



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

***TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA CNC PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UNA
FRESADORA BRIDGEPORT PERTENECIENTE AL
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA
DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-
ESPE”***

AUTORES:

**GONZÁLEZ RIVADENEIRA LENIN BOLÍVAR
CHANGOLUISA SANTACRUZ CRISTIAN JAVIER**

DIRECTOR: ING. SEGURA LUIS

SANGOLQUÍ

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN.

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CNC PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UNA FRESADORA BRIDGEPORT PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE”***. Realizado por los señores **LENIN BOLÍVAR GONZÁLEZ RIVADENEIRA** y **CRISTIAN JAVIER CHANGOLUISA SANTACRUZ**, ha sido revisado en su totalidad, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a los señores **LENIN BOLÍVAR GONZÁLEZ RIVADENEIRA** y **CRISTIAN JAVIER CHANGOLUISA SANTACRUZ** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 13 de junio del 2016

Atentamente,

Ing. Luis Segura

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **LENIN BOLÍVAR GONZÁLEZ RIVADENEIRA** y **CRISTIAN JAVIER CHANGOLUISA SANTACRUZ**, con cédula de identidad N° 172198347-4 y 180436550-8 respectivamente, declaramos que éste trabajo de titulación ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CNC PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UNA FRESADORA BRIDGEPORT PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE.”*** Ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que éste trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 13 de junio del 2016

Atentamente:

Lenin Bolivar
González Rivadeneira
C.C. 172198347-4

Cristian Javier
Changoluisa Santacruz
C.C. 180436550-8



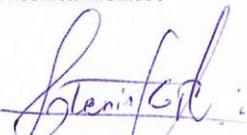
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **LENIN BOLÍVAR GONZÁLEZ RIVADENEIRA** y **CRISTIAN JAVIER CHANGOLUISA SANTACRUZ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CNC PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UNA FRESADORA BRIDGEPORT PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE.”*** Cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 13 de junio del 2016

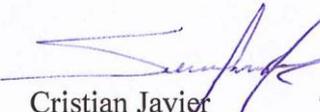
Atentamente:



Lenin Bolívar

González Rivadeneira

C.C. 172198347-4



Cristian Javier

Changoluisa Santacruz

C.C. 180436550-8

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación al fortalecimiento del conocimiento universal.
Por la llegada de mejores y más esclarecidos días para la especie humana.

Lenin Bolívar González Rivadeneira

DEDICATORIA

Dedicado al esfuerzo de las personas que ayudan a cumplir los deseos e ilusiones de otras.

Cristian Javier Changoluisa Santacruz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas que directa o indirectamente hicieron posible este logro.

Lenin Bolívar Gonzalez Rivadeneira

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a יהוה (IHH) que puso a las personas adecuadas (familia, amigos, compañeros, profesores, etc.) en el momento oportuno, para que por medio de su ayuda pueda cumplir con un simple deseo mi corazón; el cual que se ve reflejado en el presente trabajo.

Cristian Javier Changoluisa Santacruz

ÍNDICE

CARÁTULA	
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE.....	ix
INDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.4 ALCANCE.....	3
1.4.1 Diseño Mecánico.....	3
1.4.2 Diseño Eléctrico y Electrónico.....	3
1.4.3 Diseño del Sistema de Control.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos específicos.....	4
1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	5
CAPÍTULO II.....	6
ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 FRESADO.....	6
2.1.1 Fresadora Horizontal.....	7
2.1.2 Fresadora de torreta vertical.....	7
2.1.3 Fresadora universal.....	9

2.2	CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA	10
2.2.1	Principio de funcionamiento de máquinas CNC	11
2.2.2	Ventajas del CNC	12
2.2.3	Desventajas del CNC	12
2.2.4	Fresadoras CNC	12
2.3	AUTOMATIZACIÓN	13
2.3.1	Diseño controladores	14
2.3.2	Tipos de controladores	16
2.3.3	Actuadores.....	19
2.3.4	INTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.....	22
2.4	PROGRAMACIÓN DE CONTROL NUMÉRICO.....	24
2.4.1	Programación manual.....	24
2.4.2	Programación automática.....	26
2.5	SOFTWARE PARA CNC	28
2.5.1	Grbl.....	28
2.5.2	Mach3.....	28
2.5.3	LinuxCNC	29
2.5.4	Cnc Control	29
2.6	OPERACIONES DE FRESADO.....	29
2.7	PARÁMETROS DE CORTE.....	30
2.7.1	Dirección de avance	31
2.7.2	Profundidad de corte	31
2.7.3	Potencia de corte (P_c)	32
2.7.4	Velocidad de corte (V_c).....	32
2.7.5	Avance (s').....	33
2.7.6	Avance por diente (S_z).....	33
2.7.7	Sección de Viruta (S_v)	34
2.7.8	Presión de corte	34
2.8	HERRAMIENTAS Y ELEMENTOS DE FIJACIÓN.....	34
2.8.1	Herramientas de corte.....	35
2.8.2	Elementos de fijación	37
2.9	TRANSMISIÓN DE POTENCIA	38

2.9.1	Engranés	38
2.9.2	Tornillo sinfín.....	39
2.9.3	Acoplamientos.....	40
2.10	NORMAS DE SEGURIDAD PARA FRESADO	40
2.11	MÉTODO DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS	41
2.11.1	Gráficas de control para variables	41
2.11.2	Desarrollo de gráficas X y R	43
2.12	RESUMEN	44
	CAPÍTULO III.....	45
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	45
3.1	ESTADO INICIAL DE LA MÁQUINA	45
3.2	DEFINICIÓN DE NECESIDADES	46
3.3	DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES.....	46
3.4	DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA FUNCIONAL.....	47
3.5	DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO	48
3.5.1	Módulo 1. Movilidad.....	48
3.5.2	Módulo 2. Control.....	49
3.5.3	Módulo 3. Interfaz.....	50
3.5.4	Módulo 4. Comunicación.....	51
3.5.5	Módulo 5. Potencia Ac.....	52
3.5.6	Módulo 6. Transmisión de potencia.....	53
3.6	EVALUACION Y SELECCIÓN DE DISEÑO.....	54
3.6.1	Módulo 1 Movilidad.....	54
3.6.2	Módulo 2. Control	55
3.6.3	Módulo 3. Interfaz.....	57
3.6.4	Módulo 4. Comunicación.....	58
3.6.5	Módulo 5. Potencia Ac (contactores, variador de frecuencia)	59
3.6.6	Módulo 6. Transmisión	60
3.7	DEFINICIÓN DEL DISEÑO.....	62
3.7.1	Módulo 1. Movilidad.....	62
3.7.2	Módulo 2. Control	64
3.7.3	Módulo 3. Interfaz.....	64

3.7.4	Módulo 4. Comunicación	65
3.7.5	Módulo 5. Potencia Ac	65
3.7.6	Módulo 6. Transmisión de potencia	67
3.8	IMPLEMENTACIÓN	72
3.8.1	Implementación sistema mecánico	72
3.8.2	Implementación sistema eléctrico	74
3.8.3	Implementación de sistemas electrónicos	75
3.8.4	Mantenimiento	76
3.9	RESUMEN	77
	CAPÍTULO IV	79
	PRUEBAS Y RESULTADOS	79
4.1	CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE X	79
4.2	CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE Y	82
4.3	CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE Z	84
4.4	Pruebas de funcionamiento de la máquina	86
4.4.1	Pruebas funcionales de la máquina en el eje X	86
4.4.2	Pruebas funcionales de la máquina en el eje Y	87
4.4.3	Pruebas funcionales de la máquina en el eje Z	88
	CAPÍTULO V	89
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1	CONCLUSIONES	89
5.2	RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Códigos G	25
Tabla 2. Códigos M.....	26
Tabla 3. Operaciones de fresado	29
Tabla 4. Valores de presión de corte Ks de algunos materiales.....	34
Tabla 5. Normas de seguridad.....	41
Tabla 6. Características del estado inicial de la máquina.....	45
Tabla 7. Detalle de necesidades	46
Tabla 8. Detalle de especificaciones	47
Tabla 9. Módulos para la Fresadora Bridgeport	47
Tabla 10. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1	54
Tabla 11. Ponderación de costo para las alternativas del módulo 1.....	54
Tabla 12. Ponderación de controlabilidad para las alternativas del módulo 1.....	55
Tabla 13. Ponderación de potencia para las alternativas del módulo 1	55
Tabla 14. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 1..	55
Tabla 15. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 2.....	55
Tabla 16. Ponderación de costo para las alternativas del módulo 2.....	56
Tabla 17. Ponderación de programabilidad para las alternativas del módulo 2.....	56
Tabla 18. Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 2	56
Tabla 19. Ponderación de software para las alternativas del módulo 2	56
Tabla 20. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 2..	57
Tabla 21. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3.....	57
Tabla 22. Ponderación de licencia para las alternativas del módulo 3.....	57
Tabla 23. Ponderación de complejidad para las alternativas del módulo 3	57
Tabla 24. Ponderación de comunicación para las alternativas del módulo 3.....	58
Tabla 25. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 3..	58
Tabla 26. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4.....	58
Tabla 27. Ponderación de transmisión para las alternativas del módulo 4	58
Tabla 28. Ponderación de I/O para las alternativas del módulo 4.....	59
Tabla 29. Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 4	59
Tabla 30. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 4..	59
Tabla 31. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 5.....	59

Tabla 32. Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 5	60
Tabla 33. Ponderación de costos para las alternativas del módulo 5	60
Tabla 34. Ponderación de controlabilidad para las alternativas del módulo 5	60
Tabla 35. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 5..	60
Tabla 36. Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 6.....	60
Tabla 37. Ponderación de costos para las alternativas del módulo 6.....	61
Tabla 38. Ponderación de torque para las alternativas del módulo 6.....	61
Tabla 39. Ponderación de complejidad para las alternativas del módulo 6	61
Tabla 40. Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 6..	61
Tabla 41. Selección de diseños a usar en cada módulo	62
Tabla 42. Características del motor a controlar	65
Tabla 43. Distancias en probetas para el eje X en mm.	79
Tabla 44. Distancias en probetas para el eje Y en mm.	82
Tabla 45. Profundidad en probetas para el eje z en mm.	84
Tabla 46. Prueba de velocidad eje X.....	87
Tabla 47. Prueba de velocidad eje Y.....	87
Tabla 48. Prueba de velocidad eje Z	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Herramienta para desbaste de metal.	6
Figura 2. Fresadora horizontal.	7
Figura 3. Fresadora vertical convencional con 3 grados de libertad.	8
Figura 4. Partes de una fresadora vertical Bridgeport.	9
Figura 5. Fresadora Universal.	10
Figura 6. Ejemplo código G.	11
Figura 7. Fresadora CNC de tres ejes.	13
Figura 8. Esquema de sistema de control.	14
Figura 9. Características de una señal de control.	15
Figura 10. Sistema de control en lazo abierto.	15
Figura 11. Sistema de control en lazo cerrado.	16
Figura 12. Microcontroladores PIC y AVR.	17
Figura 13. PLC LOGO de la empresa Siemens.	18
Figura 14. Tarjeta de Adquisición de Datos.	18
Figura 15. Motor tipo jaula de ardilla.	20
Figura 16. Esquema interno de motor DC.	20
Figura 17. Motor a pasos.	21
Figura 18. Motor a pasos bipolar y unipolar.	22
Figura 19. Variador de Frecuencia.	23
Figura 20. Motor a pasos NEMA 16 con su respectivo driver.	23
Figura 21. Ejemplo de software CAM.	27
Figura 22. Tipos de dirección de avance.	31
Figura 23. Fresas cilíndricas.	35
Figura 24. Fresas circulares.	36
Figura 25. Fresas de Plato.	36
Figura 26. Fresas madre.	37
Figura 27. Elementos de sujeción.	38
Figura 28. Diferentes tipos de engranes.	39
Figura 29. Tornillo sin fin.	39
Figura 30. Acoplamientos elásticos.	40
Figura 31. Ángulo de ataque de una fresa de vástago.	63
Figura 32. Filtro pasa-bajo pasivo.	66

Figura 33. Filtro pasa-bajo activo	67
Figura 34. Sistema de reducción Eje Z.	73
Figura 35. Proceso de manufactura del sistema de reducción.....	73
Figura 36. Proceso de manufactura de acoplamientos directos.	74
Figura 37. Implementación de sistemas eléctricos.....	75
Figura 38. Implementación de sistemas electrónicos.....	76
Figura 39. Mantenimiento general.	77
Figura 40. Probetas para realizar control estadístico de procesos.....	79
Figura 41. Representación gráfica de valores promedio para el eje x.....	81
Figura 42. Representación gráfica del rango para el eje x.	81
Figura 43. Representación gráfica de valores promedio para el eje y.....	83
Figura 44. Representación gráfica del rango para el eje y.	83
Figura 45. Representación gráfica de valores promedio para el eje z.....	85
Figura 46. Representación gráfica del rango para el eje z.	85
Figura 47. Trayectorias para probeta de prueba.....	86

RESUMEN

En el presente proyecto se detalla el análisis, diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de la fresadora marca Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”. En un principio se analiza la factibilidad que tiene la máquina para ser automatizada, para lo cual se da una descripción general de su estado previo. Posteriormente se hace referencia a los fundamentos teóricos necesarios en la manufactura de procesos, los cuales incluyen parámetros y operaciones de fresado. Este documento cuenta también con una guía detallada del proceso diseño e implementación, basado en los criterios para la de selección de conceptos a través de un sistema de módulos que clasifican el proceso de automatización en áreas específicas. Por último, se realizan pruebas para la detección de posibles errores durante el proceso de automatización a través de un procedimiento llamado control estadístico de procesos, el cual consiste en l toma sucesiva de muestras para el cálculo de errores y la determinación de límites de tolerancia.

PALABRAS CLAVE:

- **AUTOMATIZACIÓN**
- **FRESADO**
- **CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**
- **CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS**
- **VARIADOR DE FRECUENCIA**

ABSTRACT

This project described the analysis, design and the implementation of a CNC system for the automation of Bridgeport milling machine that is property of the manufacturing processes laboratory of the University of the Armed Forces “ESPE”. At first it's analyzed the feasibility of the automation processes, for this, there's a description of the previous estate of the machine. Subsequently it is referred to the theoretical foundations that are necessary in manufacturing processes, which include parameters and milling operations. This document also provides detailed guidance on the design and implementation of processes based on criteria for selection of concepts through a system of modules that classify the automation process in specific areas. Finally, tests for the detection of possible errors that happen during the automation process, through a procedure called “statistical process control”, which consists in a successive sampling for errors and the calculation and determination of limits of tolerance.

KEYWORDS:

- **AUTOMATION**
- **MILLING MACHINE**
- **COMPUTER NUMERICAL CONTROL**
- **STATISTICAL PROCESSES CONTROL**
- **VARIABLE FREQUENCY DRIVE, OR THE ACRONYM AFD**

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 GENERALIDADES

Actualmente los procesos de manufactura en las grandes industrias se encuentran totalmente automatizados, por lo que para mantener los niveles de producción y competitividad es necesario estar a la par tanto en el nivel de automatización como también en el conocimiento para el correcto uso de esta tecnología.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo de la robótica ha tenido un avance muy acelerado y significativo en las últimas décadas, esto ha generado la importancia del estudio y el desarrollo de los beneficios que la Automatización Mecatrónica pueden brindar a la sociedad. Estas innovaciones tecnológicas han obligado a realizar más investigaciones en esta área con la inversión de grandes cantidades de dinero, con el fin de desarrollar nuevos sistemas automatizados cuya función a futuro es remplazar a las personas en tareas de alto riesgo o específicas dentro de las áreas de manufactura, producción, distribución entre otras.

El laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE cuenta con máquinas-herramientas destinadas a distintos procesos de mecanizado. Sin embargo, los nuevos escenarios industriales exigen tiempos de producción cada vez menores siendo la automatización la respuesta a este problema.

Dentro de las políticas de mejoramiento continuo del laboratorio de procesos de manufactura, se encuentra la de actualizar y rehabilitar las máquinas de tal forma que se garantice su funcionamiento y disponibilidad para estudiantes, así como también para trabajos que pueda requerir la industria.

Actualmente algunas de estas máquinas no se encuentran operables por fallas en su funcionamiento o se encuentran desactualizadas respecto de las exigencias industriales

actuales en este campo, lo que representa implicaciones en la formación de los estudiantes que son quienes aprenden con el uso de las mismas.

Los sistemas CNC permiten realizar procesos de mecanizado con ventajas como: mejor calidad, mayor eficiencia, altos volúmenes de producción, mayor seguridad, etc. Siendo estas las características que se necesitan para estar a la par en los avances tecnológicos desarrollados en el área de procesos de manufactura.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE presenta la necesidad de contar con laboratorios bien equipados en las ramas de Procesos de manufactura, por lo que la desactualización y/o avería de equipos impide el desarrollo en sus procesos académicos.

Uno de los equipos pertenecientes a la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE es la fresadora BRIDGEPORT cuya función es permitir que los estudiantes puedan interactuar directamente procesos de mecanizado artesanal.

Actualmente esta máquina herramienta se encuentra en funcionamiento, pero al ser un modelo con casi 30 años de antigüedad, no responde a las exigencias pertinentes en el área de mecanizado que se requiere en la industria actual, por lo que existe la necesidad de la implementación de un sistema CNC, de tal forma que los estudiantes puedan tener acceso a nuevas tecnologías de maquinado que permitan realizar las prácticas de laboratorio.

Hoy en día, uno de los principales objetivos que tiene el actual Gobierno de la República del Ecuador es incentivar a las entidades educativas, específicamente a estudiantes a la realización de investigaciones y desarrollo de nuevas maquinarias o prototipos en beneficio de la sociedad para activar la matriz productiva, motivo por el cual, y alineados a los siguientes objetivos del plan nacional del buen vivir:

- Objetivo 4: Fortalecer las capacidades y potencialidades de la ciudadanía
- Objetivo 10: Impulsar la transformación de la matriz productiva.

Se propone como solución la implementación de un sistema CNC y la repotenciación de los componentes mecánicos y eléctricos de la máquina herramienta BRIDGEPORT del laboratorio de procesos de manufactura, así como también la integración con sistema basado en software libre que permita el uso de herramientas CAM en la misma.

1.4 ALCANCE

Diseñar e implementar un sistema CNC que garantice a los alumnos pertenecientes al departamento de energía y mecánica de la Universidad de las fuerzas armadas ESPE contar con laboratorios equipados con tecnología actualizada y acorde a las exigencias del mercado actual del país.

1.4.1 Diseño Mecánico

- Mantenimiento y modernización del sistema mecánico de la fresadora vertical Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Diseño e implementación de elementos transmisores de potencia para los ejes correspondientes.
- Pruebas de control estadístico de procesos.

1.4.2 Diseño Eléctrico y Electrónico

- Selección de componentes eléctricos y electrónicos para el funcionamiento de la fresadora vertical Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Diseño, construcción e implementación del circuito de control para el sistema en modo manual y automático.

1.4.3 Diseño del Sistema de Control

- Interfaz gráfica que permita manipular las variables de control del sistema y visualizar las trayectorias generadas en código g.
- Sistema de control manual de la fresadora con un LCD que muestra en tiempo real las variables de control del sistema.
- Implementación de sistema variador de frecuencia para el control de la velocidad del husillo de la máquina.
- Manual de usuario para el funcionamiento de la máquina en modo manual y automático.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema CNC para la automatización de la máquina fresadora Bridgeport, perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

1.5.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de control manual compatible con el sistema CNC de la fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Utilizar herramientas de hardware y software libre para la implementación del presente proyecto.
- Desarrollar pruebas de funcionamiento del sistema CNC implementado para la detección y corrección de errores.
- Elaborar un manual de usuario y la documentación necesaria para su uso como herramienta didáctica en los laboratorios de procesos de manufactura.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento consta de 5 capítulos y los anexos correspondientes.

- En el primer capítulo se describen las generalidades y el marco general del proyecto, se define los objetivos y el alcance planeados para el mismo.
- El segundo capítulo contiene el principio de funcionamiento de la máquina, así como también los fundamentos teóricos que se usarán en este proyecto para la automatización de la misma.
- En el tercer capítulo se describen las consideraciones utilizadas en este proyecto para la realización del diseño mecánico, eléctrico y el sistema de control.
- En el cuarto capítulo se describe la construcción y funcionamiento del sistema.
- En el quinto capítulo se detallan los resultados y conclusiones de este proyecto.
- Por último, se adjunta como anexos el manual de usuario del software, los planos eléctricos y mecánicos del sistema.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se detalla el principio de funcionamiento de una máquina fresadora de torreta convencional, de una máquina fresadora CNC y los fundamentos teóricos utilizados para el diseño del sistema.

2.1 FRESADO

El fresado es un proceso mediante el cual se desbasta un material o pieza a través de un proceso de arranque de viruta con una herramienta rotativa de varios filos.



Figura 1. Herramienta para desbaste de metal.

Fuente: (Terratec, 2014)

El material o la pieza a ser desbastada se ubica en un banco que por lo general cuenta con los tres grados de libertad y se mueve relativamente respecto a la herramienta giratoria. Una fresadora es por tanto una máquina dotada de una herramienta de corte fijada al cabezal que posee movimiento lineal en tres o más direcciones.

Las máquinas fresadoras se clasifican según su número de ejes de operación o la orientación del eje de giro, la clasificación más común es:

2.1.1 Fresadora Horizontal

Es un tipo de fresadora que consta de un eje horizontal situado entre el cabezal de la máquina y un rodamiento que se encuentra al otro extremo sobre un puente deslizante llamado carnero. La función principal de este tipo de fresadora es el maquinado de ranuras de distinto grosor.



Figura 2. Fresadora horizontal.

Fuente: (SJR Machinery, s.f.)

2.1.2 Fresadora de torreta vertical

Es una máquina herramienta utilizada en procesos de mecanizado para el arranque de viruta cuya configuración geométrica es la disposición de un banco que posee movimiento en las tres direcciones de un sistema cartesiano respecto de una herramienta giratoria ubicada en la parte superior del banco de trabajo.

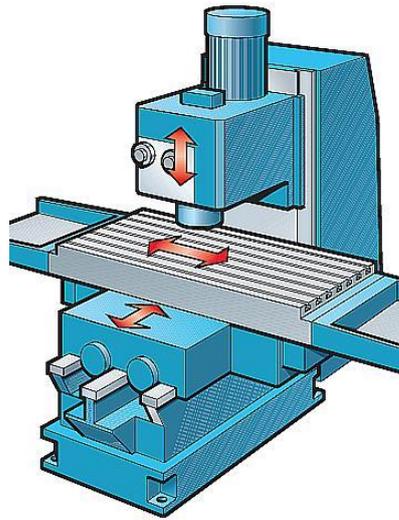


Figura 3. Fresadora vertical convencional con 3 grados de libertad.

Fuente: (IMH, 2015)

2.1.2.1 Partes de una fresadora vertical

- **BASE:** Estructura hecha de fundición gris, sobre la cual se apoya toda la estructura de la fresadora y se encuentra anclada al suelo.
- **CONTROL EJE Z:** Es un sistema de reducción mecánica a través de un tornillo sin fin que permite el desplazamiento del banco de trabajo sobre el eje z.
- **PANEL DE CONTROL:** Sección destinada para activar o desactivar el motor principal, el sistema de refrigerante y el “Stop” de emergencia de la máquina.
- **CONTROL EJE Y:** Sistema de reducción mecánica a través de un tornillo sin fin que permite el desplazamiento del banco de trabajo sobre el eje Y.
- **SISTEMA ELÉCTRICO:** Consta de un transformador y un sistema de contactores para el control de los dispositivos de la máquina.
- **CONTROL EJE X:** Sistema de reducción mecánica a través de un tornillo sin fin que permite el desplazamiento del banco de trabajo sobre el eje X.
- **BANCO DE TRABAJO:** O carro, es una estructura de forma rectangular, la cual se desliza a lo largo de la mesa sobre el cual se sitúa el material a desbastar.
- **DOSIFICADOR DE REFRIGERANTE:** Controla la salida de refrigerante hacia el banco de trabajo.

- CAMBIO DE VELOCIDADES: Mecanismo que permite mover la banda que transmite la potencia del motor al eje de la herramienta.
- MOTOR: Máquina que entrega energía mecánica al sistema para realizar el arranque de viruta.

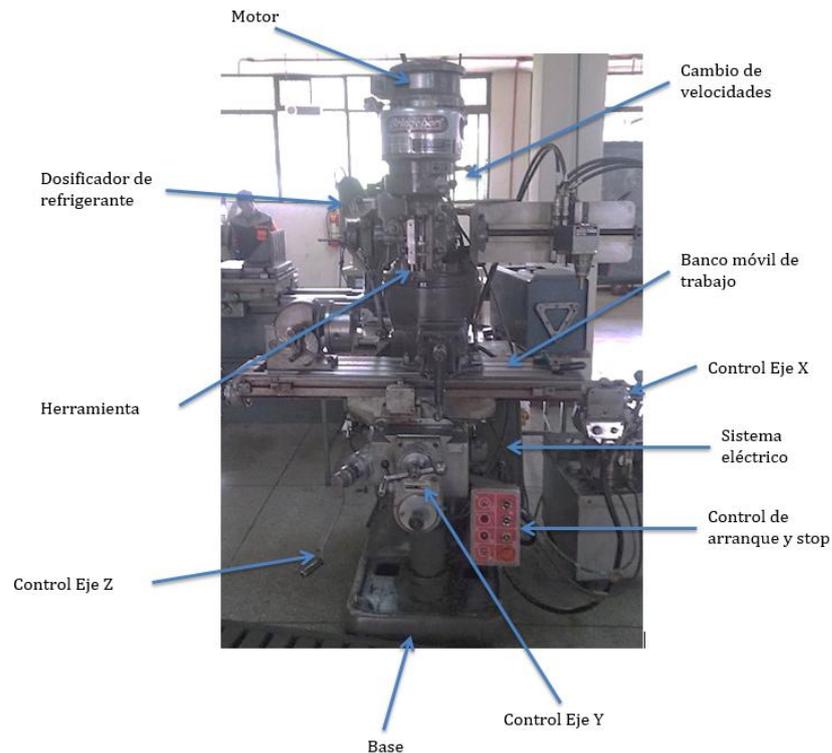


Figura 4. Partes de una fresadora vertical Bridgeport.

El banco de trabajo de la fresadora se puede mover en una o varias direcciones a la vez sobre los ejes cartesianos x , y , z ; cada eje tiene un volante que posee un dial acoplado que indica al operador cuanto se ha desplazado el banco en cada eje.

2.1.3 Fresadora universal

La fresadora universal posee dos tipos de porta herramientas lo que hace que se comporte como fresadora vertical o fresadora horizontal dependiendo de la operación de fresado que se vaya a realizar.



Figura 5. Fresadora Universal.

Fuente: (SJR Machinery, s.f.)

2.2 CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA

El control numérico por computadora, CNC por sus siglas en inglés (Computer numerical control), es un sistema de automatización de máquinas herramientas que a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Gracias a esto, puede hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales.

Las máquinas CNC son capaces de mover la herramienta al mismo tiempo en los tres ejes para ejecutar trayectorias tridimensionales como las que se requieren para el maquinado de moldes, repuestos automotrices, etc.

En una máquina CNC una computadora controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo. Una vez programada la máquina, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de que el operador esté manejándola. Esto permite aprovechar mejor el tiempo del personal para que sea más productivo.

El término "control numérico" se debe a que las órdenes dadas a la máquina son indicadas mediante códigos numéricos. Por ejemplo, para indicarle a la máquina que mueva la herramienta describiendo un cuadrado de 10 mm por lado se le darían los siguientes códigos:

```

G90 G71
G00 X0.0 Y0.0
G01 X10.0
G01 Y10.0
G01 X0.0
G01 Y0.0

```

Un conjunto de órdenes que siguen una secuencia lógica constituyen un programa de maquinado. Dándole las órdenes o instrucciones adecuadas a la máquina, ésta es capaz de maquinar desde una simple ranura hasta complejas estructuras geométricas en tres dimensiones.

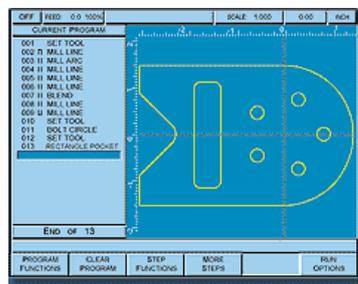


Figura 6. Ejemplo código G.

(Escalona, 2015)

2.2.1 Principio de funcionamiento de máquinas CNC

Para realizar cualquier tipo de mecanizado a través de un proceso de arranque de viruta es necesario que exista movimiento relativo entre el material que se quiere desbastar y la herramienta de corte.

Los sistemas CNC están diseñados para realizar acciones de control sobre los movimientos relativos que deben existir entre la herramienta y la pieza, a partir de instrucciones dadas por un software informático ejecutadas por un ordenador.

Este software informático traduce sentencias dadas por el usuario a movimientos precisos de los ejes a través de sistemas numéricos, es por ello que se denomina CNC al control numérico por computador, en sus siglas (Computer Numerical Control).

2.2.2 Ventajas del CNC

Las ventajas de una máquina CNC frente a una máquina operada manualmente son muchas, por lo que en la actualidad la tendencia por parte del sector empresarial es la automatización de estos sistemas; entre las principales ventajas están:

- Reducción de tiempo de ciclos de operación
- Ahorro en costos de preparación
- Reducción de porcentaje de piezas defectuosas
- Mayor seguridad del operador
- Disminución de costos por desgaste de la herramienta
- Mayor productividad
- Menores márgenes de error
- Menor desperdicio de material
- Mejor acabado

2.2.3 Desventajas del CNC

- Máquinas sumamente costosas
- Conocimiento de herramientas CAD y CAM
- Mayores costos de mantenimiento

2.2.4 Fresadoras CNC

Una fresadora CNC permite la automatización programable de la producción.

Estas máquinas son capaces de adaptarse según el requerimiento de maquinado y poseen excelentes características de precisión, además permiten realizar varios modelos de maquinado sin que esto implique un cambio en su configuración mecánica, sino, solamente un cambio en su programación.

Para realizar los movimientos relativos de sus ejes respecto a la herramienta, estas máquinas utilizan un sistema de control que interpreta el código de tipo alfa numérico,

es decir, cadenas de instrucciones que poseen números letras entre otros símbolos. A través de esta interpretación la máquina es capaz de realizar tareas concretas.

Existen dos tipos de códigos que pueden ser interpretados por una maquina CNC, el código G que se utiliza para la generación de movimiento ciclos fijos y el código M que se lo usa para funciones auxiliares.



Figura 7. Fresadora CNC de tres ejes.

Fuente: (Helfer, 2015)

2.3 AUTOMATIZACIÓN

Se conoce como automatización al conjunto de dispositivos electro-mecánicos, maquinaria y sistemas computarizados que permiten el monitoreo y control de procesos, esto para que dichos procesos se comporten de manera automática, lo que genera ventajas entre las cuales tenemos:

- Reducción de riesgos que puedan existir al momento de manipular el sistema, para mejorar la seguridad y condiciones de trabajo de los operarios.

- Mejorar parámetros de productividad mediante la reducción de costos de producción y aumento de calidad.
- Generar operaciones complejas, que en sistemas manuales no se podrían realizar por falta de control y procesamiento numérico.
- Facilita el mantenimiento ya que el propio sistema informa de errores y posibles soluciones sin que se requiera altos conocimientos por parte de operarios.
- Se puede generar sistemas de producción JIT (Just in Time), lo que significa mejorar la disponibilidad y entrega de productos en momentos precisos.

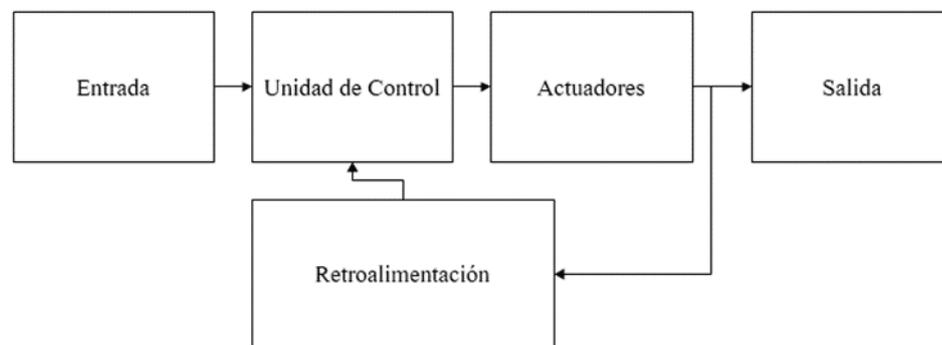


Figura 8. Esquema de sistema de control.

2.3.1 Diseño controladores

Para diseñar un proceso automático es necesario conocer ciertos criterios tales como: tiempo de respuesta, error en estado estacionar y sobre-pico, que definan el comportamiento físico del proceso a automatizar, para que a partir de estos se pueda establecer algún sistema de control e instrumento que genere una señal de control a fin de corregir el error existente entre un valor deseado (señal de entrada) y un valor medido (señal de salida). Además, para seleccionar el sistema de control hay que tomar en cuenta la complejidad y costo que puede conllevar la implementación.

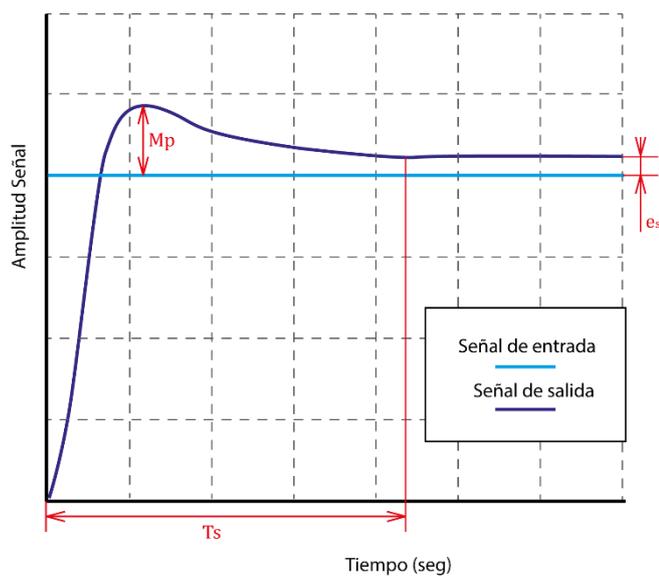


Figura 9. Características de una señal de control

2.3.1.1 Sistema de control en lazo Abierto

Como se puede observar en la figura 10, en este tipo de sistemas no existe una retroalimentación que indique el valor de la señal de salida al controlador, por lo que se trabaja directamente con la señal de entrada. Este tipo de control se usa para procesos “lentos”, es decir que trabajan con tiempos de respuesta en el orden segundos o minutos (principalmente plantas térmicas). También este sistema es usado en procesos que poseen actuadores de alta precisión.

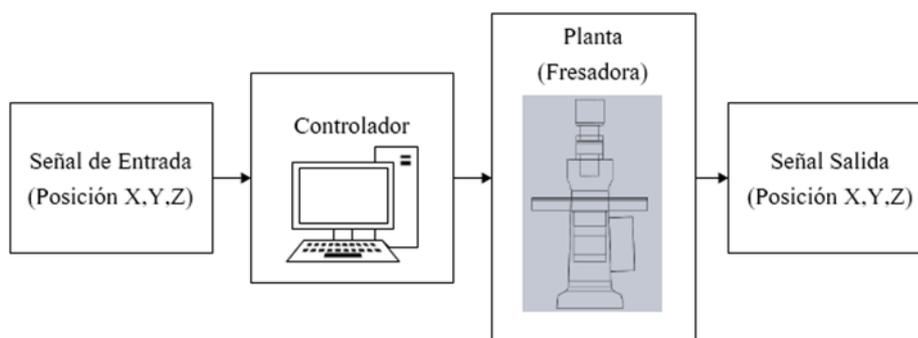


Figura 10. Sistema de control en lazo abierto.

2.3.1.2 Sistema de control en lazo Cerrado

La principal diferencia en comparación al sistema de control en lazo abierto es que una señal de retroalimentación es agregada al sistema como se aprecia en la figura 11. Esta señal que se obtiene a través de sensores será usada posteriormente por el controlador para calcular el error y realizar los cálculos necesarios que mejoren las características de error en estado estacionario, tiempo de establecimiento y sobre-pico.

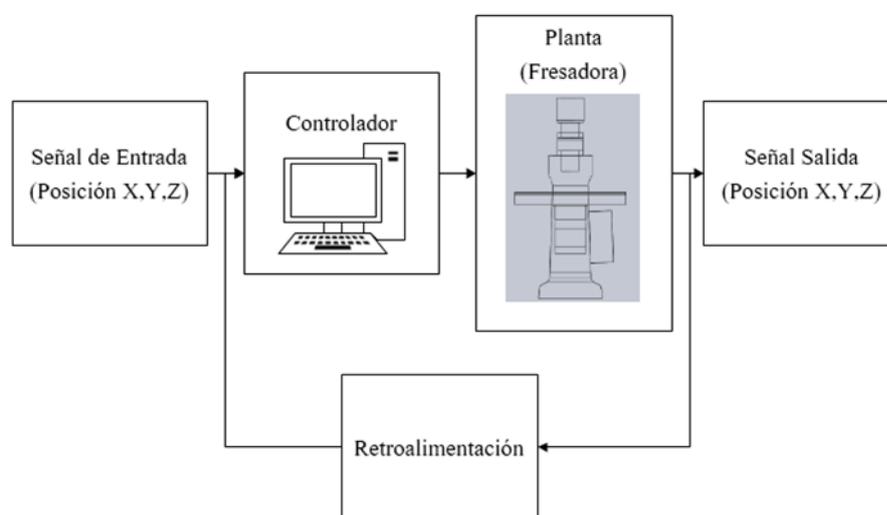


Figura 11. Sistema de control en lazo cerrado

2.3.2 Tipos de controladores

Los tipos de controladores se pueden dividir en neumáticos, electro-neumáticos y eléctricos; a continuación, se especificarán los diferentes tipos de controladores eléctricos usados para la automatización de procesos. La función que tienen estos dispositivos es la de generar una señal de control a partir de algoritmos lógicos matemáticos, que mejoren las características del sistema de acuerdo a las necesidades del proceso que se automatizará.

2.3.2.1 Microcontroladores

Es un circuito integrado programable que combina las características de un microcomputador, es decir, unidad central de procesamiento(CPU), memoria y

periféricos de entrada y salida (Pérez, 2007). En esta categoría de controladores se destacan dos que se describen a continuación:

- PIC: Microcontroladores creados por Microchip Technology Inc., adquiere su nombre por sus siglas en inglés Peripheral Interface Controller (controlador de interfaz periférico).
- AVR: Microcontroladores basados en el procesador ARM y MCU, se basan en la arquitectura de código programación C y montaje.

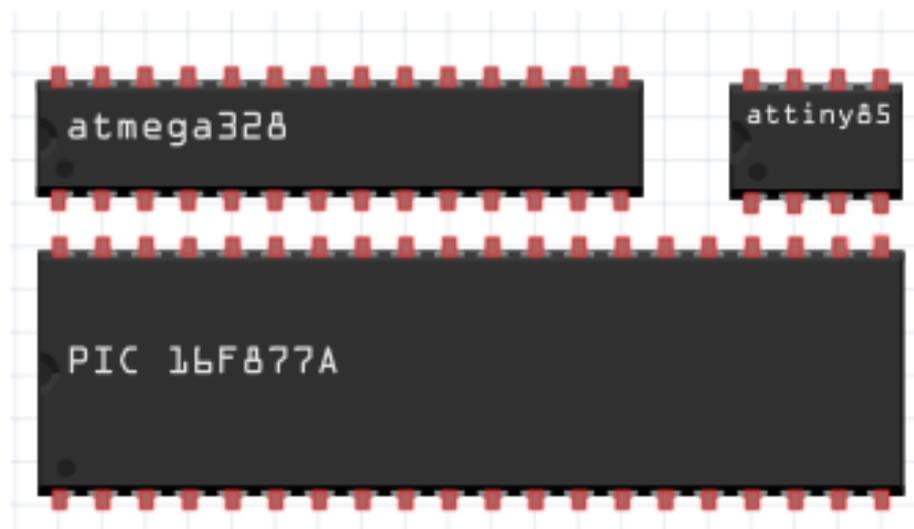


Figura 12. Microcontroladores PIC y AVR.

2.3.2.2 PLC

Recibe su nombre por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable), es el tipo de controlador más común en la industria ya que su diseño robusto soporta condiciones y ambientes agresivos, además de ser compatible con protocolos de comunicación estándar (RS232, MODBUS, CAN, PROFINET, etc.).



Figura 13. PLC LOGO de la empresa Siemens.

Fuente: (SIEMENS, 2016)

2.3.2.3 Computador

La parte principal del computador es la CPU, la misma que puede procesar la información entregada por el proceso y posteriormente generar la señal de control. En el caso de que se seleccione al computador como elemento controlador, es necesario añadir a su hardware tarjetas de adquisición de datos y drivers, los cuales se encargan de acondicionar señales entregadas por el sistema sensorial, para posteriormente generar la señal de control con la potencia requerida para manipular el proceso.



Figura 14. Tarjeta de Adquisición de Datos.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016)

2.3.3 Actuadores

Son dispositivos capaces de transformar un tipo señal de control (eléctrica, mecánica o hidráulica), en una acción que influye directamente en el proceso a fin de automatizarlo.

Los tipos de actuadores que podemos tener son:

2.3.3.1 Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido como fuente de energía para realizar el trabajo mecánico.

2.3.3.2 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos, al igual que los actuadores neumáticos utilizan la diferencia de presión de un fluido para realizar el trabajo mecánico; sin embargo, no utilizan aire, sino fluidos no compresibles como aceites, etc.

2.3.3.3 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos son aquellos que utilizan la energía eléctrica para realizar el trabajo mecánico.

Dentro de las aplicaciones de control estos actuadores son los más utilizados debido a su controlabilidad.

- **MOTORES AC:** Son motores de inducción asincrónicos, comúnmente conocidos como jaula de ardilla por la forma que tiene su rotor. Su funcionamiento se hace mediante un campo magnético que se produce en el estator por medio de una corriente trifásica, este campo gira a una velocidad que se conoce como de sincronismo y se calcula mediante la ecuación 1. La velocidad real siempre va a ser menor a la de sincronismo y la relación entre estas dos se conoce como deslizamiento (véase ecuación 2). En la industria se usa este tipo de motores porque son de alta gran potencia y fácil mantenimiento.

$$n_{sinc} = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

$$n = (1 - s) \times N_{sinc} \quad (2)$$

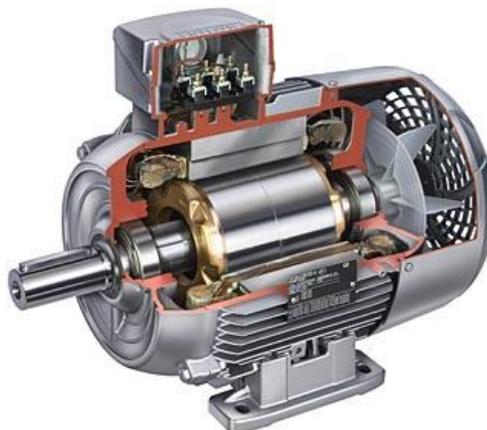


Figura 15. Motor tipo jaula de ardilla

Fuente: (Irvin Systems, 2016)

- **MOTORES DC:** Los motores DC o de corriente son los más utilizados en la actualidad por su facilidad de control. Estos motores están constituidos por dos devanados internos, el inductor y el inducido, que se alimentan con corriente continua.

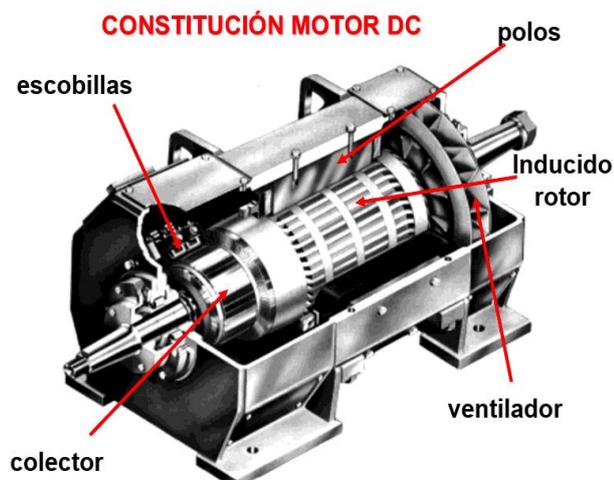


Figura 16. Esquema interno de motor DC

Fuente: (Saldarriaga, 2016)

- **SERVOMOTORES:** Al igual que un motor de corriente continua un servomotor convierte la energía eléctrica de naturaleza continua en movimiento mecánico, pero tiene la característica de que no genera un movimiento rotativo continuo, es decir su ángulo de giro tiene un límite y puede ser controlado tanto en posición como en velocidad.
- **MOTORES A PASOS:** Es un dispositivo electromecánico que por medio de una serie de pulsos eléctricos genera un movimiento rotativo que puede ser controlado en posición (número de pulsos en una unidad de tiempo), y en velocidad (frecuencia del tren de pulsos). Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad del giro.



Figura 17. Motor a pasos

Fuente: (Adiran Garcia, 2014)

Existen dos tipos de motores a pasos, los unipolares y los bipolares.

Los bipolares se componen de dos bobinas y los unipolares de 4, para diferenciarlos físicamente basta con observar el número de terminales que tiene cada motor, los motores bipolares constan de 4 terminales, mientras que los unipolares suelen tener 5 o 6 terminales.

La principal diferencia en su funcionamiento es que en un motor a pasos unipolar se activa una bobina a la vez mientras que un motor a pasos bipolar puede activar más de una bobina por vez, lo que representa mejores características en torque.

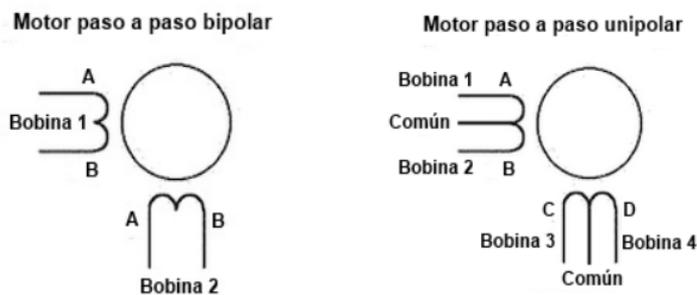


Figura 18. Motor a pasos bipolar y unipolar

Fuente: (Adiran Garcia, 2014)

Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados comúnmente llamados drivers, que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generan, a través de una etapa lógica la secuencia de pulsos que un circuito de conmutación distribuye en cada fase.

Su principal ventaja respecto a los servomotores y los motores de DC es su capacidad para el posicionamiento exacto y su controlabilidad en velocidad, además de que pueden girar de forma continua como los motores síncronos.

2.3.4 INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

La instrumentación industrial es la ciencia de control y medición automatizados (Espinosa, 2011). En esta área nos referimos a los diferentes tipos de elementos que tienen por objetivo el transformar un tipo de señal en otra; la cual pueda ser medida y registrada para que luego sea usada por un controlador. El tipo de los instrumentos más usados en control son los sensores que se encargan de retroalimentar señales requeridas por el proceso controlarlo o condicionarlo.

2.3.4.1 DRIVERS

Son elementos que funcionan como pre-actuadores, es decir, que sirven de interfaz entre la señal de control y los actuadores, aislando y elevando la potencia en el área de motores; existen diferentes tipos de drivers por nombrar algunos:

- **VFD:** Destinados al manejo de motores de corriente alterna.



Figura 19. Variador de Frecuencia.

Fuente: (Schneider-Electric, 2016)

- **STTEPER CONTROLLER:** Capaces de controlar motores a pasos, entregando al motor una mejor resolución y torque constante, trabajan a niveles lógicos TTL (0 a 5V), y reciben como señal de dirección, activación y entrada pulsos a una cierta frecuencia, que indica los pasos que dará el motor y su velocidad.



Figura 20. Motor a pasos NEMA 16 con su respectivo driver.

Fuente: (Smart Motor Devices, 2016)

2.4 PROGRAMACIÓN DE CONTROL NUMÉRICO

La programación de control numérico es una herramienta que permite interpretar las órdenes del operador a un lenguaje de máquina.

Se pueden utilizar dos métodos de programación, manual y automática:

2.4.1 Programación manual

En el caso de la programación manual, el programa se lo realiza a través del análisis geométrico de la pieza que se quiere maquinar por parte del operador, quien ingresa manualmente las ordenes, una a la vez, al controlador que interpreta el código y realiza el proceso de maquinado a través de los respectivos actuadores.

2.4.1.1 Código G

Es un lenguaje de programación basado en posicionamiento geométrico que se utiliza principalmente en procesos relacionados con la automatización y el control.

El código G permite indicar a una máquina herramienta posiciones, desplazamientos, velocidades, aceleraciones, entre otras.

Tabla 1.
Códigos G

<i>GRUPO</i>	<i>CÓDIGO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
01	G00	Posicionamiento rápido
01	G01	Interpolación lineal
01	G02	Interpolación circular en el sentido de las manecillas del reloj
01	G03	Interpolación circular en el sentido contrario manecillas del reloj
00	G04	Descanso
00	G10	Ajuste de excentricidad
02	G17	Selección del plano XY
02	G18	Selección del plano ZX
02	G19	Selección del plano YZ
06	G20	Entrada en pulgadas (in)
06	G21	Entrada en milímetros (mm)
00	G27	Verificación de regreso a punto de referencia
00	G28	Regreso a punto de referencia
00	G29	Regreso del punto de referencia
07	G40	Cancelación de compensación del cortador
07	G41	Compensación cortadora izquierda
07	G42	Compensación cortadora derecha
08	G43	Compensación de longitud de herramienta dirección positiva (+)
08	G44	Compensación de longitud de herramienta dirección negativa (-)
08	G49	Cancelación de compensación de longitud de herramienta
09	G80	Cancelación de ciclo enlatado
09	G81	Ciclo de taladro, perforación de marcado
09	G82	Ciclo de taladrado, contra taladrado
09	G83	Ciclo de taladrado peck
09	G84	Ciclo de machueleado
09	G85	Ciclo de barrenado# 1
09	G86	Ciclo de barrenado# 2
09	G87	Ciclo de barrenado# 3
09	G88	Ciclo de barrenado# 4
09	G89	Ciclo de barrenado# 5
03	G90	Programación absoluta
03	G91	Programación incremental
00	G92	Ajuste del punto cero del programa
05	G94	Avance por minuto

(ISO-DIN 66025)

2.4.1.2 Código M

Tabla 2.

Códigos M

<i>CÓDIGO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<i>M00</i>	Paro de programa
<i>M01</i>	Paro opcional
<i>M02</i>	Fin de programa
<i>M03</i>	Arranque del husillo (hacia adelante, en el sentido de las manecillas del reloj)
<i>M04</i>	Arranque del husillo (en reversa, contrario al sentido de las manecillas del reloj)
<i>M5</i>	Paro del husillo
<i>M6</i>	Cambio de herramienta
<i>M7</i>	Niebla de refrigerante activada
<i>M8</i>	Chorro de refrigerante activado
<i>M9</i>	Refrigerante desactivado
<i>M19</i>	Orientación del husillo
<i>M30</i>	Fin de la cinta (regreso a principio de la memoria)
<i>M48</i>	Liberación de cancelación
<i>M49</i>	Cancelación
<i>M98</i>	Transferencia a subprograma
<i>M99</i>	Transferencia a programa principal (fin de subprograma)

(ISO-DIN 66025)

Existen también los códigos F, S, D, H, P y T que se utilizan para representar funciones tales como avance, velocidad, compensación de la longitud de la herramienta, llamada de subrutina, número de la herramienta, etc.

2.4.2 Programación automática

En el caso de la programación automática, los cálculos son realizados por un computador, a partir de archivos generados por software de dibujo y diseño, el ordenador calcula las relaciones geométricas y genera un archivo en código G, listo para enviar las sentencias a la maquina CNC.

El proceso por el cual diseña y manufacturan piezas a través de sistemas CNC se llaman CAD y CAM respectivamente.

2.4.2.1 CAD (Diseño asistido por computadora)

Llamado CAD por sus siglas en inglés (Computer Aided Design), es una tecnología que implica el uso de ordenadores para la realización de tareas de creación, análisis, modificación y optimización de un diseño.

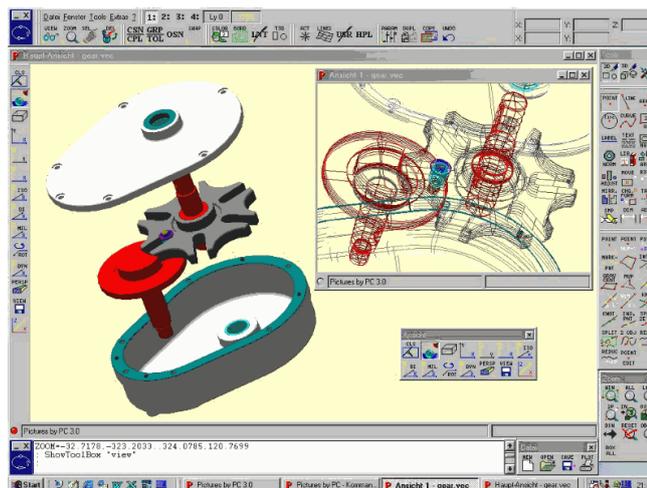


Figura 21. Ejemplo de software CAM

Fuente: (Rubbermold, 2013)

Entre los principales programas CAD están:

- AutoCAD
- SolidWorks
- ArchiCAD
- SketchUP
- 3D Max

2.4.2.2 CAM (Manufactura Asistida por computadora)

De igual forma toma su nombre por sus siglas en inglés (Computer Aided Manufacturing).

El software CAM es una herramienta que sirve de interfaz o puente entre el diseño asistido por computadora CAD y el lenguaje de programación de una máquina CNC

en la etapa de manufactura, con la mínima intervención de operarios. Es decir, generan programas de control numérico a partir de diseños asistidos por computadora.

Entre los principales programas CAM están:

- Work Nc
- Unigraphics
- CamWoks
- GibbsCAM

2.5 SOFTWARE PARA CNC

Existen muchos programas dedicados al control de las máquinas CNC, dependiendo de las características, su interfaz y nivel de controlabilidad suelen ser de tipo software libre o software pagos, entre los principales están:

2.5.1 Grbl

Es un programa de código abierto diseñado para el control de máquinas CNC a través de comunicación serial y java.

Brinda excelentes características de compatibilidad con varios sistemas operativos, y facilidades en configuración e implementación del mismo.

2.5.2 Mach3

Es un software pago diseñado exclusivamente para las máquinas de control numérico, capaz de controlar con gran eficiencia características de operatividad de la máquina.

Match3 funciona únicamente en Windows y brinda un interfaz poco eficiente para el control del usuario.

2.5.3 LinuxCNC

Es un sistema operativo de distribución libre basado en Linux, que está optimizado para el control de máquinas CNC a través de la comunicación por puerto paralelo.

2.5.4 Cnc Control

Es un software que permite el movimiento de los ejes de una máquina CNC de forma manual y automática mediante la ejecución de programas en código G.

Cnc Control es un software libre que posee un interfaz de usuario orientado al aprendizaje y manipulación de las variables de control de la máquina CNC.

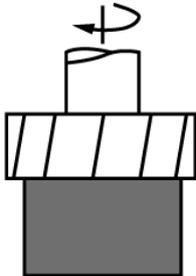
Funciona en Windows y Linux.

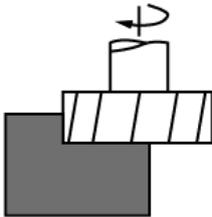
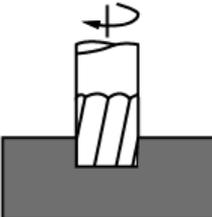
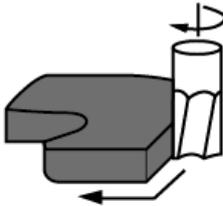
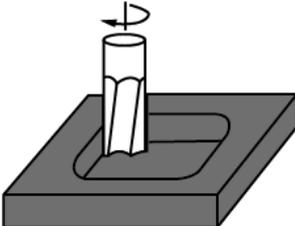
2.6 OPERACIONES DE FRESADO

En el fresado lo que se realiza es un proceso de arranque de viruta por medio de herramientas llamadas “fresas” las cuales giran a cierta velocidad de corte para dar la forma a un cierto material base. Las herramientas de corte están formadas una serie de dientes que generan varias virutas en una revolución.

Tabla 3.

Operaciones de fresado

OPERACIONES	FIGURA
Planeado	

OPERACIONES	FIGURA
Fresado en es cuadrada	
Ranurado	
Perfilado	
Cavidades	

2.7 PARÁMETROS DE CORTE

El objetivo de la determinación de los parámetros de corte siempre será utilizar el mayor avance y la velocidad de corte eficiente para lograr el menor tiempo de maquinado que luego será traducido en costo de producción. Al momento de manufacturarse un material deben tomarse en cuenta varios factores (Steve, 2009). A continuación, se detallarán los más importantes:

- El tipo de material de trabajo.
- El material de la fresa.

- El diámetro de la fresa.
- El acabado superficial que se requiere.
- La profundidad de corte seleccionada.
- La rigidez de la máquina y el montaje de la pieza.
- Velocidad de corte (V_c).
- Velocidad de giro de la herramienta (n).
- Velocidad de avance (V_s).
- Potencia de corte (P_c).
- Potencia nominal (P_n).
- Profundidad de corte (P).
- Fuerza específica de corte (K_s).
- Rendimiento de la máquina (U).

2.7.1 Dirección de avance

Se considera dirección de avance al sentido en el que el movimiento relativo que toma la pieza con respecto a la herramienta. La selección del tipo de dirección (figura X) dependerá del material de la pieza y tipo de sujeción que se tenga.

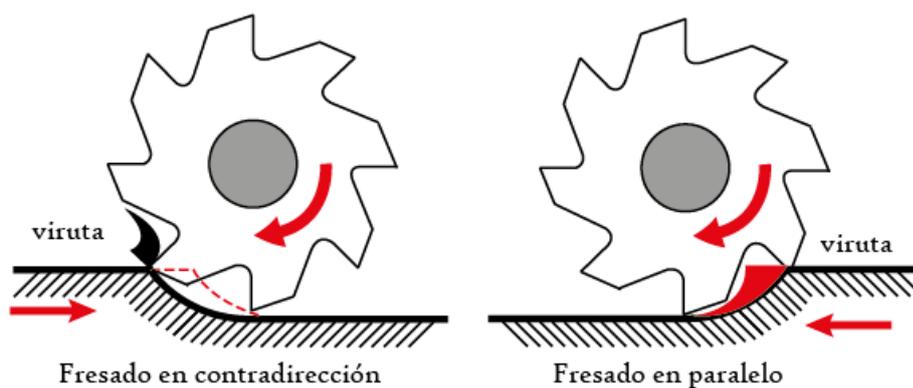


Figura 22. Tipos de dirección de avance

2.7.2 Profundidad de corte

Al intentar dar forma a una pieza, es necesario tomar en cuenta el tipo de corte que se va a realizar sobre el material, pudiendo ser dos: desbastado y afinado; el primero

reduce la mayor cantidad de material lo más rápido que la fresadora permita con una velocidad de corte baja, en cuanto el segundo da acabados a velocidades de cortes más altas y bajas velocidades de avance(feedrate).

2.7.3 Potencia de corte (P_c)

En la fabricación con máquinas y herramientas se distinguen dos potencias: potencia útil de corte de la herramienta (P_c) y la potencia nominal suministrada por el motor (P_n). El rendimiento de una máquina herramienta es la relación entre la potencia de corte y la potencia nominal (Wildi, 2007). En la Tabla X se presenta el rendimiento de las máquinas herramienta, dependiendo de su uso.

$$U = \frac{P_c}{P_n} \quad (3)$$

Donde:

U = Rendimiento de la máquina (%).

P_c = Potencia de Corte (Kw).

P_n = Potencia nominal del motor (%).

2.7.4 Velocidad de corte (V_c)

La velocidad de corte de un material se puede definir como la velocidad en metros por minuto a la cual dicho material puede ser maquinado con eficiencia. En vista de que los distintos tipos de metales varían en dureza, estructura y maquinabilidad, deben utilizarse diferentes velocidades de corte para cada tipo de material (Steve, 2009).

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (4)$$

La tabla para valores V_c de cada material se pueden apreciar en el Anexo 1.

Donde:

V_c = Velocidad de corte (m/min).

D = Diámetro de la herramienta (mm).

N = Velocidad del husillo (rpm).

2.7.5 Avance (s')

El avance se refiere al movimiento relativo que presenta la pieza con respecto a la herramienta y se mide en milímetros por minuto.

Los valores del avance en el fresado se obtienen de la multiplicación de las revoluciones por minuto (rpm) de la fresa, el número de dientes de la fresa y el tamaño de la viruta deseado (viruta/diente).

La viruta o avance por diente es la cantidad de material que debe maquinarse o eliminarse cuando la fresa avanza dentro de la pieza (Steve, 2009).

La tabla para valores s' de cada material se pueden apreciar en el Anexo 1.

$$s' \left[\frac{mm}{min} \right] = n \times CPT \times rpm \quad (5)$$

Donde:

n = Número de dientes de la fresa.

CPT = Avance por diente (mm/rev).

rpm = Revoluciones por minuto de la fresa.

2.7.6 Avance por diente (Sz)

Para optimizar la vida de servicio y resultado del corte es preciso seleccionar el avance por diente correcto. Un avance demasiado bajo ocasiona un desgaste prematuro de los dientes y un avance excesivo comporta el riesgo de que el volumen de los huecos entre los dientes no sea suficiente para transportar la viruta (Holguer Guanoluisa, 2013).

Para calcular el avance por diente se utilizará la ecuación X (Swedex, 2016).

$$S_z = \frac{s'}{N * z} \quad (6)$$

Donde:

z = Número de dientes de la herramienta.

2.7.7 Sección de Viruta (S_v)

Relación que existe entre el avance por diente de la fresa (S_z) y la profundidad de corte a (Holguer Guanoluisa, 2013).

$$S_v = S_z \times a \quad (7)$$

2.7.8 Presión de corte

Establece que la fuerza de corte es directamente proporcional a la sección de la viruta indeformada por una constante de proporcionalidad K_s , llamada presión de corte (Holguer Guanoluisa, 2013).

$$F_c = K_s \times S_v \quad (8)$$

Tabla 4.

Valores de presión de corte K_s de algunos materiales.

Material	Tipo	$K_s \left[\frac{N}{mm^2} \right]$
Aceros	Acero blando	2000
	Acero de construcción	2100
	Acero al carbono	2200
Material	Tipo	$K_s \left[\frac{N}{mm^2} \right]$
Aceros	Acero aleado	2400
Cobre	Cobre	800
	Latón	1000
	Bronce	800

2.8 HERRAMIENTAS Y ELEMENTOS DE FIJACIÓN

Para realizar un proceso de mecanizado por arranque de viruta, es necesario garantizar la correcta sujeción del material a desbastar al banco de trabajo y la

selección de la fresa correcta que se va a utilizar dependiendo del tipo de maquinado que se va a realizar; para ello existen varios tipos de fresas y elementos de sujeción.

2.8.1 Herramientas de corte

Para realizar procesos de fresado se utiliza la fresa, que es una herramienta giratoria de varios filos, esta herramienta se caracteriza por su diámetro exterior, dureza, longitud, por el número de dientes, por la distancia entre dientes consecutivos (paso de los dientes) y el tipo de fijación que posee la fresa con respecto del husillo.

2.8.1.1 Clasificación de fresas

- **Fresas cilíndricas:** Este tipo de fresas poseen una superficie cilíndrica que se sujeta al husillo mediante una pinza de apriete. Una fresa cilíndrica es similar a una broca, pero posee mejores características para el mecanizado, soportan las cargas axiales y radiales lo que permite realizar operaciones tanto de taladrado como de ranurado.



Figura 23. Fresas cilíndricas

Fuente: (SECO TOOLS, 2015)

- **Fresas circulares:** Este tipo de fresas tiene forma de disco con un agujero en el centro en el cual se acopla el eje de la fresadora a través de una chaveta. Se clasifican por su diámetro exterior, número de dientes, ancho de la superficie, entre otras. Poseen mayor capacidad de desbaste que las fresas cilíndricas

debido al tipo de sujeción con el eje y la distribución de las cargas dinámicas durante el proceso de mecanizado.



Figura 24. Fresas circulares.

Fuente: (DMYH , 2014)

- **Fresas de plato:** Son fresas de grandes dimensiones que se utilizan para realizar mecanizados de planeado de superficies, poseen un sistema de dientes intercambiables que permite reemplazarlos luego de desgastes o rupturas.



Figura 25. Fresas de Plato.

Fuente: (DMYH , 2014)

- **Fresas madre:** Este tipo de fresas en particular se utilizan para la fabricación de grandes volúmenes de engranes a través de procesos de fresado especiales.



Figura 26. Fresas madre

Fuente: (SAAZOR WÄLZTECHNIK, 2014)

2.8.2 Elementos de fijación

Tanto la Fresa como el material que se va a desbastar se encuentran sometidos a fuerzas dinámicas durante el proceso de mecanizado por lo que es importante garantizar un óptimo sistema de fijación.

Los elementos de sujeción impiden el movimiento de la pieza respecto de el bando de trabajo a través de la fricción, apriete, aplastamiento, etc.

Para las operaciones de fresado se usan los siguientes medios de sujeción:

- Mordaza de sujeción
- Bridas de sujeción
- Aparato divisor
- Mesa giratoria

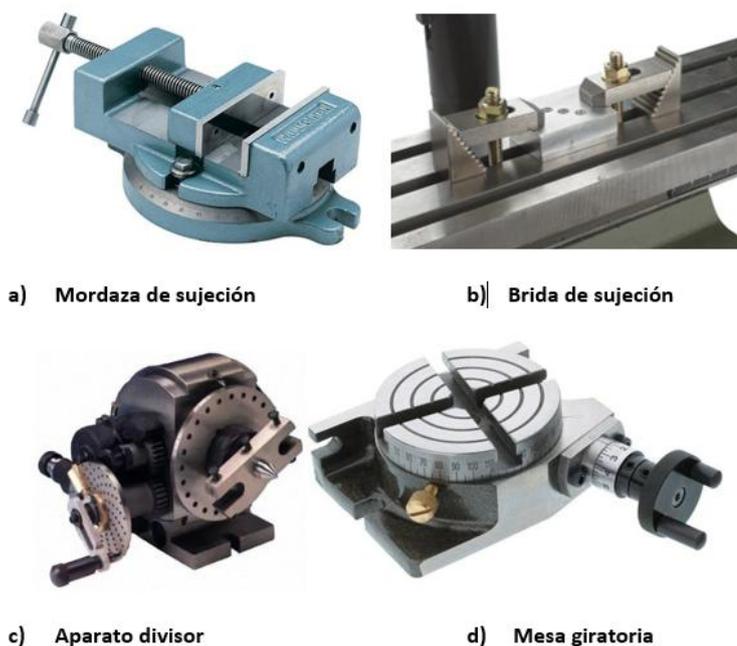


Figura 27. Elementos de sujeción

Fuente: (DMYH , 2014)

2.9 TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Los transmisores de potencia son elementos encargados de llevar el trabajo mecánico producido por los actuadores hasta las articulaciones de la máquina que realizan los movimientos.

Los transmisores de potencia pueden ser utilizados para convertir un movimiento circular en un movimiento lineal o viceversa.

2.9.1 Engranés

Los engranes son mecanismos de transmisión de potencia llamados también ruedas dentadas, sirven para transmitir movimiento circular a partir del contacto y deslizamiento de sus dientes.



Figura 28. Diferentes tipos de engranes

Fuente: (EyMF, 2015)

2.9.2 Tornillo sin fin

Al igual que un engrane un tornillo sin fin es un elemento que transmite movimiento giratorio a través del contacto de ruedas dentadas, pero a diferencia de los engranes se lo utiliza en ejes que se encuentran en ángulo recto.



Figura 29. Tornillo sin fin.

Fuente: (EyMF, 2015)

2.9.3 Acoplamientos

Los acoplamientos son un mecanismo de transmisión de potencia entre ejes concéntricos que pueden o no ser del mismo diámetro.



Figura 30. Acoplamientos elásticos.

Fuente: (Lovejoy INC., 2014)

2.10 NORMAS DE SEGURIDAD PARA FRESADO

Los principales riesgos que se presentan al trabajar con máquinas fresadoras son el contacto accidental con la cuchilla o la pieza en movimiento, fallas en los sistemas de sujeción empleados, atrapamiento de extremidades debido a los sistemas móviles de la máquina.

Para ello existen normas básicas de seguridad que se deben tener en cuenta al momento de trabajar con sistemas de fresado:

Tabla 5.
Normas de seguridad

<i>Nro.</i>	<i>Descripción</i>
1	Utilizar equipo de seguridad: gafas de seguridad, caretas, entre otros.
2	No utilizar ropa holgada o muy suelta.
3	Utilizar preferentemente ropa de algodón.
4	Utilizar calzado de seguridad.
5	Mantener siempre el lugar limpio.
6	Si se trabaja con piezas pesadas utilizar los montacargas u otro sistema.
7	Trabajar con el cabello recogido en caso de que este estuviera largo
8	No llevar relojes, anillos o algún tipo de joyería.
9	Realizar un reconocimiento antes de arrancar la máquina
10	Trabajar en un área correctamente iluminada
11	Identificar el "Pare" de emergencia de la máquina antes de empezar.

(JNMV , 2015)

2.11 MÉTODO DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

Los métodos de control estadísticos de procesos o SPC por sus siglas en inglés, son herramientas numéricas que se utilizan para medir la calidad de algún proceso o servicio en particular a partir de la selección de criterios objetivos para distinguir una variación en un evento de importancia.

Básicamente consiste en monitorizar el centro del proceso y las variaciones que se presentan para recopilar datos que permitan corregir errores en el proceso que estén afectando la calidad final del producto o servicio.

2.11.1 Gráficas de control para variables

Las gráficas de control son representaciones de la variabilidad de un proceso.

2.11.1.1 Gráfica \bar{X}

Dentro del control estadístico de procesos este tipo de graficas se utilizan para representar la media del valor de los datos muestreados. Una vez identificadas las causas asignables a cada variación del proceso se puede determinar si se cumple o no con los parámetros establecidos.

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R} \quad (9)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R} \quad (10)$$

Donde:

- $UCL_{\bar{X}}$ Es el límite de control superior de la media.
- $LCL_{\bar{X}}$ Es el límite de control inferior de la media.
- \bar{R} Es el promedio del rango.
- $\bar{\bar{X}}$ Es el límite de control, valores establecidos como objetivo para el proceso.
- A_2 Es una constante de proporcionalidad para el tipo de gráfica. (Anexo D).

2.11.1.2 Gráfica R

Las gráficas R se denominan gráficas de rango, son utilizadas para representar la variabilidad de los procesos.

A través de la diferencia de los valores extremos del resultado del muestreo se obtiene el rango de los datos muestreados en el proceso, si algún dato aparece fuera de este rango indica que el proceso no está controlado.

$$UCL_R = D_4 \times \bar{R} \quad (11)$$

$$LCL_R = D_3 \times \bar{R} \quad (12)$$

Donde:

- UCL_R Es el límite de control superior del rango.
- LCL_R Es el límite de control inferior del rango.
- \bar{R} Es el promedio del rango.

- D_3, D_4 Son constantes de proporcionalidad para un tamaño de muestra dado (tres sigma).

2.11.2 Desarrollo de gráficas \bar{X} y R

Los pasos para elaborar las gráficas \bar{X} y R son:

- Obtener datos sobre la medición de la calidad de una variable, por ejemplo, el peso, el diámetro, tiempo, etc., y organizar estos datos por números de muestra. Es recomendable tomar al menos unas 20 muestras para usarlas en la construcción de una gráfica de control.
- Calcular el rango R para cada muestra y el rango promedio \bar{R} para el conjunto de muestras.
- Utilizar las tablas para obtener los valores de D_3 y D_4 , que se usan para mantener los acotamientos de control inferior y superior de la gráfica R.
- Trazar los rangos de la muestra. Si los valores se encuentran dentro de los límites de tolerancia se puede realizar el siguiente paso, de lo contrario hay que encontrar las causas asignables a los errores, corregirlos y regresar al paso inicial.
- Utilizar las tablas para encontrar el valor de A_2 , y determinar los parámetros para $UCL_{\bar{X}}$ y $LCL_{\bar{X}}$, y construir la gráfica.
- Trazar las medias de la muestra. Si todas están bajo control, el proceso está controlado estadísticamente en términos del promedio del proceso y la variabilidad del mismo. Por el contrario, si alguna de las representaciones está fuera de los límites de control es necesario buscar las causas asignables, corregirlas y regresar al inicio nuevamente. (Krajewski, L. J. & Ritzman, L. P., 2000).

2.12 RESUMEN

- El fresado es una técnica de desbaste de material por arranque de viruta que consiste en el movimiento relativo de una herramienta de corte giratoria respecto de un material base.
- Las fresadoras son máquinas herramientas que permiten realizar operaciones de fresado, posee un banco de trabajo con la capacidad de moverse en tres o más ejes respecto de la herramienta.
- El control numérico por computadora o CNC por sus siglas en inglés, es un sistema de automatización de máquinas herramientas que permite el control de los ejes de la máquina a través de comandos de programación.
- Se conoce como automatización al conjunto de dispositivos electromecánicos, maquinaria y sistemas computarizados que permiten el monitoreo y control de procesos.
- Los actuadores son dispositivos capaces de transformar un tipo señal de control (eléctrica, mecánica o hidráulica), en una acción que influye directamente en el proceso a fin de automatizarlo.
- La programación de control numérico es una herramienta que permite interpretar las órdenes del operador a un lenguaje de máquina, que para el caso de los sistemas CNC se conocen como códigos G.
- Los elementos de fijación son herramientas que permiten garantizar que no exista movilidad o desplazamiento relativo entre el banco de trabajo y el material a desbastar.
- Existen varias normas de seguridad que se debe tener en cuenta al momento de realizar operaciones de fresado con la finalidad de disminuir los riesgos y garantizar un mejor trabajo.
- El control estadístico de procesos es una herramienta matemática que cuantifica la calidad de un producto o servicio a través del uso de la estadística.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo contiene una descripción detallada de los parámetros de diseño utilizados para la automatización de la fresadora Bridgeport en sus sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos, así como también la información relacionada con la construcción e implementación de dichos sistemas.

3.1 ESTADO INICIAL DE LA MÁQUINA

Para efectuar un proceso de automatización es necesario realizar un estudio previo sobre las condiciones, características y estado de la máquina. Para posteriormente realizar un listado de los elementos funcionales y no funcionales de la máquina y empezar con la etapa de diseño.

Tabla 6.

Características del estado inicial de la máquina

<i>Componente</i>	<i>Estado</i>	<i>Observación</i>
<i>Motor del husillo</i>	Funcional	Mantenimiento
<i>Tornillo sin fin eje X</i>	Funcional	Mantenimiento
<i>Tornillo sin fin eje Y</i>	Defectuoso	Reparación y mantenimiento
<i>Tornillo sin fin eje Z</i>	Funcional	Mantenimiento
<i>Motor de avance eje x</i>	No Funcional	Reemplazo
<i>Mesa de trabajo</i>	Funcional	Mantenimiento
<i>Sistema eléctrico</i>	Defectuoso	Reemplazo
<i>Sistema hidráulico</i>	No Funcional	Desmontaje
<i>Anclaje</i>	No Funcional	Reparación
<i>Pintura</i>	Defectuoso	Reemplazo
<i>Dial eje x</i>	Funcional	Reemplazo
<i>Dial eje y</i>	Funcional	Reemplazo
<i>Dial eje z</i>	Funcional	Reemplazo

3.2 DEFINICIÓN DE NECESIDADES

Al momento de diseñar el sistema que automatizará la máquina fresadora, es necesario determinar las necesidades que deberá cumplir a lo largo de su operación; ya que a partir de la misma se establecerán las especificaciones que caracterizarán a la máquina. En la tabla X se detallan las necesidades para la automatización de la fresadora Bridgeport; donde se tomará en cuenta las necesidades tanto de usuarios(U) y diseñadores(D), además de los requerimientos(R) o deseos(D) que beneficien el diseño.

Tabla 7.

Detalle de necesidades

Concepto	#	Propone	R/D	Necesidad
Función	1	D	R	Cambio de velocidades de husillo
	2	D	R	Desmontable
	3	U	D/R	Operación manual del equipo
Manufactura	4	D	R	Acoplamiento de motores
Control	5	D/U	R	Software CNC
	6	D/U	R	Interfaz Intuitiva
	7	D	R	Interfaz de control
Costos	8	D	D	Minimizar costos

3.3 DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES

Conociendo las necesidades tanto del diseñador como del usuario, se procederá a establecer las especificaciones a partir de una evaluación por medio de métricas, las cuales establecen en forma cuantitativa las necesidades. Estas especificaciones deberán ser cumplidas en gran medida para solventar las necesidades del usuario. En la tabla 8 se establecen los parámetros que definirán el diseño del sistema automático.

Tabla 8.
Detalle de especificaciones

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
2,3,4,5,6,7,8	Desplazamientos de los ejes: X, Y, Z	400 × 300 × 290	<i>mm</i>
3,4,5,6,7,8	Velocidad de avance: X, Y, Z	250 × 250 × 250	<i>mm/min</i>
3,4,5,7	Precisión	±0,1	<i>mm</i>
1,5,7,8	Velocidad de husillo	2500	<i>rpm</i>

3.4 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA FUNCIONAL

A partir de la definición de especificaciones se establece la forma en la que se desarrollará el sistema de automatización. Para lograr esto se debe conocer el funcionamiento del producto (Fresadora CNC), que permite estructurar el diseño a partir de módulos. En la tabla X se detallan los módulos que se utilizarán en la automatización de la fresadora Bridgeport.

Tabla 9.
Módulos para la Fresadora Bridgeport

Módulo	Funciones
Movilidad	Desplazamientos ejes
Control	Control de parámetros CNC
Interfaz	Software de control CNC
Comunicación	Arduino tarjetas
Potencia AC	Acondicionamiento de señal de control
Transmisión de potencia	Acoplamiento de motores a los ejes

3.5 DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para definir las alternativas de diseño se requiere plantear las posibles soluciones para cada uno de los módulos establecidos.

3.5.1 Módulo 1. Movilidad

Este módulo está orientado a definir el tipo de actuador adecuado para generar movimiento en cada uno de los ejes de la fresadora.

Existen varios tipos de actuadores como motores de combustión interna, actuadores hidráulicos, neumáticos, eléctricos, etc. Sin embargo, para este módulo se consideraron los controladores eléctricos debido al alto costo y la limitación de aplicaciones que presentan el resto de actuadores.

Los actuadores seleccionados para este módulo son: a) Motores a Pasos, b) Servomotores, c) Motores DC, d) Motores AC.

3.5.1.1 Motores a pasos

Es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de pulsos eléctricos en movimientos angulares discretos.

Ventajas	Desventajas
No requiere sensores para su posicionamiento	Costosos
Fácil de controlar en velocidad y aceleración	
Común en el mercado	
Alto torque	
Voltaje de operación de 3,5 a 34 voltios	

3.5.1.2 Servomotores

Es un actuador electromecánico similar a un motor de corriente continua con la particularidad que es capaz de ubicarse en una posición angular específica dentro de su rango de operación.

Ventajas	Desventajas
Fácil control de posicionamiento	Angulo de giro limitado
Alto torque	Costosos
Comunes en el mercado	

3.5.1.3 Motores DC

Es un actuador electro mecánico que convierte la energía eléctrica de tipo continua en movimiento mecánico continuo.

Ventajas	Desventajas
Alto torque	Difícil implementación
Común en el mercado	Control limitado
Bajos costos	

3.5.1.4 Motores AC

Es un actuador electro mecánico que convierte la energía eléctrica de tipo alterna en movimiento mecánico continuo.

Ventajas	Desventajas
Alto torque	Difícil implementación
Comunes en el mercado	Control limitado
	Costosos

3.5.2 Módulo 2. Control

Los sistemas de control son los encargados de monitorizar y controlar las operaciones realizadas por la máquina.

3.5.2.1 PLC

Es el controlador más usado a nivel industrial, que ofrece una variedad de modelos que solventan las diferentes necesidades en los procesos industriales.

Ventajas	Desventajas
Modularidad	Costosos
Uso sencillo	Software pago
Robusto	
Protocolos de comunicación industrial	

3.5.2.2 PC

Los ordenadores o computadores personales son sumamente comunes en la actualidad, poseen importantes características de control y procesamiento.

Ventajas	Desventajas
Programabilidad	Costosos
Uso sencillo	Requiere drivers
Alta velocidad de procesamiento	
Fácil adquisición	
Periféricos de entrada y salida	

3.5.3 Módulo 3. Interfaz

El interfaz humano máquina o HMI es un software específico que permite comunicar al operario con la máquina para que esta realice las tareas asignadas.

3.5.3.1 Match3

Es un software diseñado para el control de maquinarias CNC a través de un computador. Este programa puede ser configurado para trabajar como control de fresadora, torno, o cortadora láser dependiendo de la aplicación que se requiera.

Ventajas	Desventajas
Alta controlabilidad	Software pago
Buen desempeño	Interfaz deficiente
Control de 4 ejes	Compatible solo con Windows

3.5.3.2 LinuxCNC

Es un sistema operativo desarrollado en base a Linux orientado al control de máquinas CNC a través de la comunicación por puerto paralelo.

Ventajas	Desventajas
Software Libre	Comunicación por puerto paralelo
Buen desempeño	Compatible solo con Linux
Interfaz completo	Difícil manejo

3.5.3.3 CncControl

Es un software libre, desarrollado para el control de máquinas CNC y su control de forma intuitiva a través de la comunicación serial.

Ventajas	Desventajas
Software Libre	Controlabilidad limitada
Buen desempeño	
Interfaz intuitivo	
Comunicación serial	
Compatibilidad con Windows, Linux y MacOX	

3.5.4 Módulo 4. Comunicación

La comunicación hace referencia al medio por el cual el controlador realiza una acción sobre los actuadores a través de sistemas electrónicos y de comunicación.

3.5.4.1 Tarjeta de conexión paralela

Estas tarjetas utilizan el puerto paralelo del computador para transmitir la información a la tarjeta encargada de activar los actuadores.

Ventajas	Desventajas
Uso sencillo	No posee puertos analógicos
Bajo costo	Limitación de I/O
Común en el mercado	
Hardware libre	

3.5.4.2 Arduino

Es una tarjeta desarrollada en hardware libre con grandes capacidades de control, pero pocas características de robustez en ambientes industriales.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Robustez
Hardware libre	
Varios tipos de señales (análogas y digitales)	
Comunicación serial	

3.5.5 Módulo 5. Potencia Ac

Para controlar la velocidad del husillo se plantean dos posibles soluciones, siendo estas una lógica de contactores y el uso de un variador de frecuencia debido a que se trata de un motor de corriente alterna.

3.5.5.1 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un sistema para el control rotacional de motores de corriente alterna.

Ventajas	Desventajas
Controlabilidad	Costosos
Robustez	Reduce la potencia óptima
Comunicación	
Común en el mercado	

3.5.5.2 Contactores

Son dispositivos electromecánicos que tienen como objetivos permitir o no el paso de la corriente eléctrica.

Ventajas	Desventajas
Comunes en el mercado	Baja controlabilidad
Costos	Difícil implementación
Máxima potencia	

3.5.6 Módulo 6. Transmisión de potencia

3.5.6.1 Tornillo sin fin

La transmisión de potencia por tornillo sin fin tiene como principal ventaja el aumento del par de torsión y la reducción de velocidad.

Ventajas	Desventajas
Aumento de torque	Desgaste
	Altos costos
	Difícil implementación
	Lubricación

3.5.6.2 Acoplamientos

Cuando la aplicación que se va a realizar no requiere un aumento en torque, se utiliza un acoplamiento directo entre el eje que entrega el trabajo mecánico y el eje encargado del movimiento de la máquina.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia	No hay aumento de torque
Bajos costos	
Fácil implementación	
No requieren lubricación	

3.5.6.3 Engranés

Los engranes están entre los sistemas de transmisión de potencia más comunes en el mercado, debido a su versatilidad en las relaciones de reducción y amplificación.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia	Desgaste
Aumento de torque	Ruidosos
Fácil manufactura	Requieren lubricación

3.6 EVALUACION Y SELECCIÓN DE DISEÑO

El esquema de evaluación de criterios ponderados (Karl T. Ulrich, 2013), es el método que se usará para seleccionar la mejor alternativa para el diseño.

Para seleccionar un módulo es necesario ponderar los criterios, asignando un valor de 0 o 1, que indica una baja o alta relevancia respecto a filas y columnas de la matriz. Específicamente un valor de 1 significa que el criterio de la fila es más importante que el de la columna, por el contrario, el valor de 0 indica que el criterio de la columna es más importante que el de la fila.

3.6.1 Módulo 1 Movilidad

Tabla 10.

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1

Criterio	Costo	Controlabilidad	Potencia	$\sum +1$	Ponderación
Costo	-	0	0	1	0,17
Controlabilidad	1	-	1	3	0,50
Potencia	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1

- Solución A: Motor PAP
- Solución B: Servo-Motores
- Solución C: Motores de corriente directa
- Solución D: Motores de corriente análoga

Tabla 11.

Ponderación de costo para las alternativas del módulo 1

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	0	1	3	0,3
Solución B	0	-	0	0	1	0,1
Solución C	1	1	-	1	4	0,4
Solución D	0	1	0	-	2	0,2
				Suma	10	1

Tabla 12.

Ponderación de controlabilidad para las alternativas del módulo 1

Controlabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	1	4	0,4
Solución B	0	-	1	1	3	0,3
Solución C	0	0	-	1	2	0,2
Solución D	0	0	0	-	1	0,1
				Suma	10	1

Tabla 13.

Ponderación de potencia para las alternativas del módulo 1

Potencia	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0	2	0,2
Solución B	1	-	1	0	3	0,3
Solución C	0	0	-	0	1	0,1
Solución D	1	1	1	-	4	0,4
				Suma	10	1

Tabla 14.

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 1.

	Costo	Controlabilidad	Potencia	\sum	Orden de selección
Solución A	0,05	0,20	0,07	0,32	1
Solución B	0,02	0,15	0,10	0,27	2
Solución C	0,07	0,10	0,03	0,20	3
Solución D	0,03	0,05	0,12	0,2	4

3.6.2 Módulo 2. Control

Tabla 15.

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 2.

	Costo	Programabilidad	Robustez	Software	$\sum +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	1	4	0,4
Programabilidad	0	-	1	1	3	0,3
Robustez	0	0	-	1	2	0,2
Software	0	0	0	-	1	0,1
				Suma	10	1

- Solución A: PLC
- Solución B: Computador

Tabla 16.

Ponderación de costo para las alternativas del módulo 2

Costo	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 17.

Ponderación de programabilidad para las alternativas del módulo 2

Programabilidad	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 18.

Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 2

Robustez	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 19.

Ponderación de software para las alternativas del módulo 2

Software	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 20

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 2.

	Costo	Programabilidad	Robustez	Software	\sum	Ponderación
Solución A	0,13	0,10	0,13	0,03	0,39	2
Solución B	0,27	0,20	0,07	0,07	0,61	1

3.6.3 Módulo 3. Interfaz

Tabla 21.

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3.

	Licencia	Complejidad	Comunicación	$\sum +1$	Ponderación
Licencia	-	1	1	3	0,50
Complejidad	0	-	0	1	0,17
Comunicación	0	1	-	2	0,33
			Suma	6	1

- Solución A: Match3
- Solución B: LinuxCNC
- Solución C: CNC control

Tabla 22.

Ponderación de licencia para las alternativas del módulo 3

Licencia	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 23.

Ponderación de complejidad para las alternativas del módulo 3

Complejidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	0	2	0,33
Solución B	0	-	0	1	0,17
Solución C	1	1	-	3	0,50
			Suma	6	1

Tabla 24.

Ponderación de comunicación para las alternativas del módulo 3

Comunicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	0	2	0,33
Solución C	1	1	-	3	0,50
			Suma	6	1

Tabla 25.

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 3.

	Licencia	Complejidad	Comunicación	$\sum .$	Ponderación
Solución A	0,09	0,06	0,06	0,21	3
Solución B	0,25	0,03	0,11	0,39	2
Solución C	0,17	0,09	0,17	0,43	1

3.6.4 Módulo 4. Comunicación**Tabla 26.**

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4

	Transmisión	I/O	Robustez	$\sum +1$	Ponderación
Transmisión	-	1	1	3	0,50
I/O	0	-	1	2	0,33
Robustez	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1

- Solución A: Tarjeta Paralela
- Solución B: Arduino

Tabla 27.

Ponderación de transmisión para las alternativas del módulo 4

Transmisión	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 28.

Ponderación de I/O para las alternativas del módulo 4

I/O	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 29.

Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 4

Robustez	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 30.

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 4.

	Transmisión	I/O	Robustez	\sum	Ponderación
Solución A	0,17	0,11	0,11	0,39	2
Solución B	0,34	0,22	0,06	0,62	1

3.6.5 Módulo 5. Potencia Ac (contactores, variador de frecuencia)

Tabla 31.

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 5

	Robustez	Costos	Controlabilidad	$\sum +1$	Ponderación
Robustez	-	1	1	3	0,50
Costos	0	-	1	2	0,33
Controlabilidad	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1

- Solución A: Variador de Frecuencia (VDF)
- Solución B: Contactores

Tabla 32.

Ponderación de robustez para las alternativas del módulo 5

Robustez	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 33.

Ponderación de costos para las alternativas del módulo 5

Costos	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 34.

Ponderación de controlabilidad para las alternativas del módulo 5

Controlabilidad	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 35.

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 5.

	Robustez	Costos	Controlabilidad	\sum	Ponderación
Solución A	0,34	0,11	0,11	0,56	2
Solución B	0,17	0,22	0,06	0,45	1

3.6.6 Módulo 6. Transmisión

Tabla 36.

Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 6

	Costos	Torque	Complejidad	$\sum +1$	Ponderación
Costos	-	1	1	3	0,50
Torque	0	-	1	2	0,33
Complejidad	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1

- Solución A: Tornillo sin fin
- Solución B: Acoplamientos
- Solución C: Engranés

Tabla 37.

Ponderación de costos para las alternativas del módulo 6

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 38.

Ponderación de torque para las alternativas del módulo 6

Torque	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	0	1	0,17
Solución C	0	1	-	2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 39.

Ponderación de complejidad para las alternativas del módulo 6

Complejidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 40.

Conclusión en la selección de la alternativa de diseño para el módulo 6

	Costo	Torque	Complejidad	\sum	Ponderación
Solución A	0,09	0,17	0,03	0,29	3
Solución B	0,25	0,06	0,09	0,40	1
Solución C	0,17	0,11	0,06	0,34	2

3.7 DEFINICIÓN DEL DISEÑO

Los componentes seleccionados para la automatización de la máquina fresadora se muestran en la tabla 41.

Tabla 41.

Selección de diseños a usar en cada módulo

Módulo	Definición	Selección
Módulo 1	Movilidad	Motores paso a paso.
Módulo 2	Control	Computador
Módulo 3	Interfaz	cncControl
Módulo 4	Comunicación	Arduino
Módulo 5	Potencia AC	Variador de Frecuencia (VDF)
Módulo 6	Transmisión	Transmisión por engranes rectos.

3.7.1 Módulo 1. Movilidad

En este módulo se escogerá los motores a usar en el diseño, de entre los que encontramos disponibles en el mercado se escogerán los que cumplan con los requerimientos de diseño. Se comenzará por elegir los que entreguen el torque necesario al movimiento de los ejes X , Y y Z para lo que se procede a tomar datos de torque tomando en cuenta qué eje realiza más trabajo en conjunto con probetas y elementos de sujeción.

Con respecto a las fuerzas de corte, se pueden dividir en las que actúan sobre el eje Z y el plano XY . En este último caso las fuerzas de corte en el eje X e Y son las mismas ya que se forman paralelas a los ejes correspondientes con el mismo ángulo de inclinación.

El par de torsión se puede calcular de la siguiente manera:

Datos:

Fresa de Vástago

Material: Acero Aleado

$d = \text{Diámetro de la fresa} = 13,8\text{mm}$

$z = \text{Número de dientes} = 2$

$V_c = \text{Velocidad de corte} = 15 \text{ m/min}$ (Anexo F)

$s' = \text{Avance} = 40 \text{ mm/min}$ (Anexo F)

$a = \text{Profundidad de corte} = 5 \text{ mm}$

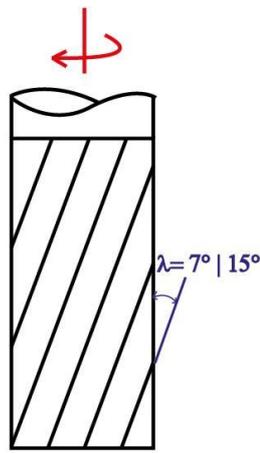


Figura 31. Ángulo de ataque de una fresa de vástago

Cálculo de la velocidad de corte (Ec. 1):

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d} = \frac{1000 \times 15}{\pi \times 13,8} = 345,99 \text{ rpm}$$

Cálculo del avance por diente:

$$S_z = \frac{s'}{N \times z} = \frac{40}{345,99 \times 13,8} = 0,019$$

Cálculo de la sección de la viruta:

$$S_v = a \times S_z = 5 \times 0,019 = 0,096$$

Con K_s de 2000 N/mm^2 para acero aleado tomado del Anexo F:

$$F_c = K_s \times S_v = 2000 \times 0,096 = 192,69 \text{ N}$$

Máxima fuerza en operaciones de Perforado.

$$F_z = 192.69 \times \text{Cos}(7) = 192.25;$$

Máxima fuerza en operaciones de ranurado.

$$F_x = F_y = 192.69 \times \text{Sin}(15) = 49,87 \text{ N}$$

3.7.2 Módulo 2. Control

La alternativa seleccionada para realizar las operaciones de control es el computador, debido a su bajo costo en comparación con un controlador lógico programable y la capacidad de procesamiento superior que ofrece, así como también la versatilidad de software compatible.

Es importante recalcar también que un ordenador resulta ser un sistema más intuitivo y configurable que un PLC, lo que es una característica importante en un ambiente que está destinado al aprendizaje y no a la producción.

Se realizará un sistema de control de lazo abierto, esto se debe a que en el módulo previo se determinó que la opción más viable es el uso de motores a pasos, y estos poseen un sistema de posicionamiento a través de un número determinado de pulsos, por lo que el sistema no requiere retroalimentación.

3.7.3 Módulo 3. Interfaz

La mejor alternativa de diseño para el interfaz de control es el software CncControl, las características que ofrece este programa son evidentemente superiores a las de sus alternativas, siendo las más importantes la compatibilidad que ofrece para cualquier sistema operativo que soporten java y el uso intuitivo de su interfaz gráfica en un entorno orientado a la educación.

CncControl trabaja con controladores a través de comunicación serial, lo que representa una ventaja considerable si se va a utilizar ordenadores o controladores actualizados, ya que la comunicación por puerto paralelo es poco común actualmente.

3.7.4 Módulo 4. Comunicación

Los criterios más relevantes para la selección de la mejor alternativa para este módulo son el tipo de comunicación serial o paralela y el número de entradas y salidas disponibles, así como también el tipo de entradas analógicas o digitales.

La placa de hardware libre Arduino reúne las mejores características para solventar los requerimientos de este módulo, cumpliendo tanto los parámetros de comunicación serial, el número de entradas, el tipo de entradas y salidas (digitales, analógicas) requeridas para la aplicación.

3.7.5 Módulo 5. Potencia Ac

El módulo de potencia Ac está orientado al control de la velocidad del motor Ac responsable del movimiento del husillo.

Este tipo de control se lo realiza variando la frecuencia de entrada de la corriente alterna que alimenta el motor para obtener velocidades proporcionales a la frecuencia.

Se seleccionó la opción de un VFD (variador de frecuencia) que es un dispositivo diseñado para el este fin, que posee las características de robustez y controlabilidad necesarias para la aplicación.

El variador de frecuencia Altivar 28 reúne las características necesarias para controlar el motor disponible, siendo estas:

Tabla 42.

Características del motor a controlar

	Motor	Variador VDF
Potencia (HP)	2	2,5
Frecuencia (Hz)	60	50-120
Voltaje I (V)	220	220
Voltaje O (V)		220

3.7.5.1 Conversor digital análogo

Para controlar la velocidad del husillo por medio del variador es necesario disponer de una señal análoga que varíe entre 0 y 10v. La señal de control que entrega el computador a los controladores por medio de Arduino es PWM (Modulación de ancho de pulso), esta señal se genera a una frecuencia de 16 [Hz] pero no puede ser leída por el variador ya que es digital. Por esta razón se procede a diseñar un conversor que trabaja mediante un filtro pasa-bajo como muestra la figura 32.

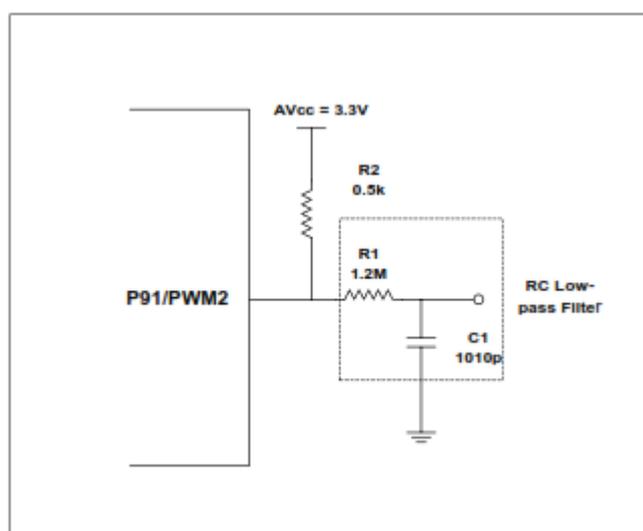


Figura 32. Filtro pasa-bajo pasivo

A través de la siguiente ecuación se procede a calcular el capacitor necesario para filtrar la señal PWM y generar una señal analógica.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{donde con una resistencia de } 10k \text{ y } 16\text{Hz} \text{ tenemos:}$$

$$C = \frac{1}{2\pi Rf} \cong 1\mu F$$

Como la señal no trabaja en vacío es necesario acoplar impedancias a una carga por medio de un amplificador operacional, esto se conoce como filtro activo y su diseño se puede observar en la figura 33.

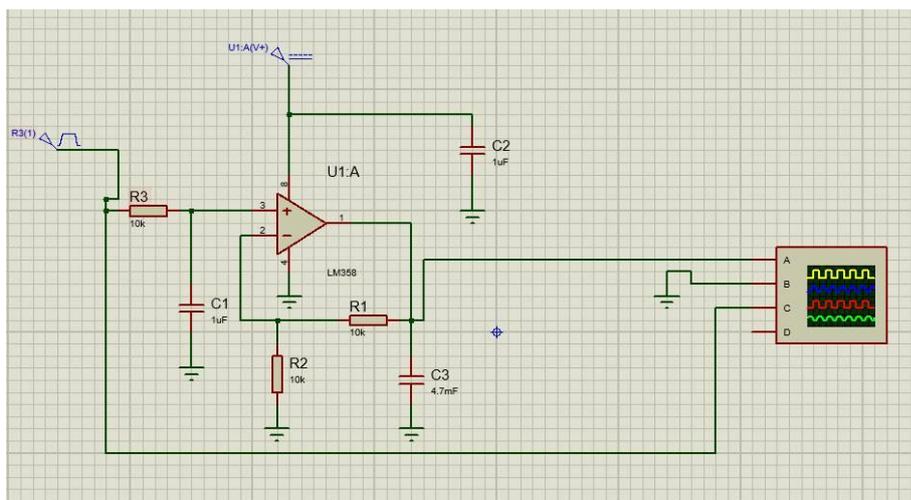


Figura 33. Filtro pasa-bajo activo

3.7.6 Módulo 6. Transmisión de potencia

Se selecciona un acoplamiento directo del eje del motor al eje de la máquina por las ventajas de baja pérdida de potencia.

Sin embargo, para el eje z, que es el motor con la mayor carga en el sistema, es necesario diseñar un sistema de reducción debido a que este motor está trabajando a su máxima capacidad y no se ha considerado un factor de seguridad.

3.7.6.1 Transmisión de potencia para los ejes X, Y

Se realizaron mediciones para determinar el torque reflejado en el eje Y sin carga en el banco. Posteriormente se realizó el cálculo para obtener las fuerzas de corte presentes en este eje.

Momento en el eje Y sin carga: $T_y = 3 Nm$

Fuerza de corte en Y: $F_y = 49.8N$

Con esta fuerza calculada previamente se obtiene el momento con la siguiente fórmula. (OrientalMotors, 2016).

$$T_r = F_z * \left[\frac{h}{2 * \pi * n} + r_b * \mu_D \right] * \frac{1}{i} \text{ Nmm} \quad (13)$$

Donde:

F : Fuerza total.

h : paso del tornillo de potencia.

r_B : radio del tornillo de potencia.

U_B : coeficiente de fricción del tornillo de potencia.

i : relación de transmisión.

Variable	Valor	Característica
U_b	0,15	coeficiente de fricción entre tornillo acero/bronce.

Fuente: (OrientalMotors, 2016)

$$T_r = 49.8 * \left[\frac{3}{2 * \pi * 0,3} + (15,8) * (0,15) \right] * \frac{5}{2} \text{ Nmm}$$

$$T_r = 493,21 \text{ Nmm} = 0,5 \text{ Nm}$$

Con el valor del torque producido efecto de las fuerzas cortantes que actúan sobre el banco más el par torsor necesario para mover el banco se obtiene el torque máximo.

Torque máximo: $\tau = 3 \text{ Nm} + 0,5 \text{ Nm}$

Velocidad angular máxima: $\omega = 80 \text{ rpm} = 8,37 \text{ rad/s}$

Potencia máxima:

$$P = \tau * \omega = 3.5 \text{ Nm} * 8,37 \text{ rad/s} = 29.3 \text{ wat} = 0.04 \text{ HP}$$

P representa la potencia máxima requerida en el eje x y el eje y, por lo que se seleccionó el sistema de transmisión de potencia de acople directo. (Anexo A).

3.7.6.2 Transmisión de potencia para el eje z

El criterio número dos del sistema de selección hace referencia a la transmisión de potencia por engranes como segunda opción. Por lo que se optó en diseñar un sistema de reducción de velocidad para el eje z, y acoplamiento directos para el eje x e y.

Para el diseño del sistema reductor de engranes se tiene como parámetros iniciales el par máximo requerido, la velocidad angular de la corona y la relación de transmisión 3:1

El par máximo requerido es debido al peso del banco sin carga y las fuerzas de corte reflejadas al eje como par torsor.

Momento en el eje Z sin carga: $T_z = 11 Nm$

Fuerza de corte en Z: $F_z = 192.25 N$

Con esta fuerza calculada previamente calculamos el momento con la ecuación 13.

$$T_r = F_z * \left[\frac{h}{2 * \pi * n} + r_b * \mu_D \right] * \frac{1}{i} Nmm$$

Donde:

F : Fuerza total.

h : paso del tornillo de potencia.

r_B : radio del tornillo de potencia.

U_B : coeficiente de fricción del tornillo de potencia.

i : relación de transmisión.

Variable	Valor	Característica
U_b	0,15	coeficiente de fricción entre tornillo acero/bronce.

(OrientalMotors, 2016)

$$T_r = 192.25 * \left[\frac{3}{2 * \pi * 0,3} + (15,8) * (0,15) \right] * \frac{5}{2} Nmm$$

$$T_r = 1049.4 Nmm = 1,05 Nm$$

Con el valor del torque producido efecto de las fuerzas cortantes que actúan sobre el banco, más el par torzor necesario para mover el banco se obtiene el torque máximo.

Torque máximo: $\tau = 11 Nm + 1,05 Nm$

Velocidad angular máxima: $\omega = 80 rpm = 8,37 rad/s$

Potencia máxima:

$$P = \tau * \omega = 12,05 Nm * 8,37 rad/s = 107,39 wat = 0,144HP$$

Se adoptó un ángulo de hélice de $\psi = 20^\circ$, ya que dentro de los ángulos recomendados posee buenas características de transmisión y un ángulo de presión de $\alpha = 20^\circ$.

De acuerdo con estos parámetros se selecciona un número de dientes para el piñón igual a 15. (Anexo B), a fin de evitar la interferencia. Como la relación de transmisión es de 3:1 la corona deberá tener un total de 45 dientes.

Se procede a calcular para el piñón, el numero virtual o equivalente de dientes Z_V , que es el número de dientes rectos del engrane en el plano normal.

$$Z_V = \frac{Z}{(\cos\psi)^3} = \frac{15}{0,83} = 18,07 \cong 18 \text{ dientes}$$

Con este dato y el ángulo de presión se obtiene el factor de forma $\gamma = 0,098$ (Anexo C).

Se eligió el acero SAE 4340 (Anexo D).

Tensión admisible: $\sigma_{adm} = 65000 \frac{lib}{plg^2} = 4571,01 \frac{kg}{cm^2}$

Dureza Brinel: $HB = 475$

Con estos datos se procede a calcular el paso normal que requiere el engrane a través de la ecuación de Lewis. (Mariano Boldrini, 2015).

$$Pn = 76.6 * \sqrt[3]{\frac{N * \cos(\psi)}{\rho * \gamma * \sigma_{adm} * n * Z}} \quad (14)$$

Donde:

N : Potencia del motor.

ρ : Adopta un valor de 2. (Diseño conservador).

γ : Factor de forma.

n : Número de vueltas por minuto del piñón.

Z : Número de dientes del piñón.

$$P_n = 76.6 * \sqrt[3]{\frac{0.145 * \cos(20)}{2 * 0,098 * 4571 * 80 * 15}} = 0,3869 \text{ cm} = 3,87 \text{ mm}$$

El valor de ρ adoptado es un valor bajo, sugerido para obtener un módulo estándar dentro de 1-2 mm. (Mariano Boldrini, 2015).

Se calcula el módulo de la máquina:

$$M_n = \frac{P_n}{\pi} = \frac{3,87 \text{ mm}}{3,14} = 1,23 \text{ mm}$$

El módulo estándar más aproximado es de 1,25; sin embargo, por cuestiones de diferencia de costos e incremento de robustez se selecciona el módulo normalizado de 1,5 [mm].

$$M_n = 1,5 \text{ mm}$$

Con el módulo seleccionado se calcula nuevamente el paso normal.

$$P_n = M_n * \pi = 1,5 * 3.14 = 4,7 \text{ mm}$$

Cálculo del paso circunferencial o tangencial p_t :

Es el paso de la rueda medido sobre la circunferencia primitiva de una sección normal, es decir el paso de la rueda frontal equivalente.

$$p_t = \frac{P_n}{\cos(\psi)} = \frac{4,7}{\cos(20)} = 5 \text{ mm} \quad (15)$$

Cálculo del paso axial p_a :

Es la distancia entre los puntos correspondientes obre dientes adyacentes medida en dirección axial.

$$p_a = \frac{P_t}{\tan(\psi)} = \frac{5}{\tan(20)} = 13,73 \text{ mm} \quad (16)$$

Cálculo del módulo de la circunferencia M_c :

$$M_c = \frac{P_t}{\pi} = \frac{5}{3.14} = 1,6 \text{ mm} \quad (17)$$

Por ende se obtiene el diámetro primitivo D_p :

$$D_p = M_c * Z = 1,6 * 15 = 24 \text{ mm} \quad (17)$$

Cálculo del ancho de la cara b:

$$b = p_t * \rho = 5 * 2 = 10 \text{ mm} \quad (18)$$

Por cuestión del acoplamiento al eje se toma un ancho de cara $b = 15 \text{ mm}$.

3.8 IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se muestra las diferentes etapas del proceso de implementación del sistema mecánico, eléctrico y electrónico.

3.8.1 Implementación sistema mecánico

Para el diseño del sistema mecánico se realizó primeramente los cálculos y los planos de los elementos transmisores de potencia.

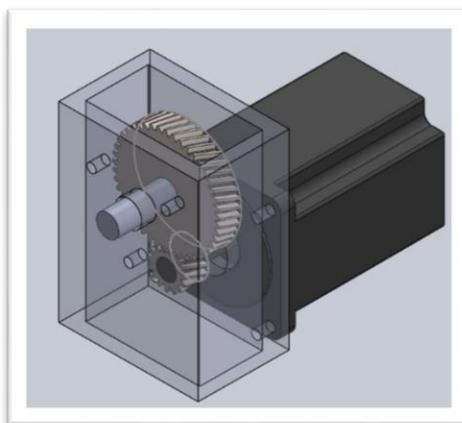


Figura 34. Sistema de reducción Eje Z.

Posteriormente se procede a maquinar los elementos necesarios para la estructura del sistema reductor correspondiente al eje Z.



Figura 35. Proceso de manufactura del sistema de reducción.

Tanto para el eje Y como para el eje X el sistema de transmisión de potencia es directo, por lo que su implementación implica un proceso diferente.

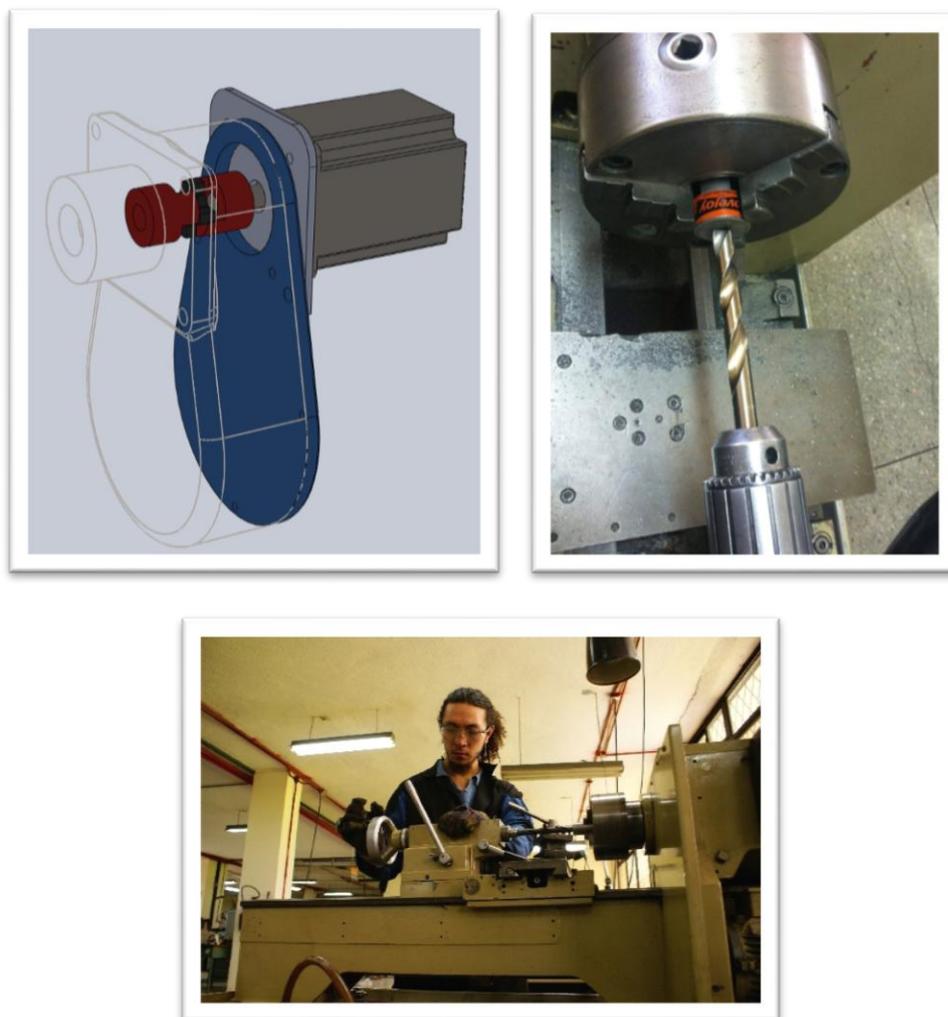


Figura 36. Proceso de manufactura de acoplamientos directos.

3.8.2 Implementación sistema eléctrico

Para el sistema eléctrico se realizaron pruebas y se reemplazaron los componentes defectuosos, así como también la incorporación de un sistema variador de frecuencia y un sistema de fusibles.



Figura 37. Implementación de sistemas eléctricos.

3.8.3 Implementación de sistemas electrónicos

Una vez probado el funcionamiento del sistema mecánico y eléctrico se realizó el montaje de los sistemas electrónicos, estos constan de un sistema de control manual y uno controlado por un ordenador.



Figura 38. Implementación de sistemas electrónicos.

3.8.4 Mantenimiento

Se realizó mantenimiento en la etapa inicial y al final durante el desarrollo de este proyecto, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema en modo manual y en modo CNC.



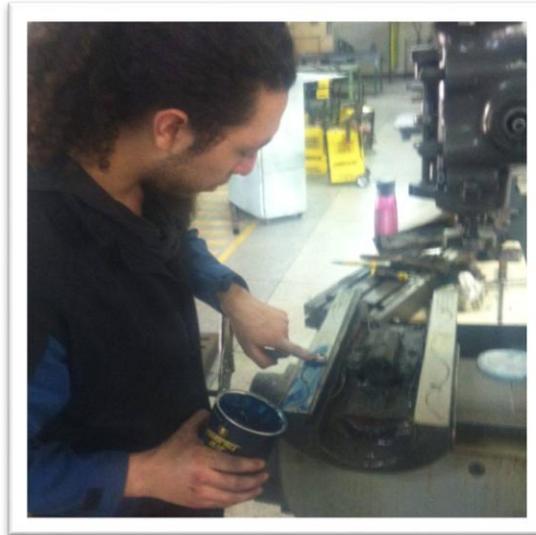


Figura 39. Mantenimiento general.

3.9 RESUMEN

- El estudio inicial del estado de la máquina es fundamental para el desarrollo del plan de diseño e implementación de los diferentes sistemas, ya que revela los componentes funcionales y los no funcionales de todo el conjunto. A través del levantamiento de la información preliminar se decide la estrategia y se definen las necesidades.
- Las necesidades del diseño pretenden establecer un punto de equilibrio entre los requerimientos que se espera de la máquina y las limitaciones tecnológicas, de diseño, etc. Para ello fue necesario realizar una investigación sobre trabajos previos relacionados al mismo tema efectuados en el mismo laboratorio, se determinaron las exigencias de la máquina y se plantearon los requerimientos de la misma a manera de necesidades de los estudiantes.
- Una vez definidas las necesidades se procede a establecer métricas o características para delimitar el proceso de automatización de la máquina. Para ello se tomaron factores como máxima velocidad del husillo, máxima velocidad de avance, torque máximo, potencia máxima, etc.
- Para establecer un diseño se crearon módulos que permitan satisfacer una necesidad específica. Estos módulos son: 1) Movilidad, 2) Control, 3) Interfaz, 4) Comunicación, 5) Potencia AC, 6) Transmisión de potencia.

- Se efectúa un análisis comparativo que permite descartar las soluciones menos óptimas para la automatización de la fresadora Bridgeport.
- Por último, se seleccionan las alternativas de diseño requeridas para cada módulo y se realizan los cálculos necesarios para su construcción e implementación.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del desempeño de la fresadora Bridgeport posteriores al proceso de automatización, a través de la medición de errores en operaciones de ranurado y taladrado para cada eje de la máquina.

Para reducir el tiempo de mecanizado se utilizó una probeta de mdf, y se realizaron ranuras en dirección de cada eje con la finalidad de detectar tolerancias y errores.



Figura 40. Probetas para realizar control estadístico de procesos.

4.1 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE X

Para realizar el control estadístico de procesos se realizó una serie de ranuras paralelas al eje x de la máquina, a través de las cuales se obtiene datos de longitud y velocidad de avance para el cálculo de errores.

Tabla 43.

Distancias en probetas para el eje X en mm.

Núm.	M1	M2	M3	M4	Prom.	Rango
1	40,04	39,86	40,03	39,83	39,94	0,21
2	40,08	39,91	40	39,9	39,97	0,18
3	39,99	39,88	39,94	40,07	39,97	0,19
4	40	40,04	39,85	40,02	39,97	0,19
5	39,83	40	40,01	39,99	39,95	0,18
6	40,02	40,01	40,05	39,99	40,01	0,06

Núm.	M1	M2	M3	M4	Prom.	Rango
7	39,87	39,99	40,08	40	39,98	0,21
8	40,05	39,96	39,99	40,02	40,00	0,09
9	40	40,03	40	40,01	40,01	0,03
10	39,8	40,03	40	39,85	39,92	0,23
11	40,08	39,8	40,03	39,92	39,95	0,28
12	40,02	39,95	40	39,89	39,96	0,13
13	40,01	40	40,03	40	40,01	0,03
14	39,97	40,06	40,01	40,03	40,01	0,09
15	39,99	40	39,99	40	39,995	0,01
Promedio Final					39,98	0,14

Se utilizan las tablas que se encuentran en el Anexo E para determinar los valores de A2, D3, D4, para obtener los acotamientos de las gráficas de X y R.

Constante	Valor
d2	2,059
a2	0,729
n	4
d3	0
d4	2,282

A través de las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 se realiza el cálculo de los límites de control para las gráficas X y R.

Lim.	Valor
Gprom	0,06
UCLx	40,08
LCLx	39,87
UCLr	0,32
LCLr	0

La representación gráfica de los valores promedio medidos se expresan dentro de los límites inferiores y superiores.

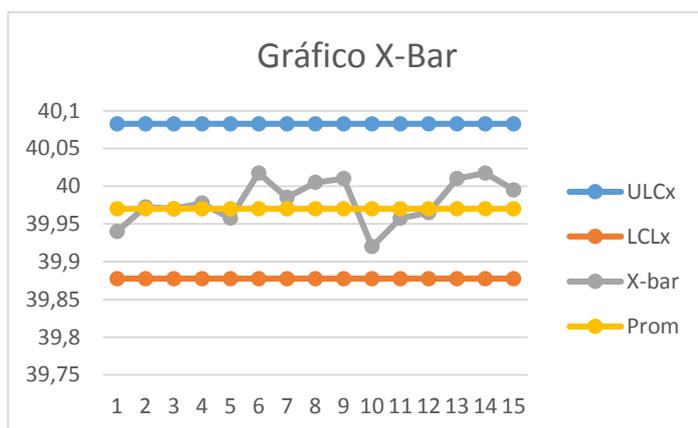


Figura 41. Representación gráfica de valores promedio para el eje x.

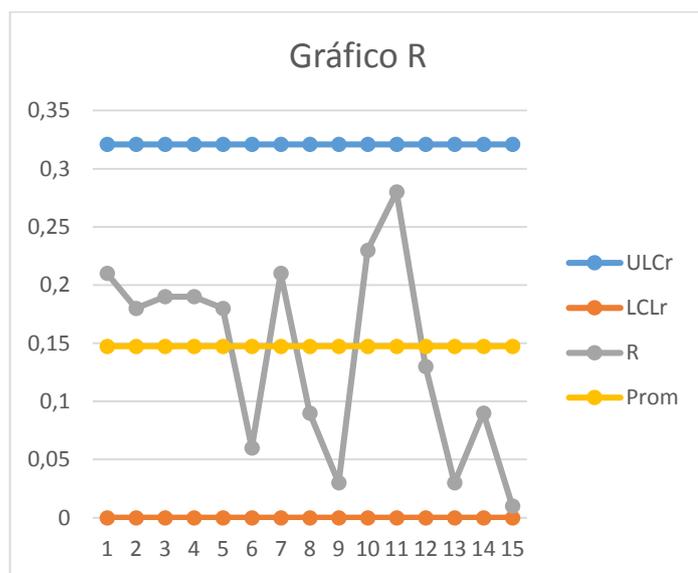


Figura 42. Representación gráfica del rango para el eje x.

Como muestran las figuras 38 y 39 los valores de control se encuentran dentro de los límites establecidos, es decir que el proceso realizado en el eje X cumple con los valores de tolerancia especificados.

4.2 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE Y

De igual forma que en el eje X, para el eje Y se realizan probetas y mediciones para determinar errores.

La probeta diseñada para el eje Y consta de varios desplazamientos lineales en dirección paralela al mismo y se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 44.

Distancias en probetas para el eje Y en mm.

Num.	M1	M2	M3	M4	Prom.	Rango
1	39,9	40,03	40	39,99	39,98	0,13
2	40,03	40,05	39,96	39,98	40,00	0,09
3	40	39,91	39,96	40	39,96	0,09
4	40,05	39,89	39,98	39,98	39,97	0,16
5	39,89	39,94	39,89	39,9	39,90	0,05
6	39,8	39,98	39,93	40,02	39,93	0,22
7	39,99	40	39,93	40,01	39,98	0,08
8	39,97	40,06	39,99	40,06	40,02	0,09
9	40,04	40,03	40,01	40,04	40,03	0,03
10	40,03	40,04	39,93	39,99	39,99	0,11
11	39,89	39,9	40,04	39,89	39,93	0,15
12	39,94	39,97	40,03	39,99	39,98	0,09
13	39,89	39,96	40	40	39,96	0,11
14	40	39,99	39,98	39,97	39,98	0,03
15	40,01	39,99	39,95	39,97	39,98	0,06
Promedio Final					39,97	0,09

Para el eje Y se utilizó el mismo número de probetas, por lo que los valores tomados para el cálculo de los límites son los mismos que se encuentran en el Anexo E.

Realizando el mismo procedimiento que en el eje X, se obtienen los valores correspondientes a los límites permisibles.

Lim.	Valor
Gprom	0,04
UCLx	40,04
LCLx	39,90
UCLr	0,22
LCLr	0

Las gráficas correspondientes a X y R de los valores tomados para el eje Y se presentan en las figuras 40 y 41 respectivamente.

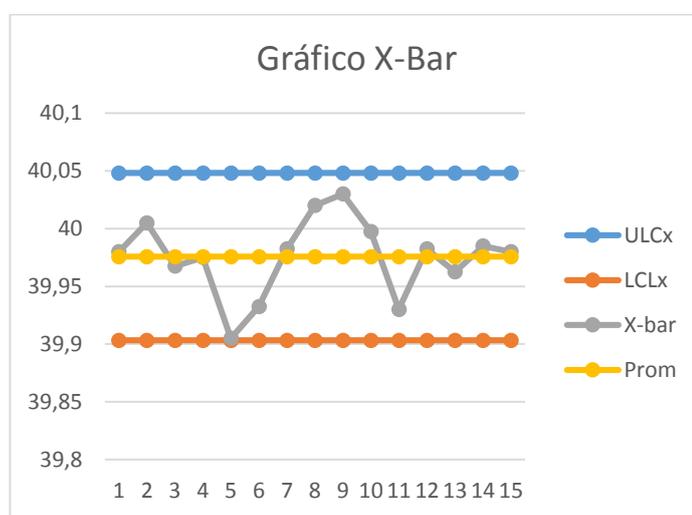


Figura 43. Representación gráfica de valores promedio para el eje y.

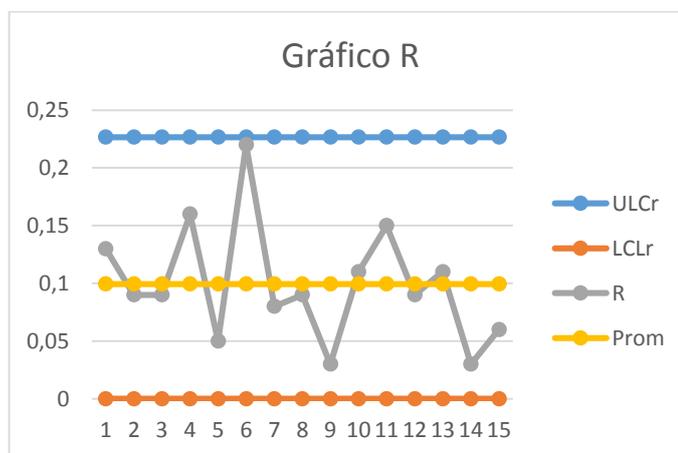


Figura 44. Representación gráfica del rango para el eje y.

Como se muestra en las gráficas, tanto los valores de mediciones promedio como en los valores de rango se encuentran dentro de los límites permisibles de tolerancia, por lo que el eje y también cumple los parámetros de especificaciones.

4.3 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL EJE Z

Para el eje Z se utilizó la profundidad del ranurado de las probetas correspondientes al eje X. Para ello se utilizó el mismo sistema de medición que para las dos tomas de datos anteriores y el mismo operario para eliminar errores de apreciación en los datos.

Las ranuras presentes en estas probetas son de una profundidad conocida, por lo que se realizan en ellas las mediciones para detectar los errores en el eje Z.

Tabla 45.

Profundidad en probetas para el eje z en mm.

Num.	M1	M2	M3	M4	Prom.	Rango
1	3,01	3,02	2,84	3,00	2,96	0,18
2	2,99	3,07	2,83	2,91	2,95	0,24
3	2,92	2,91	3,06	3,03	2,98	0,15
4	3,03	2,92	2,95	2,83	2,93	0,2
5	2,84	2,99	3,05	3,00	2,97	0,21
6	2,83	3,00	3,01	2,92	2,94	0,18
7	3,07	2,91	2,95	2,98	2,97	0,16
8	2,95	2,87	3,05	3,05	2,98	0,18
9	3,00	2,93	2,91	2,92	2,94	0,09
10	2,93	3,00	2,92	3,00	2,96	0,08
11	2,98	3,09	3,06	3,05	3,04	0,11
12	3,02	3,02	2,83	3,09	2,99	0,26
13	3,00	2,88	3,07	2,93	2,97	0,19
14	2,92	2,92	3,00	2,91	2,93	0,09
15	3,00	3,03	2,98	2,92	2,98	0,11
Promedio Final					2,96	0,16

Con los mismos valores del Anexo E para n=4 se obtiene:

Lim.	Valor
Gprom	0,07
UCLx	3,08
LCLx	2,85
UCLr	0,36
LCLr	0

Por último, se representan los valores de X y R para el eje Z gráficamente, para verificar que los valores se encuentren dentro de los límites permisibles.

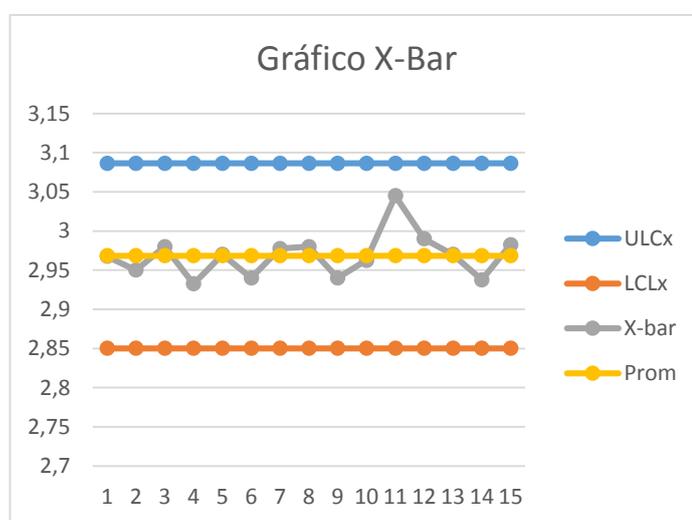


Figura 45. Representación gráfica de valores promedio para el eje z.

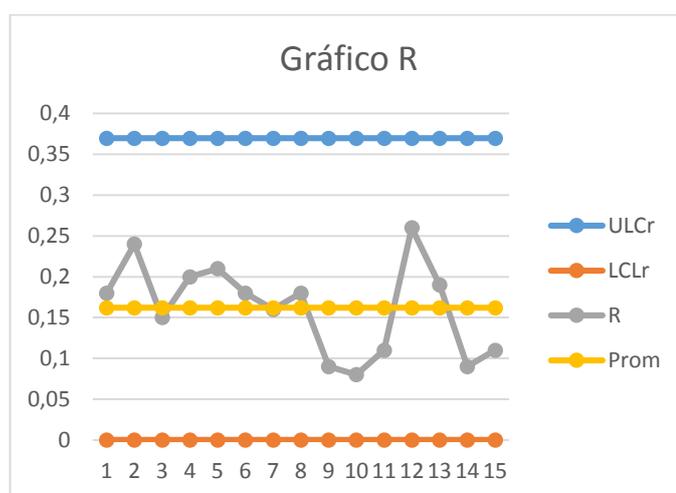


Figura 46. Representación gráfica del rango para el eje z.

Tanto los valores de las mediciones promedio, como los valores de rango se encuentran dentro de los acotamientos de control.

4.4 Pruebas de funcionamiento de la máquina

Las pruebas de funcionamiento que se realizó a la máquina fresadora Bridgeport, abarca los movimientos y velocidades que la ejecuta cuando se envían comandos desde el programa, con tolerancia permitida del 1%.

Se utilizó el tiempo ocupado en los desplazamientos lineales que la máquina realizaba como operaciones de desbaste.

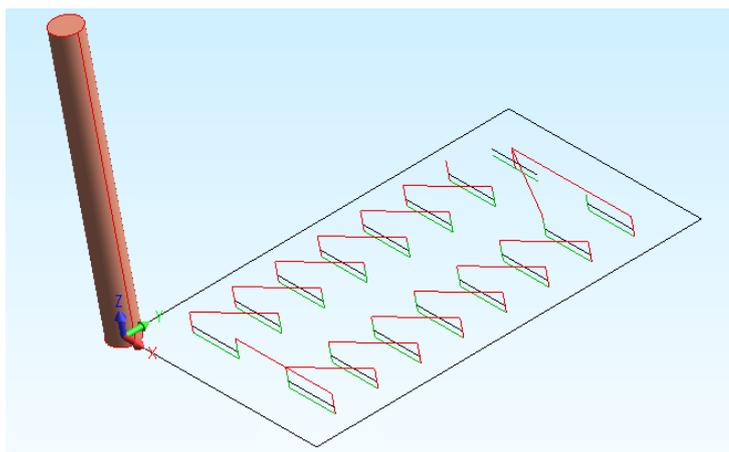


Figura 47. Trayectorias para probeta de prueba

4.4.1 Pruebas funcionales de la máquina en el eje X

Para esta prueba se adjuntó los datos de tiempos tomados durante las pruebas dimensionales. Y a partir de estas se calculan las velocidades reales de la máquina como se muestra en la tabla 46.

Tabla 46.

Prueba de velocidad eje X

Velocidad nominal (mm/min)	Tol (mm/min)	Dist. (mm)	T (seg)	Vel. Real (mm/min)	\bar{x} (mm/min)	Error	Resultado
40	0.4	40,04	58,8	40,86	40,35	0,35	OK
		40,08	60,2	39,95			
		39,99	59,5	40,33			
		40	59,6	40,27			
50	0.5	39,86	47,80	50,03	49,73	0,27	OK
		39,91	49,10	48,77			
		39,88	47,70	50,16			
		40,04	48,10	49,95			
60	0.6	40,03	39,30	61,11	59,81	0,19	OK
		40	40,10	59,85			
		39,94	39,70	60,36			
		39,85	41,30	57,89			

4.4.2 Pruebas funcionales de la máquina en el eje Y

Para esta prueba se adjuntó los datos de tiempos tomados durante las pruebas dimensionales. Y a partir de estas se calculan las velocidades reales de la máquina como se muestra en la tabla 47.

Tabla 47.

Prueba de velocidad eje Y

Velocidad nominal (mm/min)	Tol (mm/min)	Dist. (mm)	T (seg)	Vel. Real (mm/min)	\bar{x} (mm/min)	Error	Resultado
40	0.4	39,90	60,30	39,70	40,23	0,23	OK
		40,03	59,20	40,57			
		40,00	58,90	40,75			
		40,05	60,20	39,92			
50	0.5	40,03	48,80	49,22	49,71	0,29	OK
		40,05	47,90	50,17			
		39,91	48,10	49,78			
		39,89	48,20	49,66			
60	0.6	40,00	38,90	61,70	60,13	0,13	OK
		39,96	40,90	58,62			
		39,96	39,70	60,39			
		39,98	40,10	59,82			

4.4.3 Pruebas funcionales de la máquina en el eje Z

Para esta prueba se realiza una probeta con perforaciones de 1 cm y velocidad de avance de 20 mm/min para poder medir el tiempo. A partir de estos datos se verifican las velocidades reales de la máquina como se muestra en la tabla 48.

Tabla 48.

Prueba de velocidad eje Z

Velocidad nominal (mm/min)	Tol (mm/min)	Dist. (mm)	T (seg)	Vel. Real (mm/min)	\bar{x} (mm/min)	Error	Resultado
20	0.2	10,22	29,80	20,58	20,09	0,09	OK
		10,12	30,20	20,11			
		9,98	30,10	19,89			
		9,87	29,20	20,28			
		10,10	28,90	20,97			
		10,13	29,70	20,46			
		9,08	30,00	18,16			
		10,05	29,80	20,23			

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se describirán las conclusiones que se han obtenido durante el proceso de automatización de la fresadora Bridgeport, así como recomendaciones para el correcto funcionamiento de la máquina.

5.1 CONCLUSIONES

- A través del proceso de medición y cálculo de errores se determinó que el proceso cumple con las especificaciones requeridas para realizar cualquier proceso de fresado convencional.
- A pesar de que trabajar en una fresadora CNC representa un ahorro de tiempo y dinero, existen operaciones de fresado como planeados y taladrados simples, que por su bajo nivel de complejidad no es eficiente desarrollarlos por medio de las herramientas de software CAD/CAM o en código G, sino de forma manual.
- Como se puede observar en el capítulo 4, en las representaciones gráficas de media y rango de la función del error, los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites de control por lo que se puede afirmar que el sistema de automatización implementado se encuentra controlado.
- El uso de herramientas de software y hardware libre para el control de las máquinas CNC representa una ventaja importante, no solo porque no se infringe derechos de autor ni licencias al no comprar dichas herramientas, sino también porque al estar dentro de un entorno educativo es susceptible de ser adaptado y modificado para las exigencias del medio.
- Se optimizó costos de implementación y desarrollo, ya que en la actualidad tenemos a nuestra disposición diferentes dispositivos y herramientas que facilitan la modernización de máquinas. Además, en el ámbito de software cada

vez crecen comunidades de programadores e ingenieros que aportan al desarrollo de sistemas y paquetes informáticos; los cuales se adaptan cada vez mejor al control de maquinaria industrial.

- Se elaboró un manual de usuario que permita al estudiante manipular la máquina fresadora correctamente. Incluyendo ejercicios simples de maquinado en los cuales el estudiante aplicará los conocimientos adquiridos en materias de procesos de manufactura, así como introducirlo al manejo de máquinas CNC por medio de código G.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir las normas de seguridad establecidas en el laboratorio de procesos de manufactura, tanto para el operario como para la máquina, para garantizar la seguridad de la persona y el correcto funcionamiento de la máquina.
- Dejar limpio el espacio de trabajo luego de utilizar la máquina para evitar atascamientos de la viruta en las articulaciones móviles de la máquina.
- Lubricar y limpiar la máquina periódicamente para garantizar el correcto funcionamiento de las articulaciones móviles de la fresadora.
- Revisar y simular los resultados obtenidos por un software CAM antes de ejecutarlos en la máquina, para determinar posibles errores debidos a los límites del espacio de trabajo, las velocidades de maquinado para el material, el tipo de herramienta que se va a utilizar, etc.
- Implementar un cambio automático de herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

- 2221, N. I. (s.f.). *Norma Ansi diseño PCB*.
- Adiran Garcia. (5 de 1 de 2014). *Diy Makers*. Obtenido de Motores paso a paso: <http://diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino/>
- Ashby, M. F. (2009). *Materials Selection in Mechanical Design*. London, UK.
- Canela, M. A. (2009). *Gestion de la Calidad*. Ediciones UPC.
- Cruz, A. B. (2007). *Fundamentos de Robótica*. España: McGraw-Hill.
- Diseño y Desarrollo de Prototipos*. (27 de Abril de 2009). Obtenido de <http://dideprototipos.blogspot.com/>
- DMYH . (2014). *De Máquinas y Herramientas*. Obtenido de De Máquinas y Herramientas: <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado>
- Escalona, I. I. (2015). *Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA)*. Obtenido de www.upiicsa.ipn.mx
- Espinosa, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. OpenbookProjects.
- EyMF. (2015). *Engranés y maquinados FORES*. Obtenido de <http://engranesymaquinadosflores.com/>
- GoodFellow. (1946). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>
- Helfer. (2015). *Interempresas*. Obtenido de Heller: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Fresadora-CNC-Helfer-F4-CNC-49510.html>
- Holguer Guanoluisa, H. S. (2013). *Diseño y construcción de una máquina fresadora cnc de 3 grados de libertad*. Quito.
- IMH, A. G. (2015). *Instituto de Máquinas herramientas*. Obtenido de <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/referencemanual-all-pages>
- Irvin Systems. (11 de Abril de 2016). *Irvin Systems*. Obtenido de <http://www.irvinsystems.com/>
- Jantzen, J. (2013). *Tuning Of Fuzzy PID Controllers*.
- JNMV . (2015). *Normas de seguridad para fresado*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/jnmv2107f9>
- Krajewski, L. J. & Ritzman, L. P. (2000). *Administración*. Pearson educación.

- Lovejoy INC. (2014). *Lovejoy INC*. Obtenido de <http://www.lovejoy-inc.com/>
- M., S. K. (1998). Control Mediante Logica Difusa. *Tecnicas Modernas en Automatica*, 7.
- Mariano Boldrini. (2015). *Cálculo de elementos de Máquinas*. Buenos Aires.
- METAL Actual. (2005). *Condiciones Tecnicas para un Correcto Doblado*. Obtenido de <http://www.metalactual.com/revista/15/doblado.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS. (13 de Mayo de 2016). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/usb/esa/>
- OrientalMotors. (2016). Technical Reference G. *Technical Reference G.*, 35.
- Pérez, F. E. (2007). *Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC*. Barcelona: Marcombo.
- Routio, P. (3 de Agosto de 2007). *Evaluación en desarrollo de productos*. Obtenido de <http://www2.uiah.fi/projekti/metodi/23c.htm>
- Rubbermold. (2013). *Rubbermold S. L*. Obtenido de Rubbermold: <http://www.rubbermold.es/>
- SAAZOR WÄLZTECHNIK. (2014). *SAAZOR*. Obtenido de SAAZOR: <http://saazor.de/en/hobs/heavy-duty-skiving-hobs/>
- Saldarriaga, J. D. (2 de 03 de 2016). *Máquinas eléctricas*. Obtenido de Motores eléctricos: <http://moelec.blogspot.com/>
- Schneider-Electric. (21 de Abril de 2016). *Schneider-Electric Life is On*. Obtenido de <http://www.schneider-electric.com/>
- SECO TOOLS. (2015). *REVISTA TOPE*. Obtenido de http://www.revistatope.com/186_art_SECO_TOOLS_Fresadoras.html
- SHIGLEY J., M. L. (2002). *Manual de Diseño Mecánico. Traducido del inglés por Francisco Paniagua*. 3era Ed., McGraw-Hill.
- SHIGLEY, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica*. Monterrey: McGraw Hill.
- SIEMENS. (13 de Marzo de 2016). *SIEMENS ESPAÑA*. Obtenido de <http://w5.siemens.com>
- SJR Machinery. (s.f.). *MAC Macchinery*. Obtenido de MAC SJR: <http://machinerychina.es/>
- Smart Motor Devices. (20 de Abril de 2016). *Smart Motor Devices - stepper motor drivers and controllers*. Obtenido de <http://stepmotor.biz/>
- Steve, K. F. (2009). *Tecnología de las máquinas herramienta*. Marcombo, S.A.: Barcelona.
- Swedex. (27 de Abril de 2016). *SWEDEX*. Obtenido de <http://swedexny.camero.se/eng/Products/Technical-information/Feed-motion/>

- Terratec, G. (2014). *Terratec SAC*. Obtenido de <http://www.compostperu.com/images/fresado.jpg>
- Toledo, William E. Díaz Moreno y Nelson F. Velasco. (s.f.). *METODOLOGÍA PARA SELECCIONAR MATERIALES EN INGENIERÍA MECATRÓNICA* . Obtenido de http://www.umng.edu.co/documents/10162/1299317/ART_16.pdf
- Triturados Barcelona. (2001). *Fibras de Vidrio TribarVID*. Obtenido de http://www.concretonline.com/pdf/06aditivos/art_tec/Ficha-Descripci-n-y-Uso-fibra-de-vidrio.pdf
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Madrid: Pearson Educación.