfaces de comunicaciones en tiempo real, tales como puerto serie, puerto paralelo, GPIB, Bluetooth, USB, entre otros. También cuenta con capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones tales como: DLL (librerías de funciones), .NET, ActiveX, Multisim, Matlab (Simulink), AutoCAD, Solidworks, entre otras aplicaciones.

Además de todo lo anterior Labview cuenta con herramientas (toolkits) para el procesamiento digital de señales, visualización y manejo de gráficos dinámicos, adquisición y tratamiento de imágenes, control de movimiento, aplicaciones de tiempo real, programación de FPGA's y sincronización de dispositivos.

Con el módulo de Labview NI Softmotion es posible diseñar aplicaciones personalizadas de control de movimiento usando herramientas de desarrollo gráfico, a su vez se pueden definir ejes personalizados que incluyen E/S estándar, algoritmos de control personalizados o interfaces de comunicación. Lo anterior permite la creación de prototipos virtuales para programa de Solidworks [41].

Como se puede observar Labview es una herramienta poderosa con la que se pueden realizar muchas aplicaciones de uso específico, sin mencionar que es posible generar programas ejecutables (programas con extensión .exe), que pueden ser activados sin necesidad de tener instalado el Labview, solo basta tener instalada la versión Profesional del Labview con el propósito de generar el archivo ejecutable y una vez generado es posible correrlo en otra computadora que no cuente con el software con solo instalar el Run Time Engine correspondiente a la versión del Labview que lo generó.

El aporte de esta herramienta gráfica en el desarrollo de este trabajo se enfocará en la creación del manejo de puertos para obtención de una interfaz gráfica que muestre cómo se comporta el quinto eje con los demás ejes sincronizados.

Lo anterior se debe a la facilidad que tiene este programa para el manejo de puertos en tiempo real y con la ayuda de Labview NI Softmotion se podrá animar algún esquema de Solidworks que haga referencia al quinto eje, lo facilitaría el diseño de la interfaz gráfica.

2.7 Tipos de Maquinados con CNC

Los maquinados en las fresadoras verticales los podemos clasificar de acuerdo al número de ejes que intervienen en su elaboración de los cuales podemos hablar de maquinados en 2 dimensiones cuando se utilizan dos ejes simultáneos, maquinados en 3 dimensiones cuando se utilizan 3 ejes simultáneos y así los podemos seguir clasificando hasta llegar a los maquinados complejos que son los que involucran ejes rotativos como el cuarto y quinto eje.

De acuerdo a lo anterior podemos agregar que el maquinado que involucra un solo eje sería el equivalente a usar una máquina cortadora, en el cual solo se quiere cortar un pedazo de madera o metal en el cual tenemos un excedente. En la Figura 28 se observa una simulación en Mastercam de un proceso que involucra el movimiento de un solo eje y en la Figura 29 se muestra una aplicación real de lo que podemos señalar como un corte en una línea recta horizontal y/o vertical, pero no en diagonal.

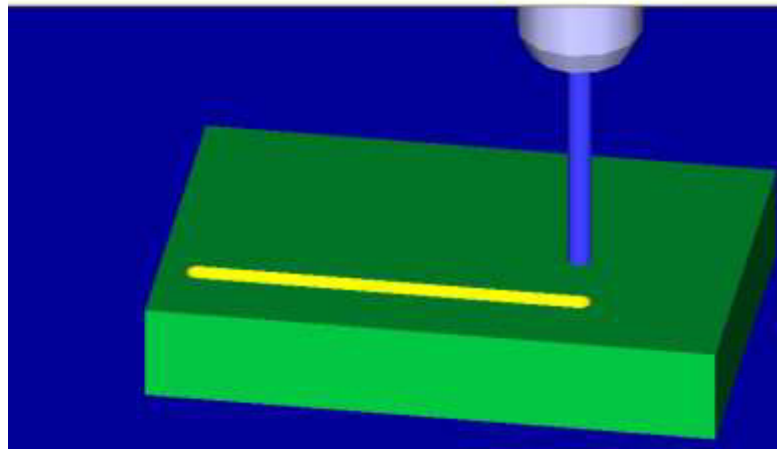


Figura 28. Ejemplo de maquinado con fresadora CNC usando un eje coordenado



Figura 29. Sierra Eléctrica

En el momento en el que hablamos de una línea recta con una pendiente con valor diferente a una constante, estaríamos hablando de maquinados en dos dimensiones. Pero aquí las posibilidades de diseño se incrementan hasta poder maquinar una pieza en un plano. Dicha pieza puede tener un contorno formado con líneas y arcos además puede tener cavidades y barrenos, en la Figura 30 se observa un ejemplo de maquinado con 2 ejes (2 dimensiones) elaborado con una fresadora vertical.

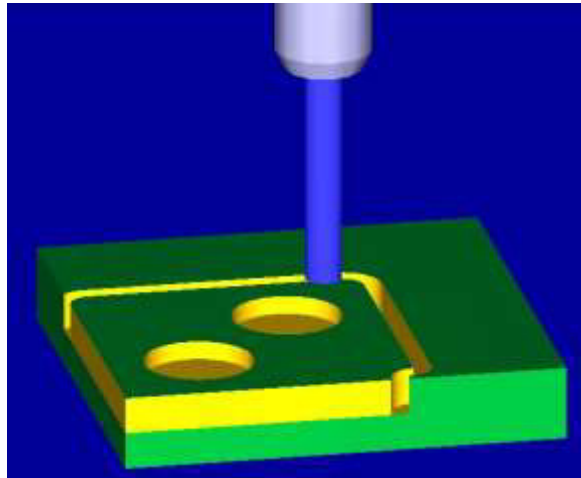


Figura 30. Ejemplo de maquinado en 2 dimensiones en fresadora CNC, maquinado de contornos y cavidades

Otro ejemplo más práctico y uno de los más utilizados son las operaciones de torno, cuyos maquinados también son en dos dimensiones. Con las operaciones de torno es posible crear piezas redondas con alto grado de precisión, en especial si se trata de un torno CNC. Ejemplo de una aplicación se observa en la Figura 31.

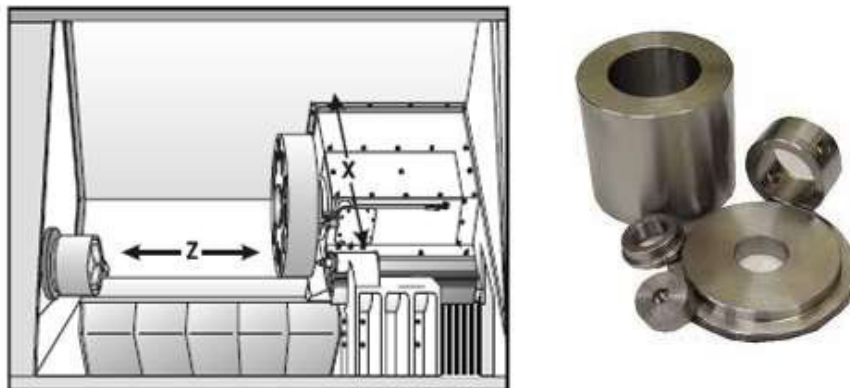


Figura 31. Maquinado en torno (2 dimensiones)

Para maquinados en 3 dimensiones se tienen los maquinados de superficies como la que se muestra en la Figura 32, en donde el ejemplo más común es una figura volumétrica o un molde de inyección de plástico. Hasta aquí es hasta donde llegan las máquinas CNC típicas que cuentan hasta tres ejes de maquinado, estas cuentan movimientos lineales en ejes X, Y y Z.

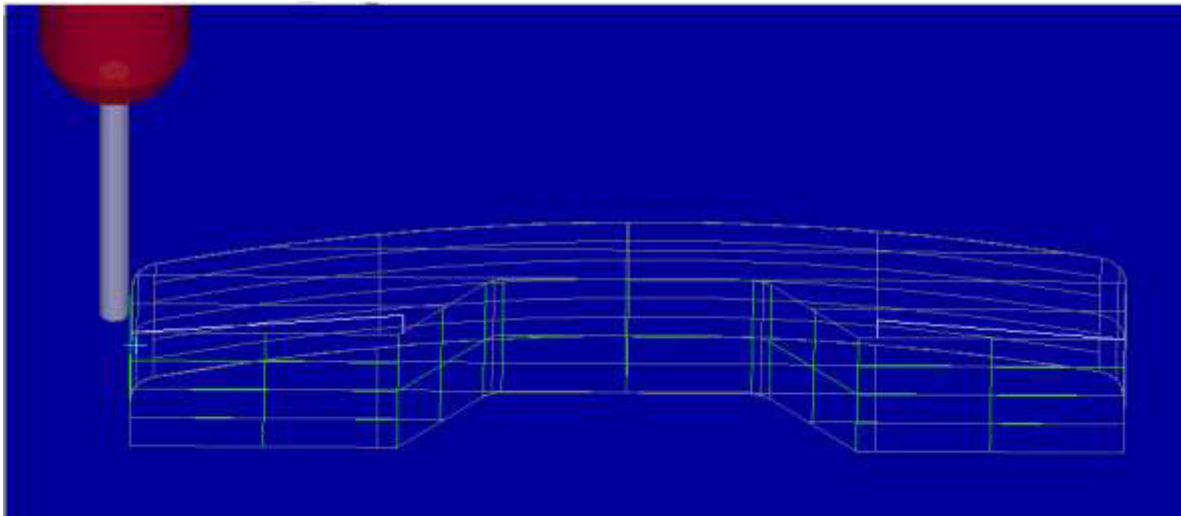


Figura 32. Maquinado de superficies en Mastercam X3

Cuando hablamos de maquinados complejos nos referimos a piezas que no se pueden crear con los ejes coordenados convencionales (ejes lineales) y se ocupa de ejes rotativos como lo son el cuarto y quinto eje. Por lo que al decir que contamos con una fresadora vertical de 5 ejes, nos referimos a que esta cuenta con dos ejes adicionales de rotación.

La mayoría de los fabricantes de máquinas herramienta identifican sus ejes rotativos de acuerdo a la norma ISO [35], la cual es:

- El eje A rota alrededor del eje X
- El eje B rota alrededor del eje Y
- El eje C rota alrededor del eje Z

Sin embargo, algunos fabricantes pueden usar diferentes nombres para sus ejes, pero el principio es el mismo.

Un ejemplo de maquinados complejos se muestra en la Figura 33 en donde para generar esta pieza es necesario que se mueva una bancada (mesa xy), el husillo en el eje z y un eje rotativo que permita rotar la pieza simultáneamente mientras se esté maquinando.

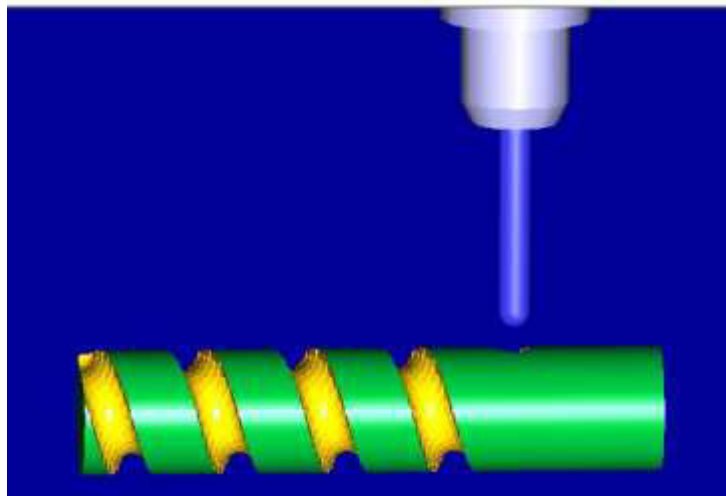


Figura 33. Ejemplo de pieza creada con 4 ejes simultáneos

Muchas máquinas de 5 ejes están disponibles en tamaños similares a las fresadoras convencionales, la característica es que cuentan con costos muy elevados de varios miles de dólares, lo que no las hace accesibles para uso personal y para instituciones con recurso limitado.

A pesar de que el maquinado de 5 ejes está asociado con maquinados de geometrías complejas, su uso es común en maquinados multilaterales, lo que permite reducir tiempo de preparación (el término setup suele ser usado aquí) y evita que partes de requieren solo 3 ejes sean rotadas con el riesgo de perder la referencia de maquinado.

Lo anterior hace posible el incremento del margen de ganancia por parte; además de que se incrementa la precisión en comparación cuando se giran piezas en forma manual en fresadoras CNC de 3 ejes.

Como se describió antes las máquinas de 5 ejes cuentan con muchos beneficios, pero existe ahora la dificultad de generar los códigos CNC que realmente detonen el uso de todas las capacidades de este tipo de máquinas.

El primer paso es replantear los procesos de manufactura convencionales, desde la etapa de diseño hasta la etapa de maquinado. Si se requerían de muchos pasos, múltiples procesos y de ensamble de componentes con máquinas CNC tradicionales, es posible que se combinen en un solo componente que posiblemente en procesos anteriores eran demasiados complejos para ser maquinados.

La siguiente dificultad sería ahora en entender todas las combinaciones de movimientos que son ahora posibles con este tipo de máquinas y se ve la necesidad también de adecuar nuestros post procesadores para que generen códigos de una manera efectiva y también es necesario adecuar nuestros simuladores en nuestras computadoras.

Con lo anterior es posible que dos personas que se dedican a hacer la misma pieza tengan diferentes resultados, debido a que cada individuo atacará la pieza por diferente lado y esto va de la mano con dominio que se tenga del software y de la máquina en cuestión. Pero a fin de cuentas ambos programas producirán la misma pieza, la meta sería ahora en identificar el programa que sea más eficiente en la máquina CNC de 5 ejes.

Una dificultad crítica es el evitar colisiones entre componentes móviles. El más mínimo error en la programación puede generar un alto costo en reparaciones, debido a que los materiales, las herramientas de precisión y los accesorios suelen ser muy costosos.

Por último es necesario estar dentro de los límites de la máquina. Estos límites físicos del que tan lejos un eje puede desplazarse y también existen límites de que tan rápido pueden desplazarse en relación de un eje con otro. En pocas palabras existen límites en la posición y en la velocidad de los ejes rotacionales en una máquina CNC. Los movimientos lineales son siempre más rápidos y más precisos que los ejes rotacionales, lo

que hace necesario controlar la aceleración para prevenir reacciones indeseables cuando los ejes se muevan demasiado rápido.

Debido a las dificultades antes mencionadas se requiere personal altamente calificado para operar este tipo de máquinas, se requiere no solo personal que sepa manejar máquinas CNC de 3 ejes tradicionales, sino que también es necesaria la experiencia en sistemas multiejes. Para lo cual un estudio como el que se describe en este documento ayudará a un mejor entendimiento de dichos sistemas multiejes.

2.8 Visión por Computadora.

Con esta herramienta la computadora personal se convierte en la plataforma que se necesita para medir y automatizar sistemas de una forma eficiente [40]. En pruebas y en aplicaciones de medición, tales como medición de desplazamientos, video grabado de eventos y verificación de resultados, se puede hacer una correlación de imágenes activados por sensores de la parte de adquisición de datos.

NI Vision Assistant es una herramienta para hacer prototipos y pruebas de aplicaciones de procesamiento de imágenes. Con esta herramienta es posible crear algoritmos personalizados por medio de los script, en los cuales se graba cada paso del algoritmo que se esté efectuando en ese momento, se puede probar con otras imágenes para observar su confiabilidad. También es posible crear un instrumento virtual (.vi) funcional al procesar el script.

Con NI Vision Builder for Automated Inspection (Vision Builder AI) es posible crear un programa automatizado para pruebas, similar a Vision Assistant, pero esta herramienta se caracteriza por una mayor facilidad en la creación de algoritmos pensando en usuarios que no tienen experiencia en programación, para lo cual se puede implementar en crear aplicaciones en un corto tiempo. El software permite crear pruebas complejas de toma de decisiones, tales como pasa-falla, también es posible controlar dispositivos de entrada-salida, y establecer comunicación con dispositivos seriales como PLCs.

Para preparar el ambiente para el que se tiene destinada la aplicación, primeramente es necesario examinar la tarea con el propósito de determinar los requerimientos del sistema de visión. Es decir, hay que verificar la iluminación y los lentes antes de ejecutar algún proceso.

Con lo anterior es necesario conocer los aspectos fundamentales que se deben cuidar en todo sistema de visión por computadora, estos son:

1. *Resolución.* Es un indicador de detalle de los objetos que el sistema de imágenes puede reproducir. Es posible determinar la resolución requerida para el sistema de imágenes por medio de la medición en unidades del mundo real de la característica más pequeña que se necesite detectar. Para tener mediciones exactas, un mínimo de dos píxeles deben de representar la propiedad más pequeña que se desea medir en la relación a la imagen digital.
2. *Resolución del Sensor.* Representa el número de columnas y renglones en píxeles CCD del sensor de la cámara. Para calcular la resolución del sensor, es necesario conocer el campo de visión (FOV por sus siglas en inglés). El FOV es el área de inspección que la cámara puede tomar. Las dimensiones horizontales y verticales del área de inspección determinan el FOV. Hay que asegurarse que el FOV envuelve perfectamente el objeto que se quiere inspeccionar.

Cuando se conoce el FOV, se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar la resolución del sensor:

$$\text{Resolución del sensor} = \frac{\text{FOV}}{\text{resolución}} \times 2$$

$$\text{Resolución del sensor} = \frac{\text{FOV}}{\text{tamaño de la propiedad más pequeña}} \times 2$$

Se debe considerar que el FOV y el tamaño de la propiedad más pequeña tengan las mismas unidades.

Las cámaras comerciales son manufacturadas con una limitada resolución de sensores. La tabla 3 muestra los típicos sensores de cámara y sus resoluciones.

Tabla 3. Sensores típicos de cámara y sus resoluciones.

Pixeles CCD	FOV	Resolución
640 x 480	60 mm	0.185 mm
768 x 572	60 mm	0.156 mm
1280 x 1072	60 mm	0.093 mm
2048 x 2048	60 mm	0.058 mm
4000 x 2624	60 mm	0.030 mm

3. *Distancia Focal de la Lente.* La característica que define las lentes comerciales es su distancia focal. En la Figura 34 nos muestra la relación en la distancia focal de la lente, el campo de visión (FOV), tamaño del sensor y la distancia de trabajo.

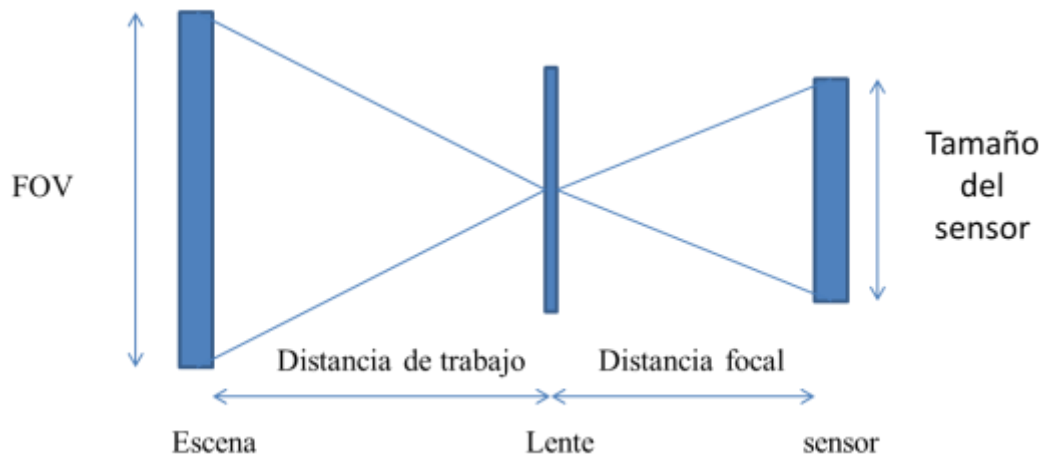


Figura 34. Relación entre la Distancia Focal, FOV, Tamaño del Sensor y la Distancia de Trabajo.

Si se conoce el FOV, el tamaño del sensor y la distancia de trabajo, es posible calcular la distancia focal con siguiente ecuación:

$$\text{Distancia focal} = \frac{\text{Tamaño del sensor} \times \text{Distancia de trabajo}}{\text{FOV}}$$

Las lentes son manufacturadas con un limitado número de distancias focales las cuales son: 6 mm, 8 mm, 12.5 mm, 25 mm y 50 mm. Una vez seleccionado la distancia focal más cercana a la deseada en la aplicación será necesario ajustar la distancia de trabajo para tener el objeto de inspección bien enfocado.

Aquellas lentes con distancias focales menores a 12 mm producen imágenes con cierto nivel de distorsión.

4. *Contraste*. La resolución y el contraste son factores muy relacionados con la calidad de la imagen. El contraste se define como la diferencia en valores de intensidad que existen entre el fondo y la imagen. Para poder hacer mediciones correctas, el sistema de visión debe de tener el suficiente contraste para distinguir objetos sobre el fondo. Las técnicas de iluminación pueden incrementar el contraste del sistema.
5. *Profundidad del Campo*. La profundidad del campo de la lente es la habilidad para conservar el enfoque de objetos de diferentes dimensiones a diferente distancia con relación a la cámara. Es posible incrementar la profundidad de campo por medio de cerrar el iris de la lente y administrando la luz apropiada.
6. *Perspectiva*. Los errores de perspectiva ocurren cuando el eje de visión no es perpendicular al objeto de inspección. Es decir que la cámara no está alineada correctamente con relación al objeto que se desea medir.
7. *Distorsión*. Es una aberración geométrica causada por errores ópticos en el lente de la cámara. Un lente de típico de cámara produce una distorsión radial. Esta causa que los puntos que son lejanos al centro óptico de la lente aparezcan más lejanos de lo que realmente están. Cuando una distorsión ocurre, la información obtenida de la imagen es posicionada en forma errónea en una distancia relativa con respecto al centro del campo de visión, pero la información no está completamente pérdida, es posible adaptar calibraciones espaciales para corregir ese error.
8. *Iluminación*. Este es uno de los aspectos más importantes a considerar para adecuar el ambiente de visión. Las imágenes que se adquieren de un sistema de visión correctamente iluminado hacen que el procesamiento de las mismas sea más rápido y más fácil. El objetivo de la iluminación es diferenciar el objeto a medir con varios niveles en la escala de grises como sea posible en relación al fondo de la imagen.

Otro objetivo importante es controlar la luz natural del ambiente de visión, como la que se produce por el tipo de clima y la variación de la luz solar que se produce al paso de las horas.

Al cuidar los puntos anteriores se puede garantizar el éxito de nuestra adquisición de imágenes y su respectivo procesamiento. Lo anterior permitirá obtener mediciones exactas y con un alto grado de precisión.

2.8.1 Procesamiento de Imágenes.

Los VIs de NI Vision se dividen en tres categorías: Vision Utilities, Image Processing y Machine Vision.

La categoría de Vision Utilities permite crear y manipular imágenes que permiten cubrir las necesidades de la aplicación. En esta categoría se incluyen VIs para administrar y manipular imágenes, manejo de archivos, calibración, y la selección de la región de interés.

Es posible analizar, usar filtros, y procesar imágenes de acuerdo a las necesidades de la aplicación, para realizar estas funciones se usan los VIs de Image Processing. En esta categoría se incluyen VIs para análisis, procesamiento de imágenes binarias y en escala de grises, procesamiento de color, procesamiento de frecuencia, filtrado, morfología y operaciones sobre las imágenes.

Se pueden usar los VIs de Machine Vision para realizar labores de inspección, que incluyen detectar presencia y ausencia de elementos de una imagen y para medir dimensiones de los elementos y comparar dichos resultados con las especificaciones de los mismos. Es decir es posible medir una pieza en una imagen y decidir si pasa o no pasa los controles de calidad. Ejemplos de estas funciones son: Caliper VIs y Coordinate System VIs.

Las funciones más utilizadas en el procesamiento de imágenes son las de Edge Detection, que permiten detectar bordes en las imágenes. Los resultados de esta operación nos permiten identificar posiciones de los bordes y también permite que sea posible medir la distancia entre objetos.

Otra función ampliamente utilizada es la de Gauging, con la cual es posible medir distancias y ángulos de un objeto. Esta función permite establecer marcadores en un objeto y calcular la posición, ángulo y distancia entre los mismo y compararlas con la tolerancia definida por el usuario.

La función Pattern Matching que también es de las más usadas, permiten detectar presencia y ausencia de objetos, número y ubicación de patrones definidos por el usuario.

Dentro de estas funciones también esta Particle Analysis, que permite localizar partículas binarias, orientación, área, perímetro y coordenadas x,y de algún centro de masa.

Y la última de las más utilizadas es la función de Statistics, con la cual es posible obtener una representación estadística de una imagen, el resultado de esta función es una imagen representada con valores numéricos que representa el histograma de la intensidad de los pixeles en la imagen original. Lo anterior permite evaluar la calidad de una imagen en la relación a su enfoque e iluminación.

2.8.2 Mejoramiento de las Imágenes Adquiridas.

El objetivo de mejorar las imágenes adquiridas es facilitar el procesamiento de imágenes por medio de la corrección de errores de perspectiva, errores de distorsión, entre otros.

Una de estas funciones es la calibración espacial (Spatial Calibration por traducción al inglés) que es el proceso de transformar pixeles a unidades del mundo real, tomando en cuenta errores inherentes al ajuste del sistema de visión. Este es un proceso muy

importante, debido a que siempre es necesario obtener resultados de medición en unidades reales y no en píxeles.

Otras funciones que permiten mejorar las imágenes son los filtros espaciales que tienen diferentes propósitos, tales como detectar bordes a lo largo de una dirección, contorno de patrones, reducción de ruido, detallado y suavizado de imágenes.

2.8.2.1 Calibración espacial.

Una imagen contiene información en forma de píxeles. Una calibración espacial permite traducir las unidades de medida de píxeles a unidades físicas. Esta conversión puede ser una simple conversión lineal entre píxeles y unidades del mundo real, o puede ser una conversión no lineal si existen errores de perspectiva y/o distorsión provocada por la lente.

Errores de perspectiva y errores de la lente pueden provocar que la imagen salga distorsionada. Esta distorsión colocar de manera incorrecta la información en una imagen, esto no significa que todo está perdido. La calibración contabiliza los errores por medio de la construcción de asignaciones que se pueden usar para convertir los píxeles a unidades físicas. Con esto es posible corregir errores de perspectiva y errores no lineales de distorsión.

Lo anterior se puede lograr por medio visualizar un patrón o por medio de puntos de referencia. Una plantilla de calibración es una retícula de puntos definidos por el usuario, la cual es procesada por el sistema de visión, como esa plantilla es definida por el usuario, este último sabe cuál es la distancia entre los puntos y con eso es posible hacer ajustes en la imagen del objeto a medir.

2.8.2.2 Filtros espaciales.

Los filtros espaciales alteran los valores de los píxeles con respecto a las variaciones de la intensidad luminosa en su vecindad. La vecindad de un píxel es definida por el tamaño de una matriz o máscara, centrada con el mismo píxel. Estos filtros suelen ser sensibles a la presencia o ausencia de variaciones de la intensidad luminosa.

Los filtros pueden ser de dos tipos: lineales (conocidos como convolución) y no lineales. Los filtros lineales reemplazan cada píxel por una suma ponderada de sus vecinos. La matriz que define la vecindad de un píxel también contiene información sobre el peso asignado a cada píxel vecino. Esta matriz es llamada el kernel de convolución. Un filtro no lineal reemplaza cada píxel con el valor de una función no lineal de los píxeles que lo rodean. Igual que los filtros lineales, los filtros no lineales operan en la vecindad.

Tabla 4. Tipos de filtros espaciales.

	Pasa Bajas	Pasa Altas
Lineales	Gaussiano Suavizado	Gradiente Laplaciano
No lineales	Pasa bajas Mediano N-ésimo Orden	Diferenciación Gradiente Prewitt Roberts Sigma Sobel

A su vez los filtros lineales y no lineales se dividen en dos categorías:

1. *Filtros Pasa Altas.* Estos filtros enfatizan variaciones significativas de la intensidad luminosa generalmente encontradas en la periferia de los objetos. Los filtros de frecuencias pasa altas ayudan a aislar patrones de variación abruptos como los correspondientes a orillas filosas, detalles y ruido.
2. *Filtros Pasa Bajas.* Se usan para atenuar variaciones de la intensidad luminosa. Los filtros de frecuencias pasa bajas ayudan a enfatizar gradualmente patrones variantes

como objetos y su fondo. Estos tienen la característica de suavizar imágenes por medio de la eliminación de detalles y orillas borrosas (blurring edges por su traducción al inglés).

2.8.2.3 Kernels de convolución.

Un kernel de convolución define un filtro de dos dimensiones que se puede aplicar a una imagen en escala de grises. Un kernel es una estructura 2D cuyos coeficientes determinan las características del filtro de convolución que lo representan. En una operación típica de filtrado, los coeficientes del kernel de convolución determinan el valor filtrado de cada píxel en la imagen. NI Vision permite al usuario crear sus propios kernels de convolución de tal manera que se pueden crear filtros personalizados para procesar imágenes, a su vez nos permite seleccionar filtros previamente definidos para cada tarea.

2.8.3 Medición de Propiedades.

Para realizar medición de propiedades como: medición de intensidades, medición de distancias, localizar bordes, encontrar patrones, medición de ángulos entre otras características se usan los VIs de Machine Vision.

Los VIs de Machine Vision también tienen la característica de ser programas de bajo nivel, utilizados para una amplia gama de funciones como son las mediciones de partes, conteo de elementos, detección de temperatura y para identificar diferentes formas y tamaños.

Estos VIs son útiles para aplicaciones en la industria automotriz, telecomunicaciones, farmacología y en pruebas en la industria manufacturera.

2.8.3.1 Región de interés.

Varias aplicaciones de la visión por computadora se caracterizan por la identificación propiedades y objetos en una imagen. Para cumplir con esta tarea se usan las herramientas de NI Vision, pero estas herramientas normalmente agregan el efecto de los alrededores, es decir elementos del fondo pueden ser considerados como objetos de medición, esto sucede en el caso de no tener buena iluminación y aún así considerando de que la iluminación haya sido la adecuada la aplicación de un filtro de manera incorrecta puede hacer que aparezcan objetos o elementos que no hayan sido considerados anteriormente.

Considere el ejemplo de Figura 35, para el cual se desea hacer un conteo de círculos en la imagen, la herramienta a utilizar tratará de buscar cualquier círculo que cumpla con la descripción previamente definida.



Figura 35. Ejemplo de una pieza a inspeccionar.

Si posteriormente se desea saber si un círculo está presente o no, sería necesario decirle a la herramienta de visión en donde buscar. Por lo que la región de interés (ROI por sus siglas en inglés) es un área de la imagen en la que se desea enfocar el análisis sobre la imagen. Todas las herramientas de visión pueden definir una ROI para refinar una búsqueda de elementos.

Las herramientas de visión operan más rápidamente cuando el área de inspección es pequeña. Una ROI se puede definir de forma interactiva a través de una selección con el mouse, o de forma programática por medio del uso de funciones.

2.8.3.2 Traslapes no destructivos.

Un traslape no destructivo permite realizar anotaciones en una imagen con información relevante sin modificar la imagen. Se puede traslapar texto, líneas, puntos, figuras geométricas y mapas de bits encima de la imagen sin alterar los píxeles de la imagen que están por debajo, solo la imagen resultante es afectada.

Los traslapes no destructivos se pueden usar para resaltar objetos de una imagen cuando esto hayan sido detectados, también se puede utilizar para agregar información cualitativa o cuantitativa, tal y como el resultado de un patrón de coincidencia. Es posible a su vez hacer el despliegue de alguna retícula o marcas de alineación.

2.8.3.3 Detección de bordes.

La detección de bordes permite identificar de forma clara los límites de un objeto. Los bordes representan discontinuidades en una imagen. Cuando esta herramienta localiza los bordes en una imagen, la información resultante se puede utilizar para calcular distancias entre ellos u otra propiedad geométrica. Debido a que la detección de bordes trabaja en datos de una sola dimensión, es muy fácil de encontrar áreas donde hay cambios de la intensidad luminosa sobre la imagen.

Un borde está definido como un cambio significativo en la escala de grises de píxeles adyacentes en una imagen. La detección de bordes de NI Vision trabaja en un perfil unidimensional de valores de píxeles a lo largo de la región de búsqueda. Dicha búsqueda unidimensional puede arrojar como resultado una línea, el perímetro de un círculo o una elipse, la frontera de un rectángulo o un polígono. La herramienta detecta perfiles cuyos píxeles presentan variaciones significativas en su intensidad.

Es posible especificar propiedades para determinar qué cambios de intensidades constituyen un borde. Estas propiedades pueden ser:

1. *Fuerza del borde*, que define la mínima diferencia en los valores de la escala de grises entre el fondo y el borde.
2. *Longitud del borde*, o la distancia máxima en la que la deseada diferencia de la escala de grises entre un borde y el fondo debe ocurrir.
3. *Polaridad del borde*, que implica la distinción de que si un borde aparece o desaparece (define cuando inicia y cuando termina un borde).
4. *Posición del borde*, muestra las coordenadas x, y del borde con relación a la imagen.

Estos parámetros se pueden utilizar para definir de manera programática los criterios para localizar bordes en diferentes ambientes de imágenes.

2.8.3.4 Métodos para la detección de bordes

Las herramientas de NI Vision proveen dos maneras de llevar cabo la detección de bordes: Detección de Bordes Sencilla (Simple Edge Detection por su traducción al inglés) y Detección Avanzada de Bordes (Advance Edge Detection por su traducción al inglés). Ambos métodos calculan la intensidad de cada pixel a lo largo de un perfil unidimensional, un borde es detectado cuando la intensidad de los pixeles que conforman el borde es más grande que la intensidad mínima, es decir ocurre una diferencia significativa entre los pixeles del objeto comparados con los del fondo.

- **Detección de bordes sencilla**

El programa usa el valor del pixel en cualquier punto a lo largo de un perfil previamente identificado para definir la intensidad del borde en ese punto. Para localizar un punto en un borde, el programa escanea el perfil definido pixel por pixel de principio a fin.

Un borde ascendente es detectado cuando el primer punto en el que el valor de pixel es más grande que el valor umbral más el valor de la histéresis. Es necesario definir el valor de umbral para definir la mínima intensidad requerida para distinguir bordes. El valor de la histéresis es usado para declarar diferentes intensidades que van desde los bordes ascendentes hasta los bordes descendentes. Cuando un borde ascendente es detectado, el programa busca por un borde descendente. Un borde descendente es detectado cuando el valor de la intensidad de un pixel cae por debajo del valor umbral previamente especificado. Este proceso se repite hasta el final del perfil del pixel. El método de detección de bordes sencilla funciona mejor cuando la imagen presenta poco ruido y existe una clara distinción entre el objeto y el fondo.

- **Detección avanzada de bordes**

Para calcular la intensidad del borde en un punto dado a lo largo de un perfil de pixel, el programa promedia los pixeles antes y después del punto analizado. Los pixeles que son promediados después del punto pueden estar ubicados a cierta distancia del punto, que se define por medio del parámetro steepness. Este número corresponde a la transición esperada en la región del perfil de pixel. Se puede definir el número de pixeles promediados antes y después del punto de interés por medio del parámetro Ancho del Filtro (Filter Width por su traducción al inglés). Después de calcular el promedio, el programa calcula la diferencia entre estos promedios para determinar el contraste. Una operación de filtrado reduce los efectos del ruido a lo largo del perfil.

2.8.3.5 Exactitud a nivel de subpixel

Cuando la resolución de una imagen es lo suficientemente elevada, la mayoría de las aplicaciones de medición de parámetros son muy exactas debido a que estas usan resolución en el orden de pixeles. Sin embargo, en algunas ocasiones es difícil obtener la mínima resolución requerida por el sistema de visión debido a sus límites como lo son el tamaño del sensor disponible en el mercado o por el costo de la aplicación. En estos casos, se necesita encontrar posiciones de los bordes con exactitud de subpixel.

El análisis de subpixel es un método programático que calcula los valores de pixel que un sistema de imágenes de mayor resolución podría proporcionar. Para calcular la localización de un borde con precisión de subpixel, el programa de detección de bordes debe contar con una función de interpolación de más alto orden, como una función cuadrática o una cúbica, para los datos de intensidad de los pixeles.

La función de interpolación provee el algoritmo de detección de bordes con valores de intensidad de los pixeles entre los valores de los pixeles originales. El programa posteriormente usa la información de intensidad para encontrar la ubicación de un borde con exactitud de subpixel.

Con los componentes de un sistema imágenes y las herramientas de software de hoy en día, es posible estimar exactitudes de hasta una cuarta parte de pixel. Sin embargo los resultados dependen ampliamente de la configuración del sistema de visión, como la iluminación y los lentes de las cámaras. Antes de usar este método es mejor tratar de incrementar la resolución de la imagen a ser analizada.

2.8.3.6 Detectores de bordes

NI Vision incluye varios detectores de bordes predefinidos basados en una detección punto a punto. Estos detectores de bordes incluyen rastreo horizontal o vertical, concéntrico y hablado (definido por el usuario). Se pueden utilizar estos detectores de bordes en un área específica.

Para poder aplicar esta herramienta es necesario tener una imagen binaria que haya sido obtenida por nuestro sistema de visión, en términos coloquiales se puede decir que se ocupa una imagen en blanco y negro con el propósito de medir propiedades de un objeto. Para cumplir con lo anterior se usó la imagen de la Figura 36, que es la representación de imagen de la Figura 35 en escala de grises.

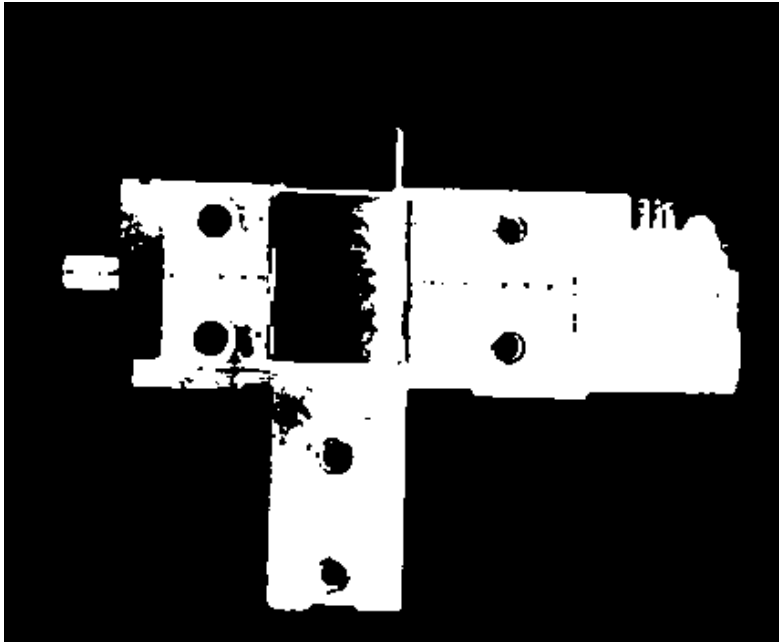


Figura 36. Imagen binaria resultado de la conversión de la imagen de la Figura 35 a su equivalente en escala de grises.

En la Figura 36 se observan ciertas discontinuidades, algunos círculos se ven más claros y mejor formados que otros, eso se debe a iluminación que se tuvo en el ambiente de visión y queda como resultado algunas deformaciones, pero aun así es posible hacer mediciones.

Para obtener una imagen en escala de grises a partir de una imagen a color es necesario aplicar la operación de umbral de color (color threshold por sus siglas en inglés) que da como resultado una imagen binaria de 8 bits. Después si es necesario resaltar algunas propiedades de la imagen se pueden aplicar filtros, para este caso este caso se usó un suavizado-mediano (smoothing-median por sus siglas en inglés) y finalmente un ecualizado.

Ahora con esto es posible usar las herramientas de detección de bordes para lo cual tenemos:

1. *IMAQ Find Vertical Edge* permite localizar un borde vertical en un área búsqueda. Se recomienda utilizar esta herramienta cuando se tienes angulosidades mayores a

45 °. Esta herramienta localiza puntos de intersección entre un arreglo de líneas paralelas de búsqueda, los puntos de intersección son determinados por su contraste y pendiente.

2. *IMAQ Find Horizontal Edge* que permite localizar un borde horizontal en un área previamente definida. Se recomienda usar esta herramienta cuando se tienen angulosidades menores a 45°. En la Figura 37 se muestra un ejemplo de esta operación.

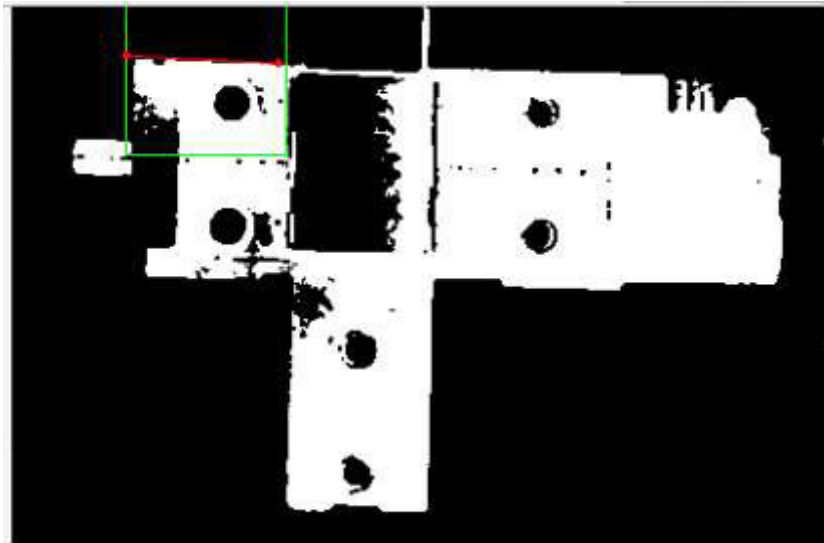


Figura 37. Ejemplo de la localización de un borde horizontal.

En la Figura 37 se observa que el área de búsqueda es el recuadro y el borde localizado es la línea central.

3. *IMAQ Find Circular Edge* localiza un borde circular en área específica. En esta herramienta se localizan puntos de intersección con relación a líneas de búsqueda concéntricas y al igual que los métodos anteriores los puntos intersección son determinados por su contraste y su pendiente. En la Figura 38 se muestra un ejemplo de esta operación.



Figura 38. Ejemplo de localización de un borde circular.

En la Figura 38 se observan tres circunferencias donde el borde circular encontrado es representado por la circunferencia central, las líneas de búsqueda parten de la primera circunferencia hacia la tercera.

2.8.3.7 Sujeción.

Las funciones de sujeción (clamping por su traducción en inglés) utilizan las funciones de detección de bordes para medir la distancia entre dos bordes. Las funciones de sujeción encuentran bordes a partir de una región de búsqueda rectangular, dichas funciones calculan la distancia entre el primer y el último borde encontrado.

Estas funciones son:

1. *IMAQ Clamp Horizontal Max* que mide la distancia en la dirección horizontal por los lados verticales del área de búsqueda hacia el centro de la misma. Esta función localiza bordes a través de un arreglo de líneas paralelas de búsqueda, dichos bordes son determinados por su contraste y pendiente. En la Figura 38 se muestra un ejemplo.

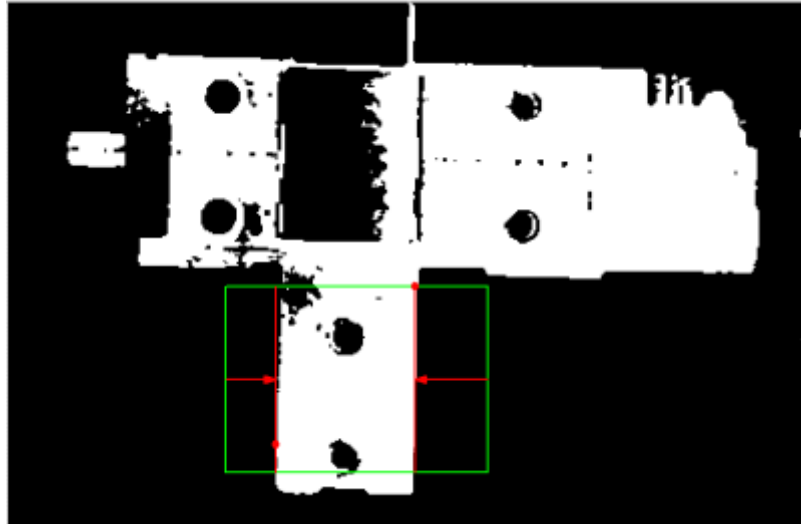


Figura 39. Ejemplo de una sujeción horizontal.

En la Figura 39 se observa que la región de búsqueda es el rectángulo y los bordes a medir son los indicados por las flechas.

2. *IMAQ Clamp Vertical Max* mide la distancia en la dirección vertical por los lados horizontales de un área de búsqueda hacia el centro de la misma. Esta función es muy similar a la anterior, por lo que también existen líneas paralelas de búsqueda y los bordes son encontrados acorde a su contraste y pendiente.

En este trabajo se usaron primeramente las herramientas de mejoramiento de imágenes adquiridas una vez que las imágenes fueron transformadas a imágenes de 8 bits, tales como los filtros (el filtro no lineal de Roberts), también se usaron herramientas de detección de bordes y la encontrar círculos.

Las herramientas anteriormente mencionadas se basaron en el uso del módulo de Vision Assistant de National Instruments el cual permitió de forma automatizada generar un VI que se adecuaba a las necesidades de procesamiento de imágenes requeridas en la aplicación.

Capítulo 3 Desarrollo Experimental

3.1 Incorporación de Cuarto Eje a la Máquina CNC de Tres Ejes

Con la información obtenida por parte del fabricante se procedió con la instalación de la tarjeta controladora independiente. Una vez instalada esta se dio de alta el sistema como una HRT (como si se tuviese un solo eje rotativo), debido a que el quinto eje no puede darse de alta de esta manera, tal y como se menciona en la sección 2.1 de este documento.

Una vez instalado el cuarto eje se procedió a generar una pieza que cumpla con los requisitos de maquinado de 4 ejes simultáneos. Se decidió elaborar una pieza siguiendo los pasos de la Figura 40. Para el diseño de la pieza se usó el software de diseño Solidworks 2008 y las operaciones de maquinado se generaron con la ayuda del Mastercam X3.

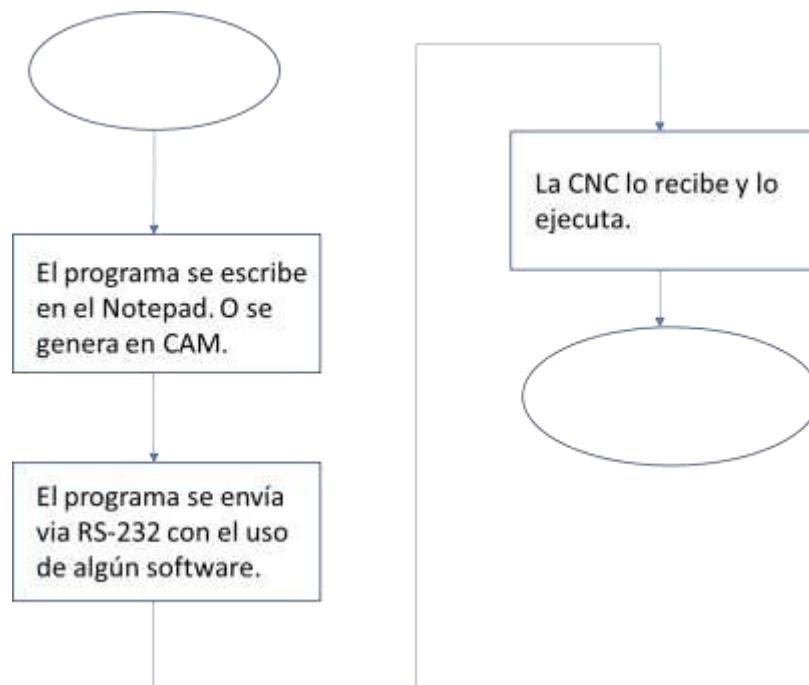


Figura 40. Proceso convencional de CAD-CAM.

El proceso de maquinado como el de la Figura 41, fue simulado varias veces en el Mastercam X3, posteriormente fue simulado en el software de la HAAS VF-2 donde se presentaron problemas en la ejecución. El problema radicó básicamente en el código GM generado excedía las velocidades corte permitidas por nuestro sistema CNC. Dicho problema fue resuelto al hacer unos ajustes en el post-procesamiento del Mastercam X3.

Resuelto el problema anterior el siguiente paso fue analizar los movimientos de maquinado en la HAAS VF-2. Se observó que existía un problema con ceros de trabajo con respecto a la materia prima (stock). Esto se resolvió con un reajuste de los desplazamientos en el centro de maquinado, es decir hubo la necesidad de modificar los ceros de trabajo.

Una vez de que la materia prima estaba lista, se obtuvo la primera prueba de maquinado, en la cual se observó que hubo problemas de sujeción de la pieza y no se obtuvo el resultado esperado como se muestra en la Figura 41a. Para atender esta situación fue necesario adecuar la materia prima para la operación de maquinado, a la cual se le tuvo que hacer dos barrenos para fijar la pieza al eje al TRT-160 por medio de tornillería. El resultado de esto fue la segunda prueba de maquinado de la Figura 41b, la cual fue una prueba exitosa operación sincronizada de cuatro ejes, de acuerdo con la inspección visual realizada.

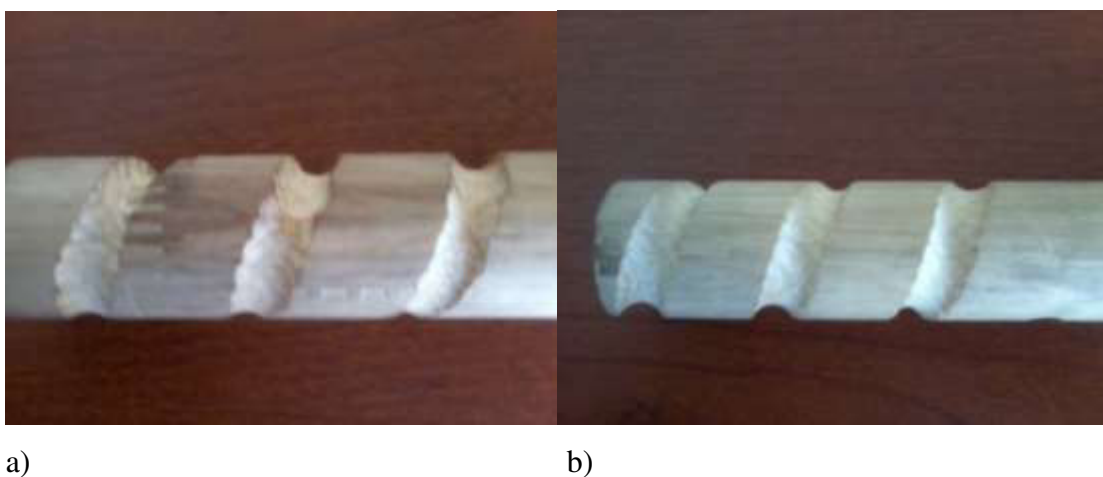


Figura 41. a) Primera prueba de maquinado con el cuarto eje. b) Segunda prueba de maquinado con el cuarto eje.

Con el experimento anterior se observa la necesidad de tener un sistema de sujeción muy similar al que se utiliza en un torno CNC, lo anterior para poder adecuar diferentes formas y tamaños de la materia prima. Se sugiere el uso de un contrapunto y un chuck tipo torno CNC.

En este experimento se usaron materia prima en forma cilíndrica, para poder maquinar en forma simultánea con cuatro ejes, al tener un chuck tipo torno se podrían sujetar diferentes tipos de formas, el tamaño estaría limitado a lo que se pueda sujetar en este chuck. En la Figura 42 se observa el proceso antes a) y después de resolver el problema de la sujeción b).



Figura 42. a) Proceso de maquinado de la primera prueba. b) Proceso de maquinado con sujeción de la segunda prueba.

3.2 Incorporación del Quinto Eje a la Máquina CNC de Tres Ejes

En lo que respecta a la operación de sincronización del quinto eje se empezó con la prueba de la interfaz RS-232 a través del software de Labview. La primera prueba fue elaborar un rutina que envié programas de la PC a la máquina CNC como fue el caso de la Figura 43, en el cual una vez que ejecuta el programa este abre el explorador de Windows para permitir la búsqueda de un programa CN o archivo de texto (.txt), después en el cuadro de longitud de texto se muestra la cantidad de caracteres que tiene el archivo recién abierto y al presionar inicio el programa es enviado a la máquina CNC una vez que esta haya sido habilitada.

El siguiente paso fue buscar la manera de que la CNC permitiese comunicación por medio de entradas y salidas digitales, una aproximación fue el uso de la instrucción M96 para lectura de entradas digitales ya conectadas en la máquina CNC y como salida se encontró las interfaces de usuario M21-M25 que son relevadores de propósito general de 12 volts.

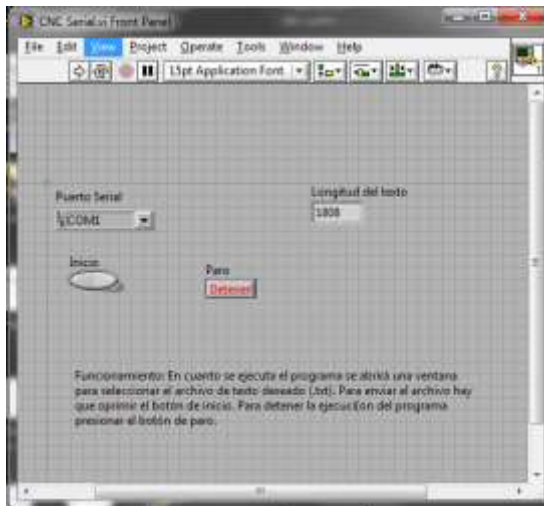


Figura 43. Prueba de la interfaz RS-232 a través de Labview.

Una salida digital M21 y la entrada digital conocida como M-FIN fueron cableadas al controlador de servomotores de HAAS. El objetivo de lo anterior fue que por medio de programa principal de código GM estableciera comunicación con una rutina pre-programada en el controlador HAAS.

Como etapa a seguir se programaron de manera independiente el controlador para servomotores HAAS y la máquina CNC. El programa principal en la CNC utilizó un llamado a una subrutina que mandaba a ejecutar una cierta cantidad de veces el controlador para servomotores. Posteriormente se analizó la estructura de un programa con coordenadas de quinto eje y se observó que este no podría ser leído por la máquina CNC. Debido a esto se decidió elaborar un programa convertidor de código que transformara las coordenadas de quinto eje a instrucciones entendibles por nuestro sistema. Para lograr lo anterior se elaboró el programa de la Figura 44 en Labview.

El programa de la Figura 43, es una rutina que permite leer y escribir en la interfaz RS-232, aunque no lo hace en forma simultánea, dicha acción la hace por medio de un interruptor en el panel de control. En la entrada de texto (write buffer) se escribe el programa que se desea que lea nuestro sistema CNC, dicho programa puede contener instrucciones que involucren hasta 5 ejes sincronizados.

El programa mencionado anteriormente debe estar habilitado para escribir al puerto serie de lo contrario la conversión no sería procesada. En la cadena resultante (result string) se muestra el resultado de la conversión, para la cual una coordenada de quinto eje es cambiada por una llamada a subrutina que se ejecutará L veces, dependiendo del valor de la coordenada de quinto eje en cuestión. Por ejemplo en el código se encuentra una B45 este sería cambiado por un llamado a subrutina que se ejecutaría 45 veces. Aquí se puede ver que es necesario que el controlador para servomotores este programado para moverse un grado por cada señal recibida.

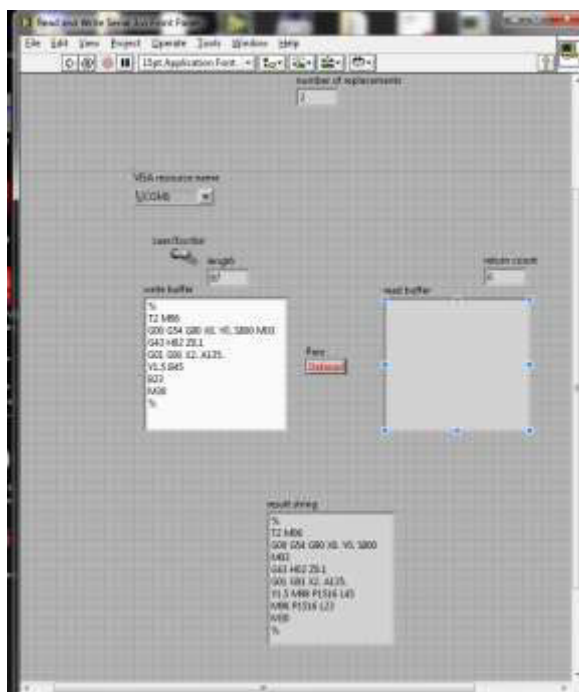


Figura 44. Programa convertidor de código de 5 ejes a 4 ejes.

El resultado de la prueba del convertidor de código fue el esperado, pero se observaron ciertas limitantes, este programa generado en Labview solo es capaz de interpretar coordenadas de quinto eje que sean positivas y se ve la clara necesidad de

trabajar con el sistema de coordenadas incrementales. Por la parte de los movimientos de los ejes se observa que no existe sincronía alguna en los movimientos.

De lo anterior se optó por revisar la documentación por parte del fabricante y se observó que es necesario esperar un cierto tiempo después de que se ejecute un ciclo en el programa del controlador para servomotores. Habrá la necesidad que nuestro control del programa principal estime esos retardos en el tiempo para poder hacer la adecuada sincronización. Por otra parte será necesario que nuestra ejecución del programa principal espere a que el controlador termine de hacer su trabajo antes de seguir ejecutando el programa principal.

3.2.1 Métodos de Sincronización del Quinto Eje

Como se mencionó anteriormente existe un problema de sincronización del quinto eje por el cual no se ha podido agregarse de forma exitosa, en esta sección hablaremos de los métodos posibles con los se permitirá adecuar el quinto eje de la mejor manera con los materiales y equipos que existen en la Universidad.

Cabe mencionar que para cada método es necesario usar el convertidor de código presentado en el avance 4 con ligeras modificaciones para cada caso. Como primer método (Figura 45) la CNC manda a llamar subrutinas tantas veces como sea la cantidad de grados a mover el 5to eje, en este método es necesario que el controlador este programado para moverse un grado por cada pulso que obtenga de la CNC, también se requiere de sensores externos, ajustes de tiempos que le permitan lograr una sincronización efectiva. De lo último es necesario anticiparse a los tiempos en el que el controlador termina un ciclo y espera a ejecutar el siguiente, dichos tiempos pueden ser programados en la CNC. El requerimiento de sensores externos es para determinar el fin de carrera de cada movimiento con el propósito de que la CNC no se adelante en la ejecución de instrucciones mientras el 5to eje aun este en movimiento.

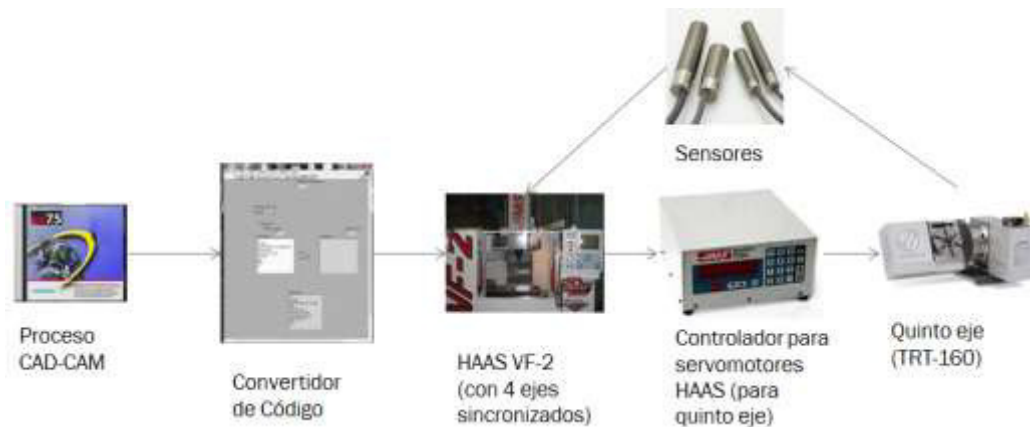


Figura 45. Método 1 para la sincronización del quinto eje.

Para el segundo método (Figura 46) se usa la CNC con macros habilitadas lo que permite a la CNC enviar la cantidad de grados que se desee mover el quinto eje por medio RS-232. Adicionalmente el controlador tiene que estar en modo remoto que le permita ejecutar instrucciones en cuando las reciba, esto último permite hacer cambios de velocidades y la sincronización se lleva a cabo por el M-FIN lo que elimina el uso de sensores externos y el ajuste de tiempos de sincronización.

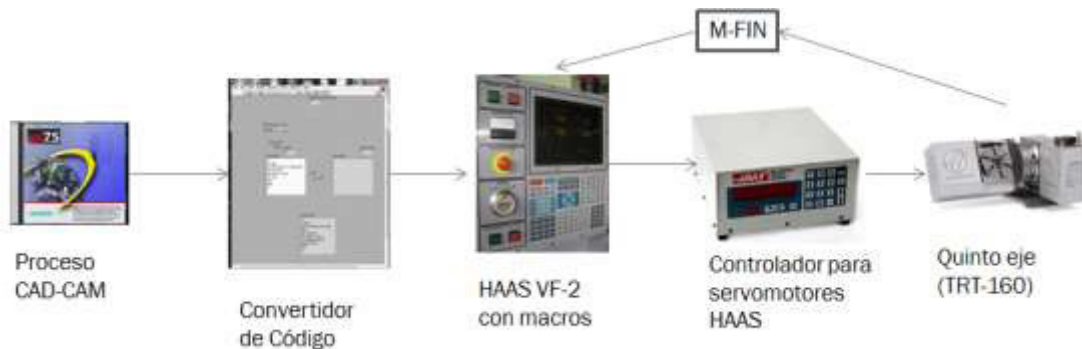


Figura 46. Método 2 para la sincronización del quinto eje.

El tercer método (Figura 47) se caracteriza por no utilizar el controlador HAAS, el cual es remplazado por un microcontrolador que funciona como interfaz entre la CNC y el quinto eje. Este método permite recibir información por parte de la CNC y lo transforma a una señal de PWM proporcional a la información recibida que manipula el 5to eje. La sincronización se lleva a cabo por medio de la señal de M-FIN y requiere el uso de macros.

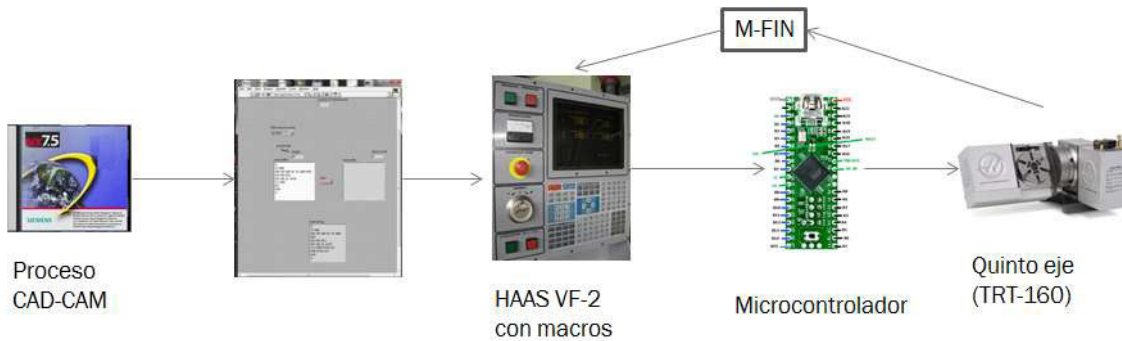


Figura 47. Método 3 para la sincronización del quinto eje.

3.2.2 Limitantes de los Métodos Propuestos.

Cada método propuesto tiene sus limitantes que han estado trabajando para poder minimizarlas.

Por ejemplo del método 1 la sincronización se vuelve inflexible ya que requiere hacer un cálculo previo de los tiempos de retardo y de ajuste de velocidades. Este método se limita a una sola velocidad de trabajo de la CNC para lo cual el controlador debe estar programado. Es decir es necesario que el controlador sea programado previamente teniendo como dato la velocidad con la que se desea trabajar cada uno de los ejes.

Del segundo método una desventaja es que requiere la compra del set macros disponibles para la HAAS VF-2 lo que permite hacer más flexible la programación en la CNC, ya que este le agrega funcionalidad de: condiciones if, ciclos do while, manejo de variables, manejo de RS-232 en modo Full Duplex, entre otras características. Otra desventaja de este método es que requiere la operación del controlador HAAS en modo remoto, y dado los resultados de las últimas pruebas no se ha podido implementar con éxito.

Como limitante del tercer método se tiene la necesidad del uso de macros, y es necesario abrir el controlador o el TRT-160 con el propósito de explorar el tipo de señales que maneja el quinto eje (el único dato disponible por parte del proveedor es que es un

servomotor sin escobillas), se desconoce la configuración de los conectores y datos técnicos como la frecuencia del PWM y rangos de operación del Duty Cycle. En esto último es lo que sigue trabajando, hasta la fecha se tiene una emulación física que sirve como prototipo para hacer la integración y se basa en esta propuesta (el método 3).

3.3 Incorporación de Ejes Adicionales a la Máquina CNC.

En esta sección se usaron varias herramientas para crear una interfaz humano-máquina que permite explorar los elementos de entrada-salida de la Fresadora Vertical CNC HAAS VF-2. Esto permite establecer los principios de automatización de la máquina CNC con elementos exteriores, tales como: bandas transportadoras, robots industriales, alarmas externas, actuadores electroneumáticos y/o electrohidráulicos. También con esto es posible establecer comunicación a través de una red industrial como: Device Net, Profibus, Fieldbus, entre otras.

Otra aplicación aún mayor sería poder integrar la máquina CNC a una Celda de Manufactura Flexible (CMS) como un caso de automatización de un conjunto de máquinas que engloban una función específica.

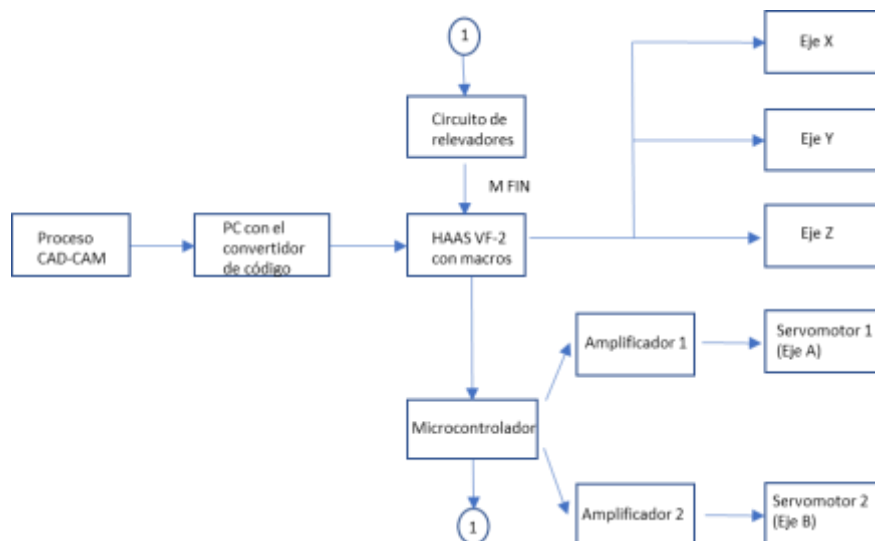


Figura 48. Interfaz Humano-Máquina Propuesta para Integración de los Ejes Rotativos.

Sin embargo el propósito principal es el de agregar dos ejes rotativos a la máquina CNC de 3 ejes antes descrita, el cuarto y quinto eje, para lo cual cabe mencionar que para este procedimiento no se usará el TRT-160 de la compañía HAAS, en lugar de eso se usará un mecanismo de creación propia para emular los ejes adicionales y también se usarán servomotores convencionales que se harán funcionar por la interfaz humano-máquina descrita en esta sección. En la Figura 48 se ve cómo es que se hace la integración de los ejes rotativos.

El primer bloque hace referencia al proceso CAD-CAM (por sus siglas en inglés); este se define como el proceso mediante el cual se utilizan los ordenadores o computadoras para mejorar la fabricación, desarrollo y diseño de los productos. Estos pueden fabricarse con mayor rapidez, precisión y/o menor precio, con la aplicación del software apropiado.

Los sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, acrónimo de Computer Aided Design) pueden utilizarse para generar modelos con varias características (en algunos casos todas las características) de un determinado producto. Estas podrían ser el tamaño, el contorno y la forma de cada componente, almacenados como dibujos en dos o tres dimensiones. Una vez que estos datos dimensionales han sido introducidos y almacenados en la computadora, el diseñador puede manipularlos o modificar las ideas de diseño con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo de producto. También es posible compartir o integrar ideas combinadas de varios diseñadores, esto se debe a que se pueden mover los datos a través de redes informáticas, con lo que los diseñadores e ingenieros situados en lugares distantes entre sí puede trabajar como equipo.

Cuando los sistemas CAD se conectan a equipos de fabricación también controlados por computadora conforman un sistema integrado CAD/CAM (CAM, acrónimo de Computer Aided Manufacturing).

La Fabricación Asistida por Computadora cuenta con grandes ventajas con respecto a los métodos tradicionales de controlar equipo de fabricación por medio de operadores humanos. En su gran mayoría de los casos, los equipos CAM permiten la eliminación de

errores del operador y la reducción de costos de mano de obra, otro factor importante, es la precisión constante y el uso óptimo de los cortadores.

El proceso empieza con la generación por medio del CAD, en este caso hay que dibujar una pieza que explote la necesidad de maquinados multilaterales para la cual una máquina CNC convencional de 3 ejes no es posible procesar. Para lo anterior se utilizó el software de NX 7.5 de Siemens.

NX es un Sistema de Desarrollo de Productos Digital que permite al usuario transformar el ciclo de vida del producto. Esta herramienta de software permite integrar y asociar de una manera completa aplicaciones CAD/CAM/CAE, NX también permite desarrollar los procesos de diseño, manufactura y simulación de productos.

Para empezar un dibujo de una pieza o producto es necesario contar con una intención de diseño para lo cual se puede tener una idea general de que es lo que se quiere hacer o simplemente tratar de reproducir algo que ya está hecho y que requiere ser manufacturado a una cierta escala. El primer paso dentro del software de NX 7.5 sería crear un sketch, para lo cual se pueden crear geometrías básicas usando las herramientas de sketch.

Cabe mencionar que para crear una pieza nueva .prt (archivo de un modelo o parte) es necesario estar en el módulo de Modeling, el cual aparece ya activado si especificamos desde el principio que vamos a crear un modelo de una pieza.

En el momento que empezamos a trazar un sketch partiendo de una geometría básica como un rectángulo, círculo, línea recta o forma libre (spline), el software nos pide que seleccionemos un plano en el que vamos a trabajar. Para facilitar el proceso de generación de código para el maquinado, es recomendable siempre empezar a trabajar a partir del plano xy, considerando con esto que la pieza estaría montada sobre la bancada xy, y también el cuarto y quinto eje.

Una vez creado el sketch se procede a extruir, cortar, redondear y/o revolver la pieza para darle la forma final deseada. Esto es considerado como los procedimientos básicos de CAD, pero para piezas complejas suele ser necesario crear más de un sketch y repetir n veces los pasos posteriores antes mencionados.

Con la pieza elaborada en el módulo de Modeling, el siguiente paso es crear las operaciones de maquinado, donde se obtendrá el programa de código numérico que permitirá maquinar la pieza en la Fresadora CNC.

Para crear las operaciones de maquinado nos desplazamos al módulo de Manufacturing del software NX 7.5, donde empezamos por definir el grupo de operaciones que se van realizar sobre la pieza. Los grupos más usados son: mill_planar, mill_contour, mill_multiaxis, drill, hole_making y turning.

El grupo de operaciones mill_planar es usado para generar procesos de maquinado sobre piezas planas, las operaciones que destacan son: careados, devastados, engravados, perfiles, devastados guiados, entre otras operaciones. Las operaciones de mill_contour son operaciones muy similares a las anteriores pero la diferencia es que aquí se pueden maquinar piezas que no son planas, dentro de estas operaciones encontramos cavidades, devastados de bordes, maquinados de superficies, engravados sobre superficies curvas y otras más. En mill_multiaxis generamos maquinados de piezas que requieren operaciones de fresado multilaterales también conocidas como multiejes, es aquí donde nosotros podemos generar programas de 4 ejes o más. Las operaciones de drill son para hacer barrenos, hole_making para hacer perforaciones y por último las de turning son para generar operaciones en tornos CNC, cabe mencionar que todas las anteriores a esta son operaciones que se hacen generalmente por Fresadoras CNC en particular las que empiezan con el nombre de mill.

Dada la necesidad de generar geometrías complejas que detonen maquinados multilaterales será necesario que nuestra pieza a generar tenga al menos una operación del conjunto de mill_multiaxis.

Una vez que ha generado el código numérico de la pieza a maquinar el siguiente paso de la Interfaz es el convertidor de código elaborado en Labview 2009. Esta fase de conversión se debe a que fresadora CNC HAAS VF-2 no tiene instalado los ejes rotativos (es el caso de estudio para esta sección), es decir que los ejes que se van habilitar no son nativos de nuestra máquina CNC, por lo que coordenadas alusivas a esos ejes generarían un error de compilación y nuestro programa no podría procesarse en nuestro sistema.

Para evitar el error de compilación se creó una rutina que reemplaza texto de la siguiente manera: cada vez que en el texto (programa en código numérico) se encuentre una coordenada A (hace referencia al cuarto eje) y/o una coordenada B (referente al quinto eje) el convertidor de texto reemplaza la letra por llamado a subrutina que se ejecutará tantas veces como la cantidad de grados a moverse el eje rotativo en cuestión.

Específicamente si el convertidor de código encuentra la coordenada A120 lo reemplazará por una instrucción M98 P9999 L120, que significa que nuestro código principal llamará a un subprograma llamado O9999 para ser ejecutado 120 veces. Dicho subprograma tendría que estar grabado previamente en la memoria de la máquina CNC. Este subprograma tendrá la función incrementar y desplegar una variable por RS-232 cada vez que este sea ejecutado. De tal manera que al final de la ejecución de las 120 veces tendríamos que el subprograma habrá de enviar al control del eje A que se mueva 120 grados. Posteriormente explicaremos como es que se elaboró esa acción de control.

Lo anterior puede ser expresado como sigue:

`G01 X4.5 Y2. Z0.5 A120`  `M98 P9999 L120`

Por lo que el código a ser ejecutado en la CNC quedaría:

`G01 X4.5 Y2. Z0.5 M98 P9999 L120`

El siguiente paso es definir qué es lo que debe contener el subprograma O9999 que permita interactuar con nuestra interfaz, para lo cual se plantea lo siguiente:

O9999

#102=#102+1

DPRNT[B#102[30]]; (Imprime B + la variable 102 en formato de 3 números enteros sin decimales).

(Salto condicional)

M99

Se tiene una variable que se incrementa y posteriormente se despliega vía RS-232. Por lo que nuestro sistema de control tiene que ser capaz de recibir información por el puerto serie, procesarla y realizar una acción que permita desplazar los ejes rotativos acorde a nuestras necesidades.

Del subprograma O9999 que se planteó anteriormente se observa que hay manejo de variables e impresión del puerto serie, dichas funciones no se encuentran disponibles en las fresadoras CNC convencionales de la marca HAAS, por lo que fue necesario activar ese nuevo conjunto de instrucciones denominado macros.

El conjunto de instrucciones macros es una característica opcional de las fresadoras CNC de la marca HAAS, por lo que es necesario contactar al proveedor para activarlas. El conjunto de instrucciones macros permiten agregar capacidades y flexibilidad al control que no son posibles con los códigos GM convencionales [26]. Algunas posibilidades son familia de partes, ciclos enlatados personalizados por el usuario, movimientos complejos y el manejo de dispositivos opcionales.

Entonces podemos definir que un macro es una rutina (o subprograma) que puede ejecutarse varias veces. Una instrucción macro puede asignar un valor a una variable (como el caso del O9999) o leer el valor de una variable, evaluar una expresión, también puede brincar a otro punto del programa de manera condicional o incondicionalmente y repetir una parte del programa. Por tal motivo el conjunto de instrucciones macro es ideal para las acciones de control que se necesitan en este trabajo de tesis.

La siguiente fase de nuestra interfaz es el controlador de los servomotores (ejes A y B respectivamente), dicho control es llevado a cabo por una tarjeta desarrolladora llamada Teensy ++ 2.0 de Atmel.

El Teensy es un Sistema de Desarrollo por Microcontrolador basado en la tecnología USB que tiene la característica de ser muy pequeño y es capaz de implementar varios proyectos. Toda la programación es llevada a cabo vía USB. No necesita un programador especial en comparación con los microcontroladores de la familia PIC16F y PIC18F de microchip, solo requiere un cable “Mini-B” USB y una computadora con puerto USB.

Otras características de la tarjeta desarrolladora Teensy es que puede ser programada por varios lenguajes de alto y bajo nivel, tales como: Basic, Ensamblador (usando el compilador de AVR), C, C++, Arduino y Labview. Por tal motivo esta fue el microcontrolador seleccionado en este trabajo, cabe mencionar que se usó el lenguaje de Arduino para la parte de programación y si hicieron algunas pruebas usando Labview 2009.

El programa desarrollado en la tarjeta Teensy ++ 2.0 es un programa que permite recibir información por el puerto serie. La información recibida es procesada y a su salida se obtienen señales de PWM proporcionales a la cantidad de grados que deseamos mover los ejes rotativos. Para agregar sincronización se manda a la Fresadora Vertical CNC un pulso cuando el microcontrolador ha mandado las señales a los ejes rotativos. A su vez el microcontrolador responde únicamente a 8 caracteres los cuales sería el número máximo a recibir en caso de que desee mover dos ejes simultáneos: por eje A120 B090 forman un total de 8 caracteres. El microcontrolador es capaz de distinguir entre A y B para mandar las señales apropiadas al servomotor correspondiente.

Una vez todo integrado se hicieron pruebas de comunicación para ver la simultaneidad de los movimientos para lo cual se usó la instrucción G102 que permite

mandar por RS-232 la posición actual del husillo, el programa a ejecutarse en la máquina CNC tuvo que modificarse para detectar los puntos finales de cada movimiento programado y se juntó con los datos de movimientos de los ejes adicionales y se obtuvo la Figura 49.

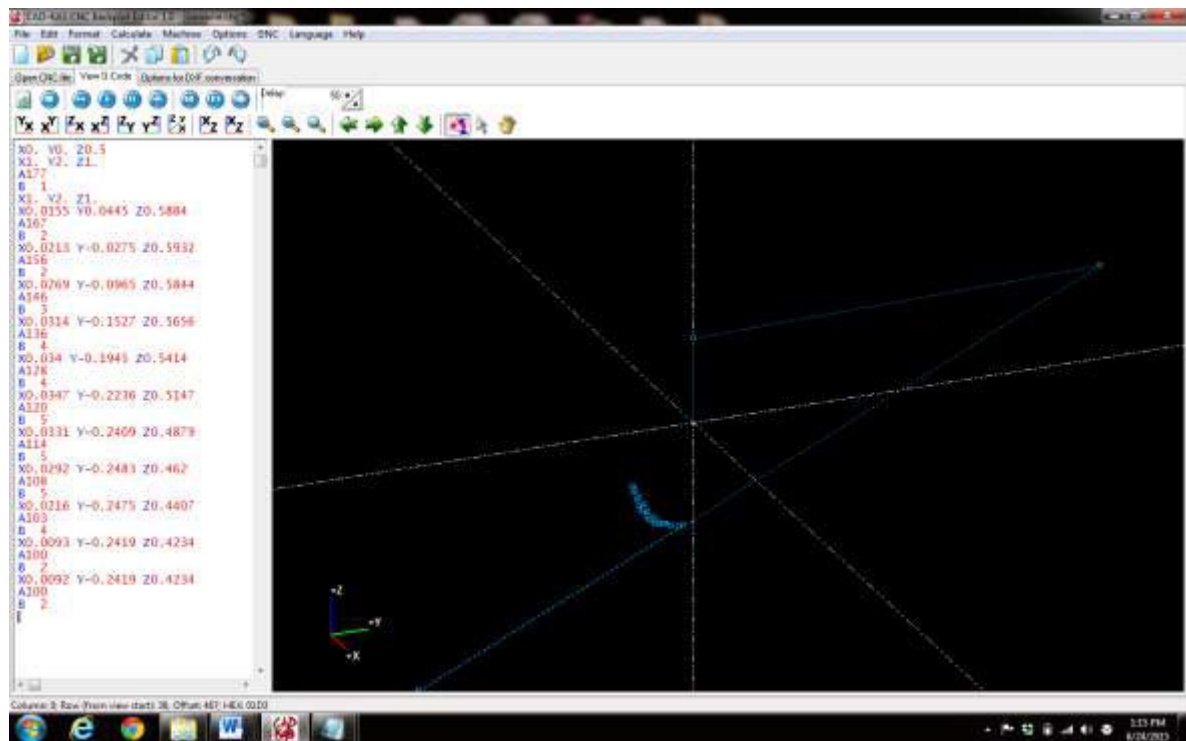


Figura 49. Datos Recibidos y Simulados

Lo anterior fue comparado con el programa original que maquinaría en una máquina con 5 ejes ya integrados, y se obtuvo la Figura 50.

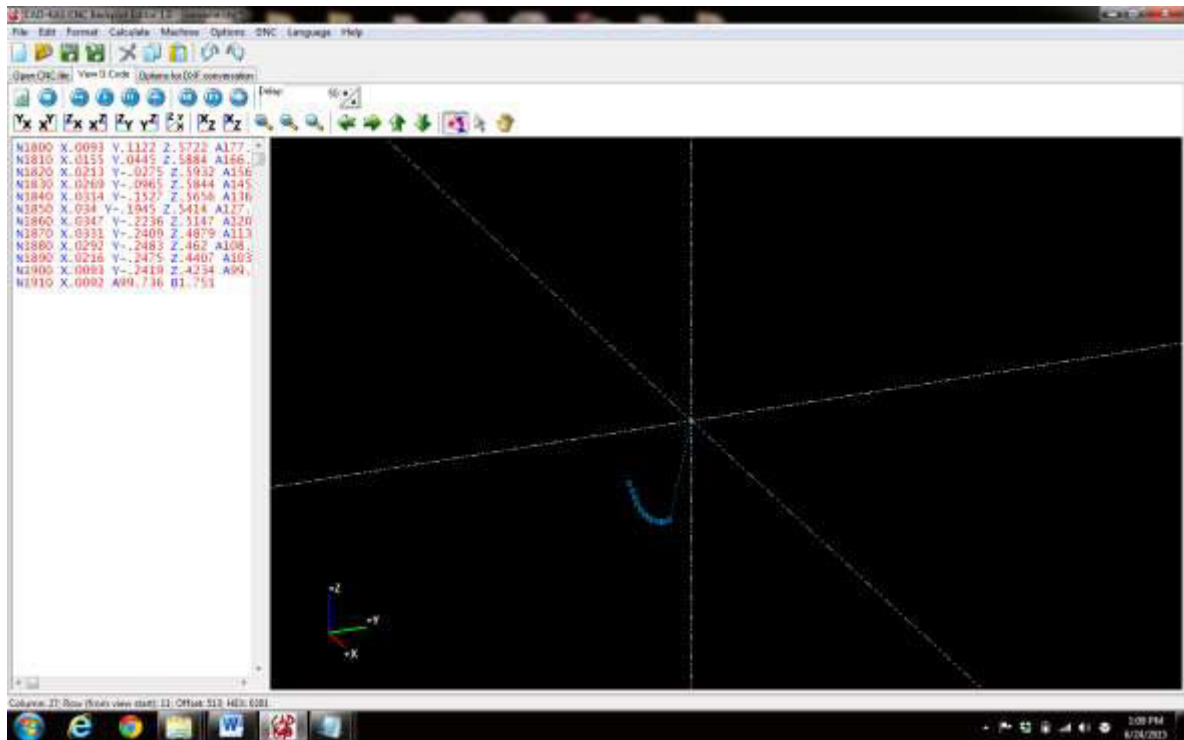


Figura 50. Simulación del Código Original de 5 ejes.

Para dar una validación o ajustes a los datos recibidos en la Figura 49 será necesario medir los ángulos de manera puntual, para lo cual se propone usar procesamiento de imágenes por medio el Sistema de Visión de Labview 2009.

3.4 Pruebas con Motores a Pasos

La propuesta inicial de la integración de los ejes adicionales a la máquina fresadora CNC HAAS VF-2 era con el módulo TRT-160, esta propuesta no fue puesta en marcha debido a que el controlador para servomotores de HAAS no funcionó de manera apropiada y no se pudo introducirle señales al TRT-160 por medio de fuentes externas debido a que se perdería la garantía del mismo con el fabricante.

Posteriormente en la sección 3.4 se menciona la integración de los ejes adicionales por medio de la emulación de servomotores convencionales HS-311, los cuales son utilizados para pruebas de baja potencia en aplicaciones didácticas y no para a una

aplicación real, pero se puede aplicar la metodología con una etapa de potencia adecuada para el control de servomotores industriales.

Otra limitante fue que en este trabajo de tesis se trabajó con microcontroladores de 8 bits, por lo que solo es posible generar 255 variaciones posibles, es decir no es posible desplazar el servomotor correspondiente a un eje en particular a los 360° grados que se necesitan. Por lo que se optó por hacer variar estos servomotores hasta un límite de 180° grados, en resolución de un 1 grado.

De acuerdo a lo anterior no fue posible mover los motores más allá de 180° grados y tampoco fue posible trabajar con una precisión menor a 1° grado. Dada este limitante se recomendó trabajar con motores a pasos.

Los denominados motores a pasos (motores paso a paso para algunos autores), son un caso bastante particular dentro de los motores en general. La señal eléctrica que provoca los desplazamientos no tiene una forma de onda analógica, como en otros casos, sino que es un tren de pulsos que se repiten con una secuencia previamente definida, y se aplica a cada una de las bobinas que componen el estator.

Cada vez que a alguna de estas bobinas se les aplica un pulso, el motor se desplaza un paso, y queda fijo en esa posición. Dependiendo de las características constructivas del motor este paso puede ser desde 90° grados hasta incluso 0.9° grados. Lo que significa que dependerá del modelo del fabricante, esta característica se define como la resolución del motor a pasos.

Por lo tanto, al seleccionar un motor a pasos adecuado seremos capaces de generar desplazamientos muy finos, lo que se traduciría en el poder controlar su posición, con una mayor precisión dependiendo del avance de cada paso.

Además, variando la frecuencia con la que se aplican los pulsos, también estaremos variando la velocidad con que se mueve el motor, lo que nos permite realizar un control de velocidad.

Por último si invertimos la secuencia de los pulsos de alimentación aplicados a las bobinas, estaremos realizando una inversión en el sentido de giro del motor.

Debido a las características anteriores se pueden encontrar motores a pasos en robótica, control de discos duros, flexibles, unidades de CDROM o de DVD e impresoras, en sistemas informáticos, manipulación y posicionamiento de herramientas y piezas en general. Si cabe citar algún inconveniente de los motores a pasos sería que presentan una velocidad angular limitada. Dicha limitación surge debido a que el motor requiere un tiempo para alcanzar la posición de equilibrio para realizar un paso. Si dicho tiempo no se respeta (esto ocurriría si la frecuencia de los pulsos es demasiado elevada) el motor puede no encontrar nunca esa posición de equilibrio y perderíamos el control sobre él (se mueve en forma de vaivén, no se mueve, o incluso se mueve en sentido contrario al deseado).

3.5 Interfaz para la Comunicación con la HAAS VF-2

Como antes habíamos descrito se usó la interfaz RS-232 para establecer comunicación entre la fresadora vertical CNC HAAS VF-2 y la computadora con el objetivo de la transferencia de programa de piezas a ser maquinadas en la CNC. También esta interfaz es la que se usó para controlar los servomotores que emulan los ejes A y B.

Debido a que la laptop que se usó para la comunicación entre la CNC y PC, misma en la que se encuentra instalado el Labview 2009 no cuenta con puerto RS-232 nativo se usó el cable de la Figura 51.



Figura 51. Cable USB a RS-232.

La HAAS VF-2 cuenta con dos puertos RS-232 DB-25, y el cable de la Figura 51 es un DB-9 macho, por lo que será necesario usar un adaptador de DB-25 macho a DB-9 macho como el de la Figura 52. Por último para conectar entre si la computadora y la fresadora vertical será necesario usar un cable null modem DB-9.



Figura 52. Cable DB-25 a DB-9 para RS-232.

Si se cuenta con un adaptador DB-25 macho a DB9 hembra, será necesario utilizar un conector macho a macho DB-9 y para la interconexión final se ocupará un cable RS-232 de conexión 1 a 1 (Figura 53), debido a que el emparejamiento que se hacía con el cable null modem (conexión de TX con RX y el RX con el TX) ya está siendo conectado con el conector macho-macho DB-9. Esta última configuración fue la que usó en este trabajo.



Figura 53. Cable DB-9 para RS-232.

Una vez hechas las conexiones apropiadas la fresadora vertical HAAS VF-2 podrá mandar la información de los ejes A y B a nuestro programa de control en la computadora.

Lo que faltaría mostrar son los diagramas de conexiones de los servomotores y la tarjeta Arduino utilizada en las pruebas.

3.6 Comunicación entre Labview 2009 y los Servomotores.

Como se explicó anteriormente en este trabajo se usó Labview 2009 como programa de control y se usó una tarjeta Arduino 2560 como tarjeta de adquisición de datos. Para lo cual se usó el programa de Figura 55 para controlar y monitorear los servomotores A y B respectivamente.

En la Figura 55 se observa un control que dice Puerto de Datos el cual representa el COM (puerto RS-232) donde se conectará la interfaz mencionada en la sección 3.5 referente la comunicación de la CNC con la computadora. El control que dice DAQ es el COM en donde se conecta la tarjeta Arduino 2560 antes mencionada.

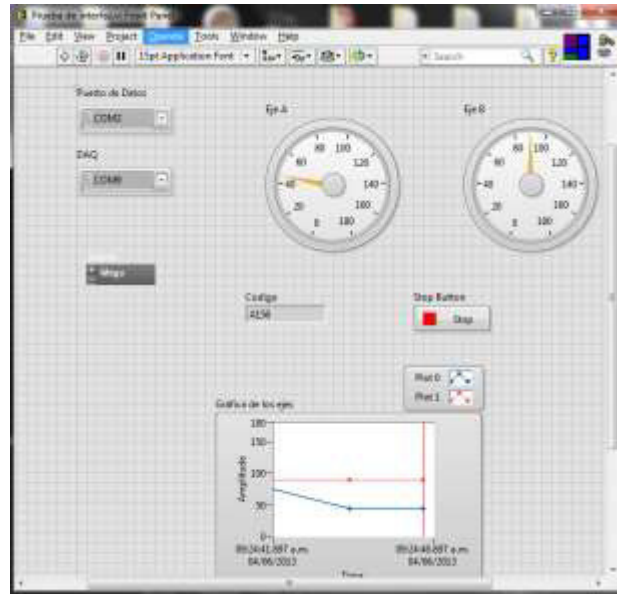


Figura 54. Programa en Labview 2009 para el control y monitoreo de servomotores.

Los indicadores “Eje A” y “Eje B” miden la posición actual de los servomotores, código muestra la instrucción de movimiento a ser ejecutada en ese momento y finalmente la gráfica muestra los desplazamientos obtenidos por ambos ejes, es decir muestra una historia de los datos procesados.

Finalmente se elaboró un programa usando las herramientas visión descritas en la sección 2.8 con lo cual se midieron los ángulos de los desplazamientos procesados y se compararon con los datos esperados. El programa se muestra en la Figura 49.

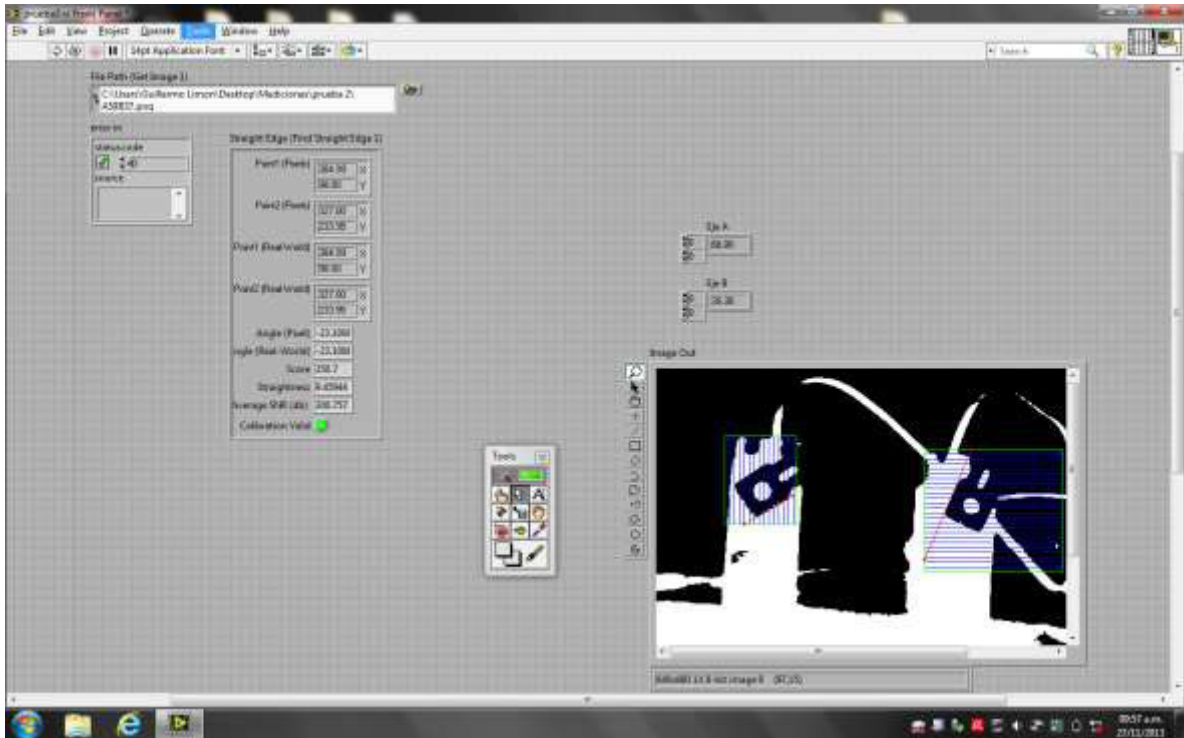


Figura 55. Programa en Labview 2009 para medición de ángulos.

El programa es capaz de leer una imagen y medir los ángulos de los Ejes A y B respectivamente, es posible implementar dicho programa para que tome imágenes y las procese automáticamente.

Con el programa de la Figura 55 fue posible obtener graficas de los desplazamientos para posteriormente compararse con los valores esperados. En la Figura 56 se observan los valores esperados de los desplazamientos en los Ejes A y B.

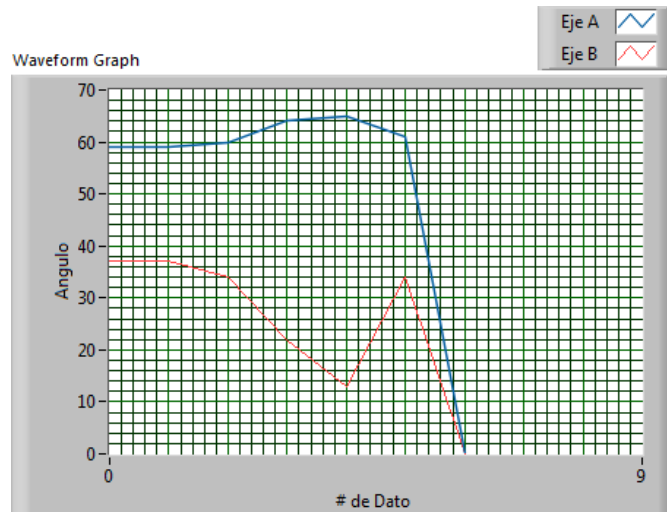


Figura 56. Desplazamientos deseados en los Ejes A y B.

En las Figura 57 se observan los valores medidos comparados con su valor deseado para cada eje.

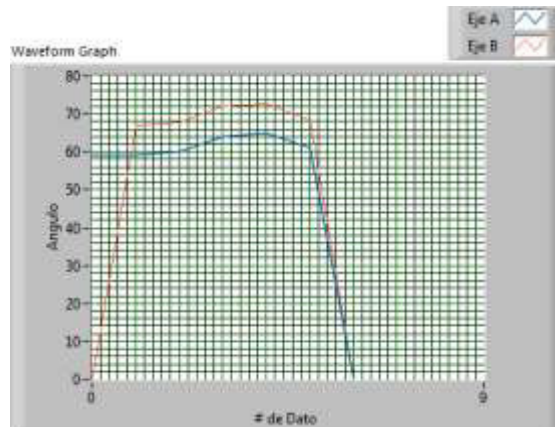


Figura 57. Gráfica del desplazamiento deseado en azul y el desplazamiento medido en rojo de los Eje A y B.

En las gráficas de la Figura 57 para el caso del eje A y B se observa que hay un error constante que se atribuye al acoplamiento mecánico del eje del servomotor utilizado, el cual no pudo ser posicionado correctamente en la posición a cero grados, por lo que existe ese desfase en todas las mediciones de +8 grados en promedio.

Capítulo 4. Resultados y Conclusiones.

4.1 Metodología Propuesta para la Incorporación de Ejes Rotativos a Fresadoras CNC con Tecnología Obsoleta.

El resultado de este trabajo se puede resumir de la siguiente manera, como primer paso como ya se ha explicado en el capítulo 3 es dibujar en un ambiente de Diseño Asistido por Computadora una pieza que detone una necesidad de maquinado de 5 ejes. Para esta tarea se empieza utilizando los softwares de Solidworks o NX como el de la Figura 58.

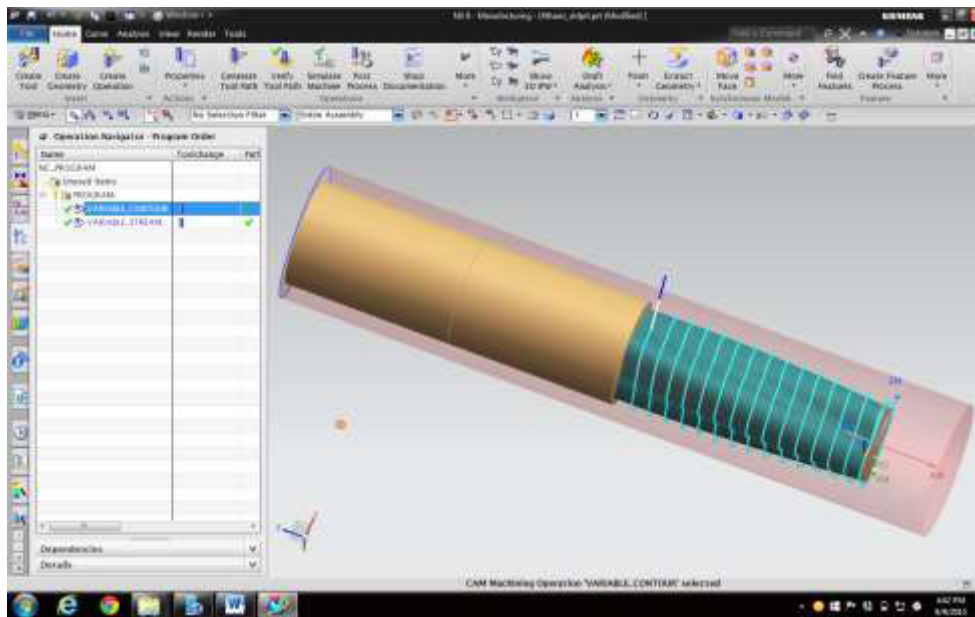


Figura 58. Pieza de trayectorias multiejes.

El siguiente paso es generar trayectorias de maquinado usando ambiente de Manufactura Asistida por Computadora como Mastercam o el módulo de maquinado de NX. Hasta este momento no se describe nada que nuevo que no se haya manejado en otros procedimientos tradicionales de maquinado, a excepción de que se usaron opciones de maquinados multiejes en los softwares de CAM. En la Figura 58 se muestra las trayectorias obtenidas en el software de NX 9.0.

Como tercer paso se genera el programa en código numérico de las trayectorias programadas en el paso anterior como en el caso de la Figura 58, posteriormente se usa el convertidor de código descrito en el capítulo 3.2 que actúa como un traductor para adecuar un código de 5 ejes a un código que pueda ser ejecutado en la fresadora de 3 ejes y que provoque desplazamientos en el módulo de servomotores desarrollado en este trabajo.

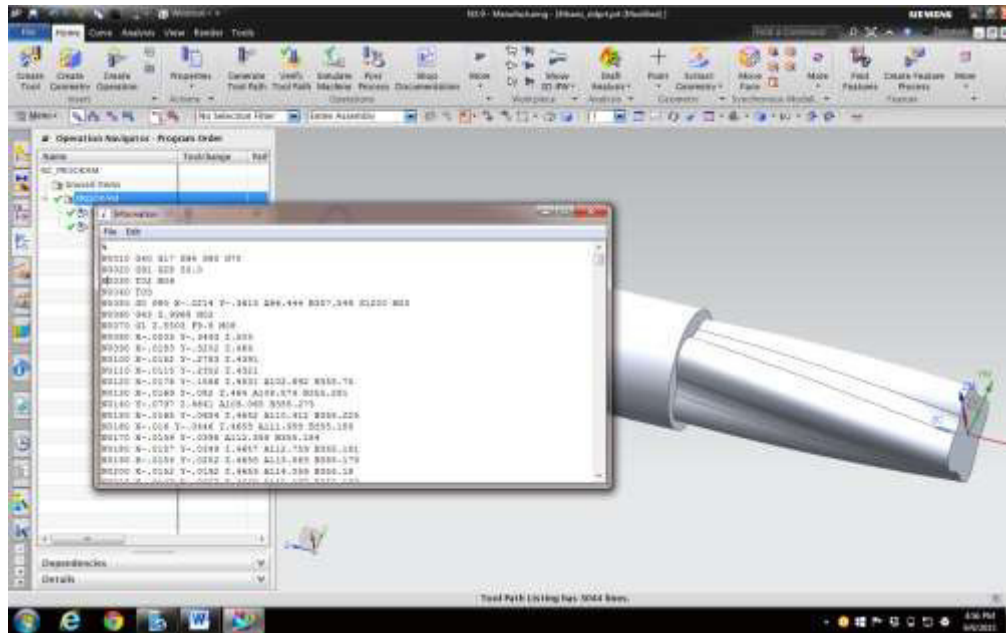


Figura 59. Código multiejes obtenido del proceso CAM.

Como se puede observar el código obtenido en la Figura 59 no puede ser procesado en nuestro sistema debido a que la máquina CNC tiene en forma nativa 3 ejes instalados y los ejes rotativos se manejan via subrutinas y a través de la interfaz RS-232.

Dichas subrutinas son grabadas previamente en la máquina fresadora CNC HAAS VF-2 en la memoria del controlador. Las subrutinas se basan en leer información de la interfaz RS-232 en formato de 4 caracteres, el primer carácter puede ser A o B que respectivamente generaría desplazamientos en el servomotor A o en el servomotor B, los otros tres caracteres restantes representan en números enteros el ángulo al cual se va a desplazar el servomotor deseado (ver sección 3.3 página 84).



Figura 60. Convertidor de código desarrollado en Labview.

En la Figura 60 se muestra el convertidor de código usado en el tercer paso de esta metodología. El cual genera códigos en macros que permiten almacenar en forma temporal la información de los desplazamientos en los ejes A y B respectivamente que posteriormente son utilizados en las subrutinas antes descritas.

Los servomotores A y B se encuentran en el módulo de servomotores que se desarrolló para este trabajo de tesis y que cuenta con una cámara web que hace el procesamiento de imágenes requerido en el siguiente paso de la metodología propuesta.

Del mismo módulo de servomotores que se muestra en la Figura 61 son adquiridas imágenes de los movimientos que permiten evaluar los desplazamientos angulares de los ejes emulados con los servomotores, de las cuales se obtienen gráficas a través de nuestro programa de medición de ángulos desarrollado en Labview. En este último paso se validan los ángulos medidos con visión por computadora y se comparan con los ángulos reales (deseados) del programa original de 5 ejes generados en el paso 2.

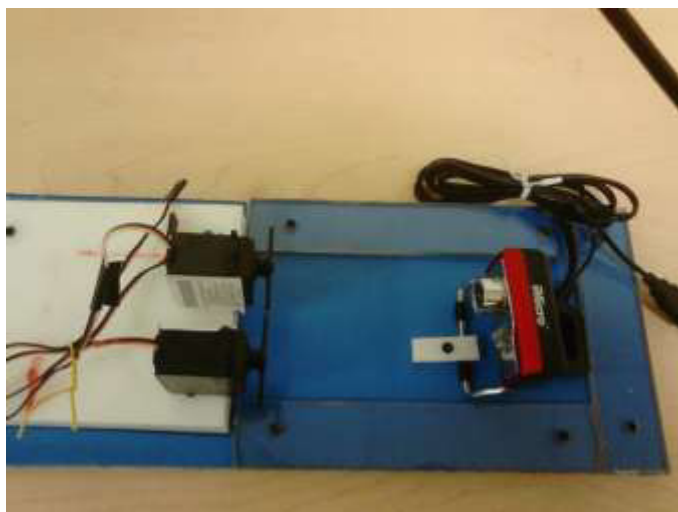


Figura 61. Módulo para servomotores el cual cuenta con dos servomotores y una cámara web.

Para medir los desplazamientos de los servomotores que emulan el eje A y el eje B se usan las imágenes adquiridas en el módulo de servomotores y se procesan en el programa de la Figura 62 (ver sección 3.1 página 73). Estos resultados se validan y comparan con los desplazamientos reales. Considerando que el hardware solo procesa números enteros el criterio de validación se basa en el redondeo de la medición obtenida.

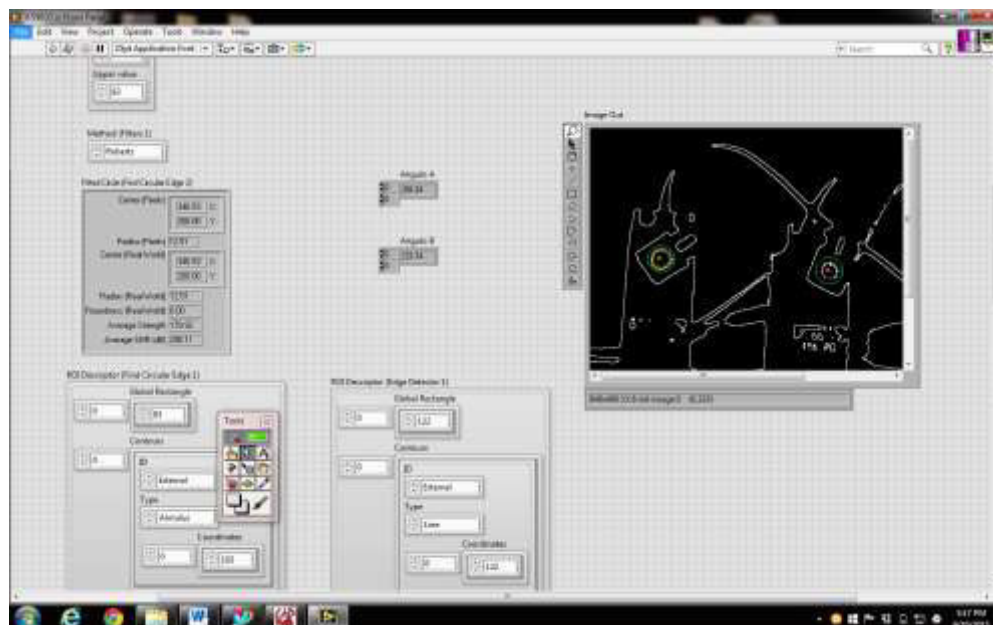


Figura 62. Programa de procesamiento de imágenes que mide los desplazamientos en los Ejes A y B.

Finalmente en la Figura 63 se observa el resultado final de este trabajo en el cual se comparan los valores deseados (los que siguen la trayectoria requerida) en contra de los resultados obtenidos del proceso anterior de visión por computadora.

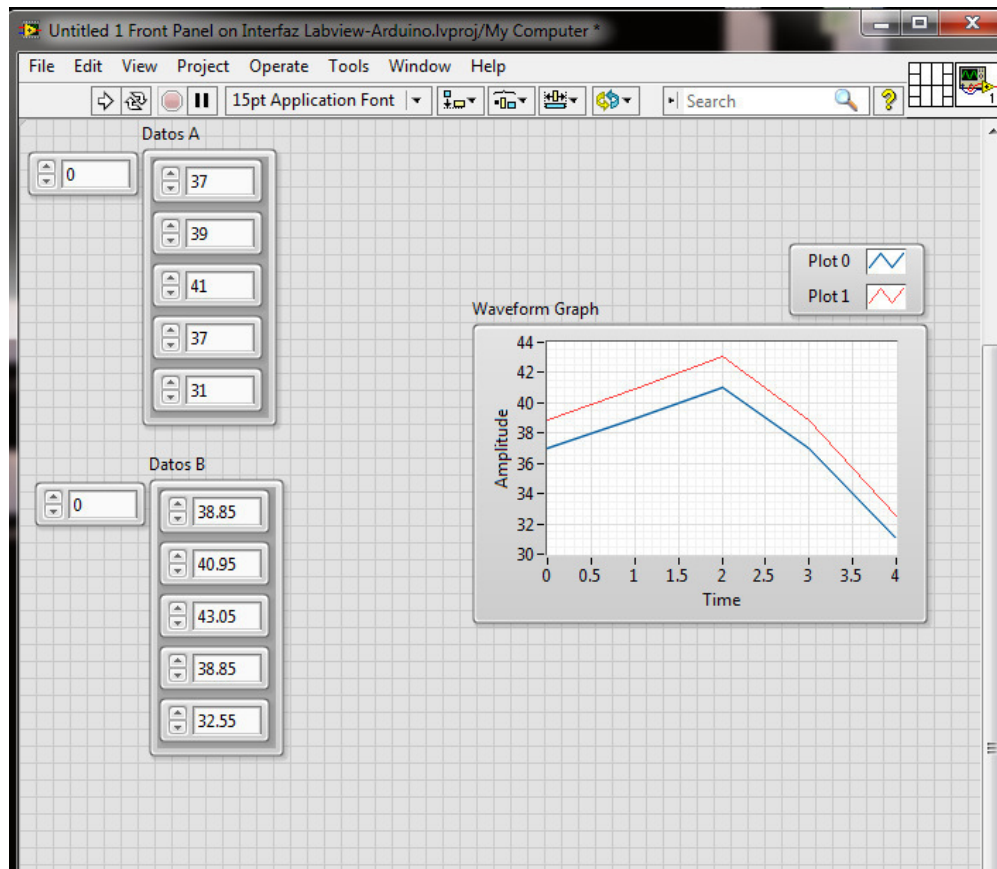


Figura 63. Desplazamiento en los ejes deseados vs medidos por visión por computadora.

Se observa que existe un error constante debido al acople mecánico explicado en la sección 3.6 (página 96) de los ejes de los servomotores con el rotor y además se le agrega un error de histéresis anteriormente detectado en los servomotores al realizar mediciones individuales.

De [42] se define la histéresis magnética como la acción de someter una sustancia ferromagnética a un campo magnético (campo eléctrico para el caso particular de este experimento), cuando este desaparece, la sustancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que se denomina magnetismo remanente. Por esta

razón entre mayor sea el desplazamiento del servomotor mayor será el tiempo al que este estará sometido a un campo eléctrico y mayor será el magnetismo remanente produciendo un error angular mayor. Sucede este también a la inversa, por lo que se genera menos error cuando el desplazamiento es un ángulo pequeño.

Con este método de medición de ángulos resultó ser muy preciso y además nos permitió evaluar la calidad del hardware utilizado.

4.2 Valoración Didáctica del Desplazamiento en Ejes Existentes.

Analizando el trabajo de este documento como un todo se observa que se tiene un módulo con dos servomotores que funciona de manera sincronizada con la máquina fresadora CNC vertical HAAS VF-2. La cual como es de mencionarse en este documento fue el objeto de estudio de este trabajo, la cual presenta el problema de la adición de ejes adicionales que son el cuarto y quinto eje explicados y justificados a lo largo de este documento.

Para agregar la funcionalidad ejes rotativos adicionales se planteó en un principio trabajar con el módulo TRT-160 que es una mesa giratoria de la compañía HAAS que si se instala de manera exitosa resolvería el problema de estudio de este documento. La situación no fue tan simple, dado el modelo de nuestra fresadora vertical HAAS VF-2, cuenta con la limitante de que únicamente es posible agregar un solo eje adicional, por lo que el TRT-160 no podía ser utilizado en su totalidad.

En un principio se observó que el costo del TRT-160 y las tarjetas de control representó un costo elevado para nuestro objeto de estudio, al realizar el análisis de funcionalidad de la máquina se observó si se quería utilizar la mesa giratoria en toda su capacidad era necesario cambiar tarjetas y actualizar software de la máquina, era necesario entonces cambiar todo el sistema de control de nuestro objeto de estudio, el cual representaría un costo muy elevado, de varios miles de dólares.

Considerando todo lo anterior se decidió entonces trabajar con varias propuestas, una de ellas fue en trabajar con el TRT-160 al 50% de sus capacidad, es decir nada más utilizando un solo eje, el otro eje (el quinto eje en este caso) sería agregado a través de una interfaz propia y emulado por medio de un motor convencional, normalmente utilizado para prácticas de laboratorio.

La propuesta anterior se llevó a cabo a través de manejar un servomotor HS-311 y un microcontrolador genérico de 8 bits el Teensy ++ 2.0, se optó por manejar una interfaz RS-232 que pudiese enviar a nuestro control información de la posición deseada con el inconveniente principal de que trabajaría una sola velocidad definida antes del proceso de maquinado.

En esta fase fue necesario invertir en el set de instrucciones macros que permitieron dar flexibilidad al código G y M convencional permitiéndole a este agregar instrucciones de los lenguajes tradicionales como el if, do, do-while, saltos condicionales e incondicionales así también como el uso de una instrucción en particular que nos permite mandar información por el puerto RS-232 dicha instrucción es DPRNT.

Para la siguiente fase se optó por plantear la problemática hipotética de que nuestro objeto de estudio no se le podría agregar ningún solo eje rotativo, por lo que la máquina solo trabajaría con sus tres ejes nativos. Al trabajar con esta problemática se hicieron adecuaciones necesarias para contar con un nuevo módulo, el cual ahora incluiría dos servomotores y el medio de comunicación entre la máquina y el módulo seguiría siendo la interfaz RS-232.

Con este nuevo planteamiento se modificaron los programas de nuestro microcontrolador y las subrutinas de nuestro objeto de estudio, logrando como resultado dos servomotores sincronizados con la fresadora vertical HAAS VF-2. En esta fase y en la anterior el llamado “convertidor de código” jugó un papel muy importante, ya permitió la adecuación del código G y M original de maquinado a un equivalente exacto que hizo

posible trabajar con nuestro módulo y la fresadora vertical HAAS VF-2 de manera sincronizada.

4.3 Uso de Gráficas de Desplazamientos para Evaluar la Sincronización de Ejes Adicionales.

En un principio solo era posible visualizar los movimientos continuos de nuestro objeto de estudio y el módulo de servomotores, no había forma de evaluar los movimientos, por lo que se decidió implementar un sistema que no interfiera con nuestro módulo agregando perturbaciones mecánicas, dicho sistema fue el de visión por computadora con el cual fue posible medir desplazamiento de una manera no invasiva. Además se agregó una interfaz gráfica y control de usuario a través de la computadora como versión final.

Con todo lo anterior fue posible obtener datos de medición y hacer simulaciones para evaluar trayectorias. Esto demostró que es posible implementar de forma exitosa ejes adicionales a máquinas herramienta de 3 ejes, a bajo costo y con sistemas simplificados de control a través de microcontroladores convencionales y motores eléctricos del mercado local, cabe mencionar que las etapas de potencia son necesarias para manejar motores industriales.

En la versión final de este trabajo se observa un ambiente de computadora donde es posible controlar los servomotores externos, medir desplazamientos y realizar gráficas en tiempo real de dichos movimientos, las trayectorias de los desplazamientos se evalúan a través de visión por computadora donde se obtienen resultados que solo se desfasan debido a acoples mecánicos y por la resolución de nuestro sistema que solo permite trabajar con ± 1 grado de tolerancia. Esto último se debe a que usamos microcontroladores de 8 bits.

Para resolver esto último simplemente habría que diseñar un nuevo sistema mecánico implementado con motores a pasos, estos últimos ofrecen control de velocidad (con ciertos límites) y de posición exacto con resoluciones menores a 1 grado, como se

describió en la sección 3.6. Esto último queda para trabajo futuro y no se contempla dentro de este trabajo de tesis.

4.4 Retrofit en Sistemas CNC para Migrar de 3 ejes a 5 ejes.

En secciones anteriores se habló de la importancia de los sistemas multiejes y de las limitantes de la fresadora vertical HAAS VF-2 de no poder agregar un quinto eje. Esta limitante se debe principalmente al modelo de la máquina fresadora y por ese motivo ya no existen en el mercado controladores que puedan proporcionar esa característica que nosotros buscamos.

Por ese motivo en este trabajo se buscó hacer una adecuación de tecnología ya existente y de bajo costo para hacer el trabajo, a esto se le conoce como: “retrofit”. Como se describió anteriormente se usaron microcontroladores genéricos de 8 bits que leen la información que envía nuestro objeto de estudio a través de la interfaz RS-232 haciendo posible el desplazamiento de los servomotores adicionales a la máquina fresadora.

Como es de saberse para una aplicación ya definitiva una vez diseñado la bancada con ejes giratorios usando servomotores para aplicaciones industriales, estos van a requerir una etapa de potencia, pero las acciones de control elaboradas en este trabajo serán las mismas.

4.5 Trabajos Futuros

Si se desea mejorar este trabajo lo que se puede hacer es trabajar con servomotores industriales con sus respectivos drivers. También se puede mejorar la aplicación generada en Labview para guardar datos históricos de las mediciones con fines estadísticos. Lo anterior conlleva a la construcción de un módulo de ejes adicionales funcional con sujeción tipo torno y así poder evaluar (medir) piezas manufacturadas con 5 ejes sincronizados.

Por otra parte, se planea trabajar en la construcción de un módulo didáctico de 5 motores a pasos que permitan emular sistemas CNC multiejes, con el propósito de enseñar a los nuevos practicantes de los sistemas CNC, esto que les sirva como estudio previo a utilizar máquinas CNC.

Dicho sistema ya está siendo controlado por Labview y solo le falta ensamblar la parte mecánica del mismo para empezar a hacer pruebas de funcionalidad y posteriormente realizar acciones de control con el módulo de control de NI y el módulo de Softmotion.

Por otro lado este trabajo permitirá el desarrollo de postprocesadores de sistemas multiejes a bajo costo y hechos a la medida de cualquier aplicación.

Como otro trabajo se tiene el desarrollar metodologías para usar la tecnología de STEP-NC, que como se sabe es una tecnología emergente que tiene mucho por delante en el reemplazo de los sistemas G y M tradicionales.

Y finalmente se tienen trabajos previos en sistemas de visión por lo que se pretende trabajar en temas de antropometría digital y sistemas automatizados.

Bibliografía

- [1] A. G. P. S. Stephen F. Krar, *Computer Numerical Control Simplified*, New York: Industrial Press, 2001.
- [2] D. G. a. T. M. Crandell, *An Introduction to CNC Machining and Programming*, Michigan: Industrial Press, 1991.
- [3] [En línea]. Available: <http://www.intelaxis.com>. [Último acceso: 12 October 2010].
- [4] Mexico, *Diario Oficial de la Federación*, November 2005.
- [5] S.-K. K. D.-H. C. I. S. Suk-Hwan Suh, *Theory and Design of CNC Systems*, Springer, 2008.
- [6] C. G.-x. W. Z.-l. Huang Hai-peng, «Development of a CNC System for Multi-Axis EDM Based on RT-Linux,» *IEEE*, 2009.
- [7] P. Y. J. W. T. Chen, «Local Interference Detection and Avoidance in Five Axis NC Machining of Sculptured Surface,» *IEEE*, 2005.
- [8] X. L. Hongbin Liang, «A 5-axis Milling System Based on a New G Code for NURBS Surface,» *IEEE*, 2009.
- [9] J. T.-b. Z. X.-l. Tao Lin, «Research on an Optimization Method of Ethernet-based Real Time Communication of CNC System,» *IEEE*, 2009.
- [10] K.-R. R. K.-E. K. S.-W. a. H.-Z. C. Sung-Nam, «Architecture of Flexible and Reliable Control & Monitoring System for Distributed Machining Systems for the International Conference on Smart Manufacturing Application,» *IEEE*, 2008.
- [11] H. L. J. L. Y. T. Haibo Yang, «The Architecture and Real Time Communication of CNC Systems Based on Switched Ethernet,» *IEEE*, 2010.
- [12] L. W. Y. R. Xun W. Xu, «Step-NC and Function Blocks for Interoperable Manufacturing,» *IEEE*, 2006.
- [13] Y. A. M. R. I. N. Arda Erol, «Open System Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control,» *IEEE*, 2000.
- [14] «Feedback from a CNC in Real Time is a "Significant Event" at Cessna,» *Machine Shop*, pp. 60-72, 1999.
- [15] Y. Y. H. Jae Wook Jeon, «A Generalized Approach for Acceleration and Deceleration of Industrial Robots and CNC Machine Tools,» *IEEE*, 2000.
- [16] B.-K. C. a. C. H. Choi, «A Feedforward Controller by Modified Series Approximation,» *IEEE*, 1998.
- [17] H.-J. S. P.-H. S. P.-H. S. Faa-Jeng Lin, «An Adaptive Recurrent-Neural-Network Motion Controller for X-Y Table in CNC Machine,» *IEEE*, 2006.
- [18] P.-L. H. Syh-Shiuh Yeh, «Analysis and Design of Integrated Control for Multi-Axis Motion Systems,» *IEEE*, 2003.
- [19] S.-S. Y. a. P.-L. Hsu, «An Optimal and Adaptive Design of Feedforward Motion Controller,» *IEEE*, 1999.
- [20] M. C. T. Dong Sun, «A Synchronization Approach for Minimization of Contouring Errors of CNC Machine Tools,» *IEEE*, 2009.
- [21] X. Q. C. H. J. Z. Tian Xincheng, «CNC Machining Technique and Control System of

- Ceramic Tools,» *IEEE*, 1996.
- [22] G. T.-C. C. a. M. Tomizuka, «Contouring Control of Machine Tool Feed Drive Systems: A Task Coordinate Frame Approach,» *IEEE*, 2001.
- [23] J. J. D'Azzo, «Feedback Control System Analysis and Synthesis,» *IEEE*, 1966.
- [24] C.-H. C. H. L. Byeong-Kap Choi, «Model Based Disturbance Attenuation for CNC Machining Centers in Cutting Process,» *IEEE*, 1999.
- [25] P. H. C.C. Hsieh, «The CAN-Based Synchronized Structure for Multi-Axis Motion Control Systems».*IEEE*.
- [26] «Boletín Industrial .com,» [En línea]. Available: <http://www.boletinindustrial.com/categoria.aspx?ctid=26398>. [Último acceso: 9 September 2015].
- [27] Krar/Check, Tecnología de las Máquinas Herramienta, Alfaomega, 2005.
- [28] HAAS Automation Inc., «Mill Operator Manual,» HAAS Automation, Oxnard, 2001.
- [29] N. M. Victor, «Apuntes de Manufactura Intregrada por Computadora,» UABC, Mexicali, 2000.
- [30] HAAS Automation Inc., «Rotary Operator's Manual,» HAAS Automation, Oxnard, 2006.
- [31] GE Automation, «GE Automation,» [En línea]. Available: <http://www.ge-ip.com/products/family/series-90-30>. [Último acceso: 15 January 2011].
- [32] Fanuc Robotics, [En línea]. Available: <http://www.fanurobotics.com/file-repository/DataSheets/Robots/M-10iA-Series.pdf>. [Último acceso: January 2011].
- [33] HAAS Automation Inc., «VF/HS Series CNC Machines Programming Workbook,» HAAS Automation, Oxnard, 2006.
- [34] Solidworks Corporation, Solidworks Office Premium Conceptos Básicos de Solidworks, Solidworks Corporation, 2007.
- [35] A. Mazakas, «Simplified 5 Axis-Machining,» DP Technology Corp., 2011.
- [36] World Class Machining, «Mastercam X5 Mastercam V9 to X5 Transition Guide,» World Class Machining, 2010.
- [37] In Home Solutions, «Mastercam X5 Training Solutions,» In Home Solutions, 2011.
- [38] Siemens, NX, [En línea]. Available: <http://www.plm.automation.siemens.com/en-us/products/nx/>. [Último acceso: June 2015].
- [39] Bishop Robert H., «Learning with Labview 7 Express,» National Instruments.
- [40] National Instruments, [En línea]. Available: <http://www.ni.com/Labview/whatis/esa>. [Último acceso: April 2011].
- [41] National Instruments, «Getting Started with NI Softmotion for Solidworks,» National Instruments, 2010.
- [42] mantenim, «Presentación de Histéresis,» 10 Febraury 2008. [En línea]. Available: <http://www.slideshare.net/mantenim/presentacion-histeresis>. [Último acceso: 14 September 2015].