



**Rehabilitación y modernización del taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio
de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE**

García Castro, Freddy Gabriel

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Cortez Pazmiño, Byron Hernán

9 de septiembre del 2019



Document Information

Analyzed document	Trabajo de Titulación URKUND.pdf (D55458113)
Submitted	9/10/2019 10:54:00 PM
Submitted by	Cortez Pazmiño Byron Hernan
Submitter email	bhcortez@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	bhcortez.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis.pdf	 10
	Document Tesis.pdf (D20976709)	
	Submitted by: cfterneus@espe.edu.ec Receiver: cfterneus.espe@analysis.arkund.com	
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_completapdf.pdf	 1
	Document TESIS_completapdf.pdf (D46888145)	
	Submitted by: bhcortez@espe.edu.ec Receiver: bhcortez.espe@analysis.arkund.com	



Firmado electrónicamente por:
BYRON HERNAN
CORTEZ PAZMINO



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECÁTRONICA

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **Rehabilitación y modernización del taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE**, fue realizado por el señor **García Castro, Freddy Gabriel**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 9 de septiembre del 2019



Firmado digitalmente por:
**BYRON HERNAN
CORTEZ PAZMIÑO**

.....
Ing. Byron Hernán Cortez Pazmiño

DIRECTOR

CC: 171447108-1



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

Responsabilidad de autoría

Yo, **García Castro, Freddy Gabriel**, con cédula de ciudadanía n° 130729755-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Rehabilitación y modernización del taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 9 de septiembre de 2019

García Castro Freddy Gabriel

CC: 130729755-4



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

Autorización de publicación

Yo, **García Castro, Freddy Gabriel**, con cédula de ciudadanía n° 130729755-4, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Rehabilitación y modernización del taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 9 de septiembre de 2019

García Castro Freddy Gabriel

CC: 130729755-4

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y amigos cercanos, que a lo largo de todas las etapas en mi vida siempre me han brindado su apoyo y siempre han estado presentes para animarme.

Con mucho cariño a mis padres Margarita y Freddy quienes han sido un ejemplo a seguir y mi sustento, quienes nunca me dieron la espalda y siempre me motivaron a continuar hasta alcanzar cualquier meta que me haya trazado.

A mis hermanos, con quienes comparto muy gratos recuerdos de nuestra niñez.
A mi cuñado a quien considero un hermano.

A mis 3 sobrinos, esperando que este logro pueda ser de cierta forma una motivación para su futuro.

Al amor de mi vida Cristina, quien me ha brindado su apoyo y cariño, con quien comparto un objetivo de vida, que, gracias a la culminación de este trabajo, está cada vez más cerca de cumplirse.

Agradecimiento

Agradezco a todas las personas que siempre han estado pendientes y presentes, para brindarme su apoyo.

A mis padres por enseñarme que nunca debo dejar de esforzarme, por brindarme su inmenso cariño y por todo el esfuerzo que han realizado para que yo pueda seguir mejorando día a día.

A mis hermanos quienes a través de su esfuerzo me demostraron los logros que podemos alcanzar sin importar el tipo de situaciones que tengamos que lidiar.

A Vicky y Amada quienes son amigas muy cercanas de la familia y siempre nos han acompañado, tanto en momentos difíciles, como en momentos de gozo, para reír y disfrutar con nosotros.

A Cristina y sus padres Christa y Gerardo, quienes a pesar de la distancia han demostrado lo mucho que les preocupa mi bienestar, quienes siempre han estado pendientes de mi desempeño durante gran parte de mi vida universitaria.

A Byron Cortez, quien me ha ayudado a solventar dudas, no solo durante el desarrollo de este trabajo, sino también cuando cursaba materias de la malla curricular.

Índice de contenido

<i>Urkund</i>	2
<i>Certificación</i>	3
<i>Responsabilidad de autoría</i>	4
<i>Autorización de publicación</i>	5
<i>Dedicatoria</i>	6
<i>Agradecimiento</i>	7
<i>Índice de contenido</i>	8
<i>Índice de tablas</i>	11
<i>Índice de figuras</i>	13
<i>Resumen</i>	15
<i>Abstract</i>	16
<i>Capítulo I Introducción</i>	17
<i>Antecedentes</i>	17
<i>Definición del problema</i>	17
<i>Justificación e importancia</i>	18
<i>Objetivos</i>	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos	19
<i>Alcance</i>	20
Diseño Mecánico	20
Diseño Electrónico Y Eléctrico	20
Diseño Del Sistema De Control	21
<i>Estructura del documento</i>	22
<i>Capítulo II Estado del arte</i>	23
<i>Máquinas fresadoras</i>	23
<i>Tipos de fresadoras</i>	23
<i>Control numérico por computadora (CNC)</i>	25
Características De Las Máquinas CNC.....	26
Funcionamiento De Las Máquinas CNC	28
Códigos De Programación.....	29
<i>Parámetros de corte</i>	32
Velocidad De Corte	32
Avance De Mesa O Velocidad De Avance	34

Profundidad De Corte	35
<i>Software para CNC</i>	35
<i>Control estadístico de procesos</i>	36
Gráficas De Control	37
Utilización De Gráficos x Y R.....	38
<i>Capítulo III Levantamiento del estado actual de la máquina</i>	40
<i>Estado inicial de la máquina</i>	40
<i>Evaluación de los componentes de la máquina</i>	42
Evaluación De Los Componentes Mecánicos.....	42
Evaluación De Los Componentes Electrónicos	43
Evaluación De Componentes Varios	44
<i>Diagnóstico del estado de la máquina</i>	44
<i>Capítulo IV Rediseño y selección de alternativas</i>	45
<i>Requerimientos del cliente</i>	45
<i>Especificaciones técnicas</i>	46
<i>Estructura funcional</i>	47
Función Global Del Sistema	48
Subsistemas Funcionales Del Sistema	49
<i>Definición de módulos</i>	49
Módulo “Movilidad”	49
Módulo “Mecánica”	52
Módulo “Protección”	53
Módulo “Control”	55
<i>Análisis y selección de alternativas</i>	58
Módulo “Movilidad”	59
Módulo “Mecánica”	61
Módulo “Protección”	63
Módulo “Control”	65
<i>Definición del rediseño</i>	69
Módulo “movilidad”	70
Módulo “Mecánica”	77
Módulo “Protección”	78
Módulo “Control”	78
<i>Resumen</i>	80

<i>Capítulo V Implementación, pruebas y análisis de resultados</i>	82
<i>Implementación</i>	82
Desmantelamiento De Toda La Máquina	82
Maquinado De La Mesa De Trabajo.....	83
Desmantelamiento De Motor Del Husillo.....	84
Estructura Base	84
Base Para Brida	85
Cambio de gabinete	85
Instalación De Nuevo Software.....	86
Conexión De Fines De Carrera	87
Conexión De Nuevo Motor Con Variador De Frecuencia	87
Acoplamiento Motor/Husillo	88
Instalación De Motor Trifásico.....	88
Paro De Emergencia.....	89
<i>Pruebas y análisis de resultados</i>	90
Pruebas De Funcionamiento.....	90
Control Estadístico De Procesos Para El Eje X.....	91
Control Estadístico De Procesos Para El Eje Y	93
Control Estadístico De Procesos Para El Eje Z.....	95
Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje X	97
Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje Y.....	98
Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje Z.....	98
<i>Resumen</i>	99
<i>Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones</i>	101
<i>Conclusiones</i>	101
<i>Recomendaciones</i>	102
<i>Bibliografía:</i>	103
<i>Anexos</i>	108

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación de las Fresadoras.</i>	24
Tabla 2 <i>Puesta en Marcha de Máquinas CNC.</i>	29
Tabla 3 <i>Instrucciones de Movimiento (Funciones G).</i>	30
Tabla 4 <i>Funciones M (auxiliares).</i>	31
Tabla 5 <i>Velocidades de Corte.</i>	33
Tabla 6 <i>Avance por Diente Recomendado (Fresas de Alta Velocidad).</i>	34
Tabla 7 <i>Datos generales de la máquina fresadora.</i>	40
Tabla 8 <i>Estado Inicial de la Fresadora CNC TERCO LA-20.</i>	41
Tabla 9 <i>Evaluación de los componentes mecánicos de la máquina.</i>	43
Tabla 10 <i>Evaluación de los componentes electrónicos de la máquina.</i>	43
Tabla 11 <i>Evaluación de componentes varios.</i>	44
Tabla 12 <i>Requerimientos del usuario.</i>	45
Tabla 13 <i>Documento de especificación.</i>	46
Tabla 14 <i>Simbología de la estructura modular.</i>	48
Tabla 15 <i>Ventajas y Desventajas de Alternativas para Cambio del Motor.</i>	51
Tabla 16 <i>Ventajas y Desventajas de Alternativas para Sujeción del Motor.</i>	53
Tabla 17 <i>Ventajas y Desventajas de Alternativas para Fines de carrera.</i>	54
Tabla 18 <i>Ventajas y Desventajas de Alternativas para Control de Velocidad.</i>	56
Tabla 19 <i>Ventajas y Desventajas de Alternativas para Software De Control</i>	57
Tabla 20 <i>Criterios ponderados para selección de Motor.</i>	60
Tabla 21 <i>Criterios Ponderados para selección de Sujeción de motor.</i>	62
Tabla 22 <i>Criterios Ponderados para selección de Control de Posición.</i>	63
Tabla 23 <i>Criterios Ponderados para Selección de Control de Velocidad.</i>	65
Tabla 24 <i>Criterios Ponderados para Selección de Software de Control.</i>	67
Tabla 25 <i>Soluciones seleccionadas.</i>	69

Tabla 26 <i>Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.</i>	91
Tabla 27 <i>Constantes para calcular gráficos x y R.</i>	92
Tabla 28 <i>Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.</i>	93
Tabla 29 <i>Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.</i>	95
Tabla 30 <i>Prueba de velocidad de avance en X.</i>	97
Tabla 31 <i>Prueba de velocidad de avance en Y.</i>	98
Tabla 32 <i>Prueba de velocidad de avance en Z.</i>	99

Índice de figuras

Figura 1 <i>Vista general de la Fresadora.</i>	21
Figura 2 <i>Fresadora Vertical de Banda.</i>	24
Figura 3 <i>Fresadora Horizontal.</i>	24
Figura 4 <i>Fresadora Universal Heller.</i>	25
Figura 5 <i>Panel de control de una máquina CNC.</i>	26
Figura 6 <i>Fresadora CNC (Desplazamiento de la mesa).</i>	27
Figura 7 <i>Fresadora CNC Router.</i>	27
Figura 8 <i>Porta herramientas de un centro de mecanizado Diamant.</i>	28
Figura 9 <i>Graficas de control.</i>	37
Figura 10 <i>Función Global del Sistema o Nivel 0.</i>	48
Figura 11 <i>Subfunciones de Nivel 1.</i>	49
Figura 12 <i>Subfunciones de nivel 2.</i>	50
Figura 13 <i>Motor paso a paso SM86118.</i>	51
Figura 14 <i>Motor trifásico de 1 HP.</i>	52
Figura 15 <i>Motor trifásico WEG.</i>	53
Figura 16 <i>Motor Trifásico WEG con brida.</i>	53
Figura 17 <i>Fin de carrera.</i>	54
Figura 18 <i>Sensor de proximidad.</i>	55
Figura 19 <i>Variador de frecuencia trifásico.</i>	56
Figura 20 <i>Transmisiones de potencia por correas.</i>	56
Figura 21 <i>Interfaz de Software Mach4.</i>	57
Figura 22 <i>Interfaz de LinuxCNC.</i>	58
Figura 23 <i>Interfaz de TurboCNC.</i>	58
Figura 24 <i>Motor a pasos de 8 cables marca Probotix.</i>	70
Figura 25 <i>Motor WEG trifásico de 220 de 1HP.</i>	73

Figura 26 Breaker y contactor de 10 A.	73
Figura 27 Eje de transmisión de movimiento Motor-Husillo.	77
Figura 28 Variador de frecuencia WEG CFW 100.	79
Figura 29 Simulación de circuito de acondicionamiento de la señal.	79
Figura 30 Ubicación de nuevos componentes de la máquina.	80
Figura 31 Desmantelamiento de la fresadora.	82
Figura 32 Maquinado de la mesa de trabajo.	83
Figura 33 Diseño de activadores para los fines de carrera.	84
Figura 34 Desensamble de motor de 0.25 HP.	84
Figura 35 Materiales para la estructura base.	85
Figura 36 Maquinado de la base para la brida del motor.	85
Figura 37 Instalación de electrónica en el nuevo gabinete.	86
Figura 38 Instalación del sistema operativo y del software LinuxCNC.	87
Figura 39 Conexión de Variador de frecuencia CFW 100.	88
Figura 40 Eje, chavetas y 2 juegos de Lovejoy.	88
Figura 41 Corrección de la desviación del eje.	89
Figura 42 Instalación del motor trifásico a la estructura de protección.	89
Figura 43 Probetas para control estadístico de procesos.	90
Figura 44 Gráfica de control R eje X.	92
Figura 45 Gráfica de control x	93
Figura 46 Gráfica de control R eje Y.	94
Figura 47 Gráfica de control y	95
Figura 48 Gráfica de control R eje Z.	96
Figura 49 Gráfica de control z	97

Resumen

En este trabajo se presenta todo el procedimiento realizado para la rehabilitación y modernización de la máquina fresadora CNC TERCO LA-20 para su uso dentro del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. El método empleado para la realización de este proyecto fue el Diseño Concurrente. En cada uno de los capítulos se representan los pasos que se realizaron para completar la rehabilitación. Primero se realiza una introducción general acerca de las máquinas fresadoras. Luego se hace un reconocimiento de todos los componentes de la máquina y se agrupan en diferentes módulos. Posteriormente en base a los requerimientos del laboratorio de manufactura se plantean diferentes alternativas para solucionar los problemas presentados en cada módulo y en base a ponderaciones se seleccionan las opciones más destacadas. Finalmente se realizan pruebas de funcionamiento para determinar las nuevas capacidades de la máquina y comprobar que las mismas se encuentran dentro de las normas establecidas, así como de los requerimientos planteados. Las acciones realizadas para completar la modernización de la máquina fueron, realizar el control del husillo desde la HMI, para lo cual se instaló, 1 motor trifásico marca WEG de 1HP y un variador de frecuencia modelo CFW100 de la misma marca, se colocaron fines de carrera para limitar y determinar la posición inicial de la mesa de trabajo, se reemplazó el software de control por un software gratuito que funciona con sistema operativo Linux.

Palabras clave:

- **REHABILITACIÓN**
- **MODERNIZACIÓN**
- **HUSILLO**
- **CONTROL DE VELOCIDAD**
- **VARIADOR DE FRECUENCIA**

Abstract

This paper presents the entire procedure for the rehabilitation and modernization of the TERCO LA-20 CNC milling machine for its use inside the manufacturing process laboratory of the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. The method used to carry out this project was the Concurrent Design. The steps considered to complete the rehabilitation are represented in each of the chapters. First, a general introduction is made about milling machines. Then, an acknowledgment of all the machine components is established and they are grouped into different modules. Subsequently, based on the requirements of the manufacturing laboratory, different alternatives are proposed to solve the specific problems in each module, based on weightings the most outstanding options are selected. Finally, performance tests will be executed to determine the new capabilities of the machine and check what is within the established standards, as well as the requirements. The actions performed to complete the modernization of the machine were, to perform spindle control from the HMI, for which it was installed, a three-phase WEG motor of 1 HP and CFW100 frequency inverter of the same brand, limit switches were installed to limit the movement of the worktable, the control software was replaced.

KEYWORDS:

- **REHABILITATION**
- **MODERNIZATION**
- **SPINDLE**
- **SPEED CONTROL**
- **VARIABLE FREQUENCY DRIVE**

Capítulo I

Introducción

En este capítulo se presentan antecedentes importantes que destacan cual es la importancia y justificación para la modernización de la fresadora CNC TERCO LA-20.

Antecedentes

El primer desarrollo dentro del área del control numérico por computadora (CNC) fue realizado por el inventor John T. Parsons en la década de 1940. El concepto implicaba la utilización de datos en un sistema de referencia para definir las superficies de contorno de las hélices de un helicóptero. (“Historia de la Fresadora”, 2018)

Principalmente el control numérico surge de la necesidad que tienen las personas/empresas de disminuir el tiempo de trabajo y de lograr una homogenización de características del producto final. En gran medida este desarrollo se produjo gracias a los avances tecnológicos, que se encuentran en constante evolución.

La importancia de los sistemas CNC radica en que controlan la posición relativa de la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo. Además, poco a poco dichos sistemas incorporaron diferentes avances como funciones de interpolaciones o cambios automáticos de herramientas; de esta forma dando lugar a un tipo de máquinas herramienta que ahora se conocen como “Centro de Mecanizado”. (“Historia de la Fresadora”, 2018)

Definición del problema

El proyecto planteado consiste en la rehabilitación y modernización de la fresadora CNC TERCO LA-20, que se encuentra en el Laboratorio de Procesos de Manufactura. La máquina se encuentra fuera de servicio desde el 2015 debido a que no

posee fines de carrera, y no brinda la seguridad necesaria al operario o a su propia estructura; adicionalmente no se puede definir el cero de máquina.

Para conseguir lo antes mencionado; se mejorará la parte mecánica y electrónica/eléctrica, dando mantenimiento a los diferentes componentes existentes y reemplazando elementos que ya no funcionen correctamente, también se actualizará el software que se emplea para controlar la fresadora por un software libre

El Laboratorio no posee documentación de la máquina y en adición a esto, la empresa sueca “Terco” dejó de fabricar dicha máquina hace más de 30 años, por esta razón se planea realizar un análisis exhaustivo para determinar la mejor forma de llevar a cabo la modernización y puesta en marcha de la fresadora CNC TERCO LA-20.

Justificación e importancia

El objetivo de la ESPE es formar académicos, profesionales e investigadores de excelencia, es por esto que se adquieren equipos didácticos como la fresadora CNC TERCO LA-20; con el fin de alcanzar estas metas por medio de la práctica. Pero muchos de estos equipos ya tienen muchos años desde que la Universidad los adquirió y es necesario que sean reemplazados. En ciertos casos parte de los componentes de estos equipos se encuentran en buen estado por lo que, realizando un rediseño, mejora y/o mantenimiento se puede volver a emplear dichos equipos.

Si bien es cierto en Ecuador se nota una mejora en el desempeño industrial debido a la necesidad de las empresas por ser más competitivas. La mayoría de empresas e industrias de diferentes áreas, no están dispuestas a invertir en maquinaria nueva en gran mayoría de los casos debido al elevado costo que esto significaría; pero al mismo tiempo cuentan con equipos en los que los costos de mantenimiento e incluso los de operación llegan a superar la relación de costo-beneficio. Por esto se plantea la

modernización como una buena solución si el objetivo principal de las empresas es mantener un nivel de competitividad alto y abaratar costos. (Jácome & Villacís, 2014)

La importancia del proyecto radica principalmente en que, por medio de una inversión mucho menor al costo original de la máquina, esta será acondicionada y puesta en marcha nuevamente, para que pueda ser usada por los estudiantes de la Universidad en diferentes prácticas de Laboratorio.

Con la ayuda de este equipo se pueden realizar prácticas de Laboratorio de Fabricación Asistida por Computadora (CAM), que viene a ser una parte de todo el proceso que conlleva el maquinado de una pieza; es decir, Diseño Asistido por Computadora (CAD) de la pieza, diseño CAM (obtención de código G) y finalmente el maquinado.

Objetivos

Objetivo General

Rehabilitar y modernizar el taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Objetivos Específicos

- Identificar todos los problemas existentes en los sistemas que componen la máquina fresadora y especificar detalladamente los cambios en el sistema mecánico y en sus componentes, necesarios para mejorar la máquina, respaldado en planos, cálculos y simulaciones para su posterior construcción.
- Reparar e implementar el sistema electrónico de control y de potencia de la máquina necesarios para su correcto funcionamiento tomando en cuenta parámetros de entrada.

- Realizar pruebas de funcionamiento para la calibración de la máquina.

Alcance

El proyecto tiene como objetivo rehabilitar y modernizar el taladro/fresador CNC TERCO LA-20 del Laboratorio de Procesos de Manufactura, se mejorará la estructura de seguridad de la máquina, se dará mantenimiento a todos los subsistemas y componentes de la máquina, se reemplazará el motor del husillo para trabajos más pesados y se actualizarán el software de control (HMI). En la figura 1 se observan algunos componentes de la máquina.

Diseño Mecánico

- Actualmente una parte de los componentes de la máquina se encuentran en buen estado, pero existen otros componentes que requieren ser reparados o reemplazados.
- Se diseñará y construirá una estructura que se encargará de sujetar el motor del husillo al cabezal de la fresadora. Para sujetar dicha estructura se realizarán modificaciones a la estructura de seguridad.
- Durante el proceso se planea evaluar todos los subsistemas y partes, y realizar el mantenimiento de todos los elementos evaluados.

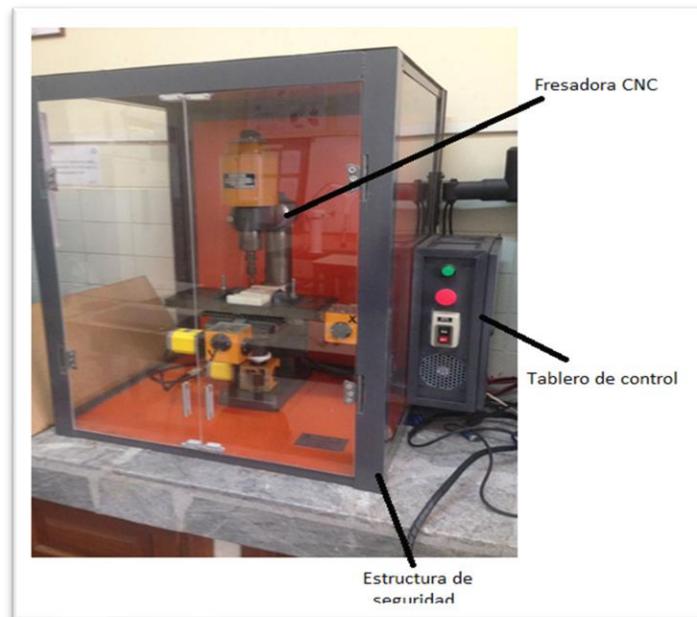
Diseño Electrónico Y Eléctrico

- Se seleccionarán los sensores que se acoplen de mejor manera a las operaciones de la máquina.
- Se etiquetarán los cables y los elementos que se encuentran dentro del gabinete de control.

- Se realizará el control de la máquina para evitar que sufra colisiones dentro de la estructura de seguridad.
- Se seleccionará el motor ideal para el movimiento del husillo, para lo cual se implementará un circuito para acoplar la parte de electrónica de potencia y de control.

Figura 1

Vista general de la Fresadora.



Diseño Del Sistema De Control

- Se configurará el cero de máquina, para ubicar la mesa en una posición específica al momento de encender la máquina.
- Se realizará el control de velocidad del motor del husillo.
- Se realizará una nueva HMI, por medio de la cual se realizará el control de la fresadora.

Estructura del documento

El presente documento consta con seis capítulos distribuidos de la siguiente forma:

- El primer capítulo proporciona información sobre la importancia del proyecto, antecedentes, objetivos y alcance.
- El segundo capítulo muestra la fundamentación teórica del funcionamiento de fresadoras, CNC y parámetros de corte.
- En el tercer capítulo se presentará el estado inicial en el cual se encontró la máquina y sus componentes.
- En el cuarto capítulo se muestran las alternativas y posterior selección de las mismas para solucionar problemas relevantes con cada módulo de la máquina.
- En el quinto capítulo se realizará una breve explicación de la implementación de las distintas alternativas. También se presentarán los resultados del desempeño de la máquina, luego de aplicar pruebas de funcionamiento.
- Finalmente, el sexto capítulo contendrá conclusiones y recomendaciones acerca de las mejoras para la fresadora CNC TERCO LA-20.

Capítulo II

Estado del arte

En el presente capítulo se exponen generalidades acerca de las máquinas fresadoras CNC como por ejemplo sus características y su funcionamiento entre otras. Adicionalmente se realiza una breve explicación de cómo realizar el control estadístico de procesos de manufactura.

Máquinas fresadoras

Son máquinas utilizadas con el fin de maquinar la superficie de una pieza de trabajo a través del arranque de viruta, para lo cual se emplea una herramienta de corte conocida como “fresa”. Existen varios tipos de fresas, con diferentes formas y tamaños, pero una característica común que poseen la gran mayoría son los bordes cortantes también conocidos como dientes que al momento de girar y hacer contacto con la superficie de la pieza son los encargados de remover el material.

Las fresadoras son capaces de maquinar diferentes tipos de materiales sean estos ferrosos o no ferrosos e incluso materiales sintéticos. El tipo de material que se machine depende de ciertos factores.

Los movimientos de una máquina fresadora pueden ser controlados manual o automáticamente. Por lo general se realizan maquinados automáticos cuando se requiere obtener como producto final una pieza con una geometría compleja. Se pueden obtener geometrías complejas al maquinar manualmente, pero siempre y cuando el operario tenga mucha habilidad y experiencia en el maquinado.

Tipos de fresadoras

Las máquinas fresadoras pueden ser clasificadas de varias formas dependiendo desde que punto de vista se lo haga. La forma más común de hacerlo es según la

orientación de la herramienta. En la tabla 1 se pueden observar los tipos de fresadora de acuerdo a la orientación del husillo.

Tabla 1

Clasificación de las Fresadoras.

Tipo	Descripción
<p data-bbox="297 579 407 611">Figura 2</p> <p data-bbox="297 642 678 674"><i>Fresadora Vertical de Banda.</i></p>  <p data-bbox="297 1035 699 1066"><i>Nota: obtenido de (Herra Precio, s.f.)</i></p>	<p data-bbox="862 674 1373 909">Estas se caracterizan porque el eje del husillo (herramienta de corte) está ubicado verticalmente en la máquina, situándose de forma perpendicular a la mesa de trabajo.</p>
<p data-bbox="297 1094 407 1125">Figura 3</p> <p data-bbox="297 1157 581 1188"><i>Fresadora Horizontal.</i></p>  <p data-bbox="297 1549 818 1633"><i>Nota: obtenido de (De Máquinas y Herramientas, 2015)</i></p>	<p data-bbox="862 1199 1398 1482">En estas máquinas el husillo se encuentra ubicado de forma paralela a la superficie de la mesa. Emplean fresas cilíndricas, que son usadas para realizar trabajos de ranurado. (“GNC Calderería”, 2016)</p>

Tipo	Descripción
<p data-bbox="298 327 407 359">Figura 4</p> <p data-bbox="298 394 656 426"><i>Fresadora Universal Heller.</i></p>  <p data-bbox="298 753 638 785"><i>Nota: obtenido de (HELER, s.f.)</i></p>	<p data-bbox="846 422 1414 653">Este tipo de fresadoras pueden ser tanto horizontales como verticales, lo cual se consigue debido a que fresadoras verticales poseen un cabezal que permite acoplar ejes portaherramientas horizontales.</p>

Control numérico por computadora (CNC)

Los sistemas CNC son los encargados de controlar por medio de una computadora la posición y velocidad de los motores que proporcionan el movimiento de la máquina (mesa y husillo). Por medio de esta tecnología se puede realizar una variedad de diferentes movimientos y combinaciones que resultan difíciles de hacer manualmente.

Las CNC pueden realizar movimientos simultáneos en todos sus ejes, permitiendo de esta forma trazar trayectorias tridimensionales, que permiten obtener piezas sumamente similares a su modelo CAD.

En los centros de mecanizado es común encontrar paneles como se muestra en la figura 5. Una vez cargado el código G, la computadora ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de intervención del operador, esto permite optimizar el tiempo del personal para que sea más productivo. (“ViwaCNC”, s.f.)

Figura 5

Panel de control de una máquina CNC.



Nota: obtenido de (ViwaCNC, s.f.)

Características De Las Máquinas CNC

- Las máquinas CNC son productos típicamente mecatrónicos, estos poseen componentes mecánicos como la estructura de la fresadora, componentes electrónicos como los motores que dan movimiento a la mesa de trabajo y un sistema de control numérico que como ya se manifestó se encarga de todo el control de movimientos y velocidades de la máquina. (Suh, Kang, Chung, & Stroud, 2008)
- Las CNC pueden trabajar con más de 3 ejes de movimiento, para crear piezas mucho más complejas.
- Para realizar los desplazamientos de los diferentes ejes se emplean motores. Los movimientos pueden ser realizados por la mesa de trabajo como se ve en la figura 6, o por la herramienta de corte como se muestra en la figura 7.
- Pueden realizar movimientos complejos y simultáneos, que no pueden ser realizados por operarios, estos movimientos son angulares, circulares y lineales.

Figura 6

Fresadora CNC (Desplazamiento de la mesa).



Nota: obtenido de (TecnoMáquinas, s.f.)

Figura 7

Fresadora CNC Router.



Nota: obtenido de <https://blog.330hms.com/2017/03/28/diferencia-entre-router-y-fresadora/>

- En todas las máquinas CNC, parámetros como la velocidad del husillo y velocidad de avance son programables, y por tal motivo se pueden realizar una estimación del tiempo que llevaría realizar una serie de piezas.

Figura 8

Porta herramientas de un centro de mecanizado Diamant.



Nota: obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/167759-Diamant-un-centro-de-mecanizado-versatil.html>

- Cuando se realiza un maquinado que requiera el uso de refrigerante o lubricante para enfriar la superficie de trabajo de la pieza, los sistemas CNC se encargan de abastecer o detener el sistema de refrigeración.

Funcionamiento De Las Máquinas CNC

Los sistemas CNC son empleados en su gran mayoría con el fin de mejorar tiempos de producción.

Las CNC se programan utilizando códigos G y M, los códigos G se refieren a códigos de avance que le dicen a la máquina que movimientos, giros y cortes debe realizar, mientras que los códigos M encienden o apagan otros dispositivos extras como husillo. (Bayne, 2018)

En la tabla 2 se presenta una breve explicación de las formas en la que se puede poner en funcionamiento las máquinas CNC.

Tabla 2*Puesta en Marcha de Máquinas CNC.*

Método	Descripción
Manual	Los razonamientos son transcritos o colocados por un operador. Esta programación es la fuente que permite la mecanización automática de toda la maquinaria. Se realiza cuando el maquinado es simple (“Sideco”, 2015)
Automático	Se realiza el diseño de la pieza con la ayuda de un software CAD, posteriormente se emplea un software CAM para calcular los desplazamientos de los ejes, las velocidades de avance y las velocidades de giro; y todo esto lo convierte en código G. Finalmente, el software de control recibe el código G y ejecuta las órdenes de desplazamiento de las partes móviles de la fresadora.

Códigos De Programación

Al emplear herramientas de diseño CAD/CAM, se produce un ahorro tanto de recursos virtuales como de recursos reales ya que con estas se crea un paso previo al maquinado de las piezas, este paso permite adecuar el trabajo a las necesidades de producción.

Debido al gran número de máquinas CNC existentes en el mercado, se consideró la necesidad de englobar la programación de dichas máquinas en un lenguaje de programación estándar: el código ISO-6983, más comúnmente conocido como Código G. (Carbonell, 2011)

En la tabla 3 se presentan algunas instrucciones de código G y en la tabla 4 instrucciones de funciones auxiliares.

Tabla 3*Instrucciones de Movimiento (Funciones G).*

Instrucción	Descripción
G00	Posicionamiento rápido
G01	Interpolación Lineal
G02	Interpolación Circular en sentido horario
G03	Interpolación Circular en sentido antihorario
G04	Temporización
G05	Arista matada
G06	Interpolación Circular con centro en absolutas
G07	Arista viva
G08	Arco tangente a la trayectoria anterior
G09	Interpolación Circular definida por tres puntos
G10	Anulación imagen espejo
G11	Imagen espejo en eje X
G12	Imagen espejo en eje Y
G13	Imagen espejo en eje Z
G17	Plano XY
G18	Plano XZ
G19	Plano YZ
G20	Llamada a sub-rutina standard
G21	Llamada a sub-rutina paramétrica
G22	Definición de sub-rutina standard
G23	Definición de sub-rutina paramétrica
G24	Final de definición de sub-rutina
G25	Llamada incondicional
G26	Llamada condicional si igual a 0
G27	Llamada condicional si distinto de 0

Instrucción	Descripción
G28	Llamada condicional si menor
G29	Llamada condicional si mayor o igual
G30	Visualizar error definido por K
G31	Guardar origen de coordenadas
G32	Recuperar origen de coordenadas
G33	Roscado electrónico
G36	Redondeo controlado de aristas
G37	Entrada tangencial
G38	Salida tangencial
G39	Achaflanado
G40	Anulación de compensación de radio
G41	Compensación de radio a la izquierda
G42	Compensación de radio a la derecha
G43	Compensación de longitud
G44	Anulación de compensación de longitud
G47	Bloque único
G48	Anulación de bloque único
G49	Feed programable
G50	Carga de longitudes de herramienta
G53	Traslado de origen

Nota: obtenido de <http://www.gulmi.com.ar/iso.pdf>

Tabla 4

Funciones M (auxiliares).

Instrucción	Descripción
M00	Parada de programa
M01	Parada condicional del programa
M02	Final del programa
M03	Arranque del husillo en sentido horario
M04	Arranque del husillo en sentido antihorario

Instrucción	Descripción
M05	Parada del husillo
M06	Cambio de herramienta
M30	Final del programa con reseteo de variables

Nota: obtenido de <http://www.gulmi.com.ar/iso.pdf>

Parámetros de corte

Cuando se realizan trabajos de maquinado por arranque de viruta, existen ciertos parámetros necesarios para que la operación de la máquina sea lo más eficiente posible.

Para las fresadoras estos parámetros son los mismos, ya sea para una máquina tradicional o para una CNC, pero es necesario tomar en cuenta que las CNC son más precisas y para justificar su alto costo inicial se debe realizar producciones en serie; razón por la cual se tiene que usar las máquinas por periodos de tiempo más extensos, por lo que se busca optimizar los tiempos de producción.

La velocidad a la cual avanza la pieza hacia la fresa giratoria es importante. Si avanza demasiado lento, se desperdiciará tiempo de producción, pero si avanza demasiado rápido, los dientes de la fresa se pueden romper.

Existen una serie de parámetros que deben ser tomados en cuenta para las operaciones de fresado, como los son velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte. (Krar, Gill, & Smid, 2009)

Velocidad De Corte

Este es un parámetro que puede ser hallado en tablas conociendo el material tanto de la herramienta de trabajo como de la pieza a maquinar. Se usa para calcular las revoluciones por minuto (RPM) a las que gira el motor del husillo. Se lo encuentra representado como V_c .

Para realizar el cálculo se emplea la ecuación 1:

$$V_c = \frac{D_{cap} \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Donde:

V_c : Velocidad de corte (mm/min o pulg/min).

D_{cap} : Diámetro de la herramienta (mm o pulg).

n : Velocidad del husillo (RPM).

En la tabla 5 se muestran valores de V_c , dependiendo del material de la pieza de trabajo.

Tabla 5

Velocidades de Corte.

Material	Fresa de acero de alta velocidad		Fresa de carburo	
	pie/min	m/min	pie/min	m/min
Acero aleado	40 a 70	12 a 20	150 a 250	45 a 75
Aluminio	500 a 1000	150 a 300	1000 a 2000	300 a 600
Bronce	65 a 120	20 a 35	200 a 400	60 a 120
Madera	600 a 1100	180 a 350	1200 a 2000	350 a 700
Termoplásticos	600 a 1000	170 a 320	1100 a 2000	330 a 600
Hierro fundido	50 a 80	15 a 25	125 a 200	40 a 60
Acero de maquinado libre	100 a 150	30 a 45	400 a 600	120 a 180
Acero para maquinaria	70 a 100	21 a 30	150 a 250	45 a 75
Acero inoxidable	30 a 80	10 a 25	100 a 300	30 a 90
Acero para herramienta	60 a 70	18 a 20	125 a 200	40 a 60

Nota: obtenido de Krar, S., Gill, A., & Smid, P. (2009). Tecnología de las Máquinas Herramientas, pag 468.

Avance De Mesa O Velocidad De Avance

El avance se define como la distancia por minutos que se mueve la pieza de trabajo hacia la fresa. En la mayoría de las máquinas fresadoras el avance es independiente de la velocidad del husillo, esto permite avances más rápidos para fresas grandes que giran despacio. (Krar, Gill, & Smid, 2009)

Se determina empleando la ecuación 2:

$$V_f = n \cdot f_z \cdot Z_c \quad (2)$$

Donde:

Z_c : Número de dientes en la fresa.

f_z : Avance por diente recomendado (mm o pulg).

n : Revoluciones por minuto de la fresa.

En la tabla 6 se pueden observar algunos valores para f_z recomendados dependiendo del material de la pieza de trabajo y el material de la herramienta.

Tabla 6

Avance por Diente Recomendado (Fresas de Alta Velocidad).

Material	Fresas de careado o refrentado		Fresas helicoidales y corte lateral		Fresas de ranurado	
	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm
Acero aleado	0,006	0,15	0,005	0,12	0,004	0,1
Aluminio	0,022	0,55	0,018	0,45	0,013	0,33
Madera	0,03	0,76	0,02	0,51	0,015	0,38
Termoplásticos	0,025	0,64	0,019	0,48	0,014	0,35
Latón y bronce (medio)	0,014	0,35	0,011	0,28	0,008	0,2
Hierro fundido (medio)	0,013	0,33	0,01	0,25	0,007	0,18

	Fresas de careado o refrentado		Fresas helicoidales y corte lateral		Fresas de ranurado	
Acero de maquinado libre	0,012	0,3	0,01	0,25	0,007	0,17
Acero para maquinaria	0,012	0,3	0,01	0,25	0,007	0,18
Acero inoxidable	0,006	0,15	0,005	0,13	0,004	0,1
Acero para herramienta	0,01	0,25	0,008	0,2	0,006	0,15

Nota: obtenido de Krar, S., Gill, A., & Smid, P. (2009). Tecnología de las Máquinas Herramientas, pag 470.

Profundidad De Corte

La profundidad de corte depende principalmente del acabado superficial que se desee tener. Existen 2 tipos de cortes cuando se maquina una superficie, los cortes de desbaste y cortes de acabado.

Los cortes de desbaste deben ser profundos, con un avance tan grande como lo permitan la máquina y la pieza. Se pueden hacer cortes más profundos con fresas helicoidales con menos dientes ya que son más resistentes y tienen una mayor holgura para virutas que las fresas con más dientes.

Los cortes de acabado deben ser ligeros con un avance más fino de lo utilizado para los cortes de desbaste. La profundidad del corte debe ser por lo menos de 0.015 pulg (0.4 mm). (Krar, Gill, & Smid, 2009)

Software para CNC

Existen muchos softwares empleados en procesos en los cuales están involucradas máquinas CNC, pero sin duda los más importantes son los que se encargan de comunicar los motores de la máquina con la computadora conocidos como "Software de control".

En la actualidad las máquinas CNC se están volviendo cada vez más comunes por su versatilidad, lo que ha hecho que muchas industrias opten por reemplazar equipos operados de forma manual por equipos más modernos.

El incremento del uso de este tipo de equipos también ha hecho que se incremente el número de softwares que pueden ser usados para controlar estas máquinas; estos programas pueden ser licenciados o libres.

Los softwares de control CNC se pueden dividir en 2, el software de control integrado que brinda una solución completa de hardware y software; y software basado en computadora que tienen un controlador externo; es decir se puede convertir a un computador en el controlador de la máquina.

Control estadístico de procesos

El control estadístico de procesos o SPC por sus siglas en inglés (Statistical Process Control) se usa como una técnica para monitorear un proceso y dar a conocer el resultado del mismo, posteriormente se verifica que el resultado concuerde con las características finales requeridas. El SPC se lleva a cabo por medio de gráficos de control. (Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2008)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

Donde:

\bar{x} : La “media” es la suma de las observaciones dividida entre el número total de observaciones.

x_i : Observación o muestra.

n : Número total de observaciones.

Gráficas De Control

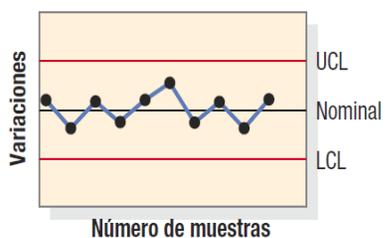
Son representaciones ordenadas empleadas para observar variaciones que no son consideradas normales en el desarrollo de un proceso.

Las gráficas de control están formadas por un valor nominal, que representa el promedio histórico del proceso y dos límites de control, el límite superior es UCL y el límite inferior es LCL. (Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2008)

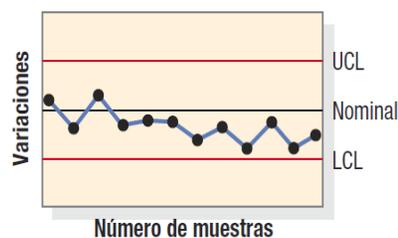
En la figura 9 se presentan 4 ejemplos de gráficas de control y las acciones que se deben realizar para cada situación expuesta en dichas gráficas.

Figura 9

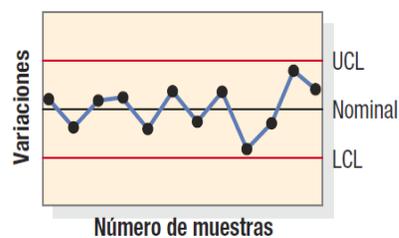
Gráficas de control.



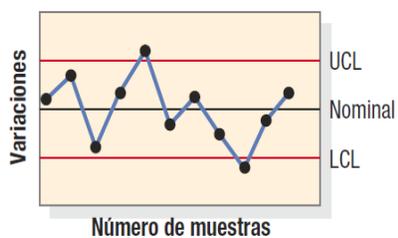
(a) Normal, no se requiere acción



(b) Carrera, adoptar medidas



(c) Cambio repentino, monitorear



(d) Rebasa los límites de control, adoptar medidas

Nota: obtenido de Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2008). Administración de Operaciones: Procesos y cadenas de valor, pag 219.

Gráficas R. Estas son usadas para monitorear la variabilidad de los procesos.

(Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2008)

Como se mencionó anteriormente estas poseen un límite superior y un límite inferior que se calcula de la siguiente forma:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (4)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (5)$$

Donde:

\bar{R} : Es el promedio de recorrido de las muestras.

UCL_R : Es el límite superior.

LCL_R : Es el límite inferior.

D_4, D_3 : Son constantes de desviación estándar para un tamaño de muestra.

Gráficas \bar{x} . Estas son empleadas para verificar que el proceso está generando una producción que pueda ser llamada "normal" tomando como referencia un valor que fue tomado previamente como meta a alcanzar, si se compara el proceso actual con un proceso pasado.

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (6)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (7)$$

Donde:

$\bar{\bar{x}}$: Es el promedio de las medias muestreadas o un valor establecido como objetivo.

A_2 : Constante para proporcionar límites 3 sigma para la media de la muestra.

Utilización De Gráficas \bar{x} Y R

En este apartado se explicarán los pasos a seguir para el emplear las gráficas de control.

- Paso 1: Recolectar y organizar datos por número de muestra.
- Paso 2: Calcular el rango y promedio de rango de cada conjunto de muestras.
- Paso 3: Determinar los límites de control superior e inferior del gráfico R, empleando tablas con factores.
- Paso 4: Ubicar los rangos de la muestra. Si todos están bajo control, seguir con el paso 5. De lo contrario, rectificar y volver al paso 1.
- Paso 5: Calcular \bar{x} para cada muestra y determinar la línea central del gráfico, $\bar{\bar{x}}$.
- Paso 6: Determinar los parámetros para $UCL_{\bar{x}}$ y $LCL_{\bar{x}}$ (constantes en tabla de paso 3), y construir el gráfico \bar{x} .
- Paso 7: Trazar las medias de la muestra. Si todas están bajo control, el proceso está controlado estadísticamente en términos del promedio y la variabilidad del proceso. Continuar tomando muestras y monitorear el proceso. Si alguna de ellas está fuera de control, buscar las causas asignables, corregir y regresar al paso 1. (Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2008)

Capítulo III

Levantamiento del estado actual de la máquina

En este capítulo se realiza un análisis exhaustivo del estado en el que se encontró la máquina antes de empezar el desarrollo del proyecto. Se hará un reconocimiento total debido a que la máquina no posee documentación de su estado original (cuando fue adquirida por la Universidad).

Estado inicial de la máquina

Para el reconocimiento inicial, primero se realizó una inspección general de los principales componentes de la máquina con el fin de obtener especificaciones técnicas (tabla 7), debido a que no existe documentación del fabricante, porque la máquina se dejó de fabricar hace más de 30 años.

Tabla 7

Datos generales de la máquina fresadora.

Componente	Parámetro	Unidades
DIMENSIONES DE LA MÁQUINA		
Altura	880	mm
Ancho	570	mm
Largo	710	mm
Dimensión de la mesa de trabajo	360x150x25	mm
Diámetro máximo de fresa	14	mm
Movimiento longitudinal	180	mm
Movimiento transversal	80	mm
Movimiento vertical	40	mm
MOTOR DEL HUSILLO		
Velocidad del husillo	1380 / 2660	RPM

Componente	Parámetro	Unidades
Potencia del motor	186	W
Voltaje de alimentación motor	380	V
OTROS		
Peso	65	kg

Los datos dimensionales de la máquina (altura, ancho y largo), se refieren al volumen que ocupa la misma incluida la estructura de seguridad.

Posteriormente se realizó una inspección mucho más minuciosa con el fin de determinar el estado de los subsistemas y componentes de la máquina fresadora (tabla 8).

Tabla 8

Estado Inicial de la Fresadora CNC TERCO LA-20.

Nº	Componente	Observación
1	Estructura de seguridad	Bisagras de puertas de acceso a la fresadora desgastadas.
2	Gabinete electrónico	Esta soldado a la estructura de seguridad, lo que dificulta el mantenimiento. Adicionalmente el gabinete es muy pequeño para la cantidad de componentes electrónicos.
3	HMI	No responde adecuadamente a los comandos.
4	Documentación	No existe, y debido a que la máquina es bastante vieja no existen respaldos digitales.
5	Motor x	En buen estado.
6	Motor Y	Cables cortados.
7	Motor Z	Ninguna.
8	Driver motor X	Mala conexión.
9	Driver motor Y	No controla el movimiento del motor.
10	Driver motor Z	En buen estado.

Nº	Componente	Observación
11	Motor husillo	Requiere de accionamiento directo del operario para su funcionamiento.
12	Husillo	Buen estado.
13	Software de control	Esta desconfigurado.
14	CPU	Opera de forma lenta y tiene virus.
15	Pantalla	Ninguna.
16	Teclado	Extraviado. Es necesario para usar la máquina.
17	Mouse	Extraviado. Es necesario para usar la máquina.
18	Caja reductora X	En buen estado.
19	Caja reductora Y	Existe un juego entra el tornillo y los rodamientos.
20	Caja reductora Z	En buen estado.
21	Tornillo sin fin X	Requiere de lubricación.
22	Tornillo sin fin Y	Requiere de lubricación.
23	Tornillo sin fin Z	Requiere de lubricación.
24	Carro longitudinal o Mesa de trabajo (eje X)	Los rieles están muy presionados.
25	Carro transversal (eje Y)	En buen estado.
26	Carro vertical (eje Z)	En buen estado.
27	Fines de carrera	No tiene. La mesa de trabajo se puede chocar con la estructura de seguridad.
28	Cable de comunicación	Extraviado. No se puede conectar la maquina con el CPU.
29	Paro de emergencia	No realiza ninguna acción sobre la máquina.

Evaluación de los componentes de la máquina

Para evaluar los componentes, estos serán clasificados y luego calificados. De acuerdo a la puntuación que obtenga cada componente se realizará mantenimiento, reparación y/o reemplazo (modernización) de los mismos.

Evaluación De Los Componentes Mecánicos

Esta evaluación se hace en base al grado de desgaste de cada componente.

Tabla 9

Evaluación de los componentes mecánicos de la máquina.

Nº	Componente	Cal.	Observación
1	Estructura de seguridad	2	Mantenimiento/Reparación
2	Gabinete electrónico	2	Reemplazo
3	Husillo	2	Reparación
4	Caja reductora X	1	Mantenimiento
5	Caja reductora Y	1	Mantenimiento
6	Caja reductora Z	1	Mantenimiento
7	Tornillo sin fin X	1	Mantenimiento
8	Tornillo sin fin Y	1	Mantenimiento
9	Tornillo sin fin Z	1	Mantenimiento
10	Carro longitudinal o Mesa de trabajo (eje X)	2	Mantenimiento/Reparación
11	Carro transversal (eje Y)	1	Mantenimiento
12	Carro vertical (eje Z)	1	Mantenimiento

Nota: 1 = Bueno 2 = Regular 3 = Malo

Evaluación De Los Componentes Electrónicos

Esta evaluación se hace en base al grado de desgaste de cada y funcionamiento de cada componente.

Tabla 10

Evaluación de los componentes electrónicos de la máquina.

Nº	Componente	Cal.	Observación
1	Motor X	1	Mantenimiento
2	Motor Y	3	Mantenimiento/Reparación
3	Motor Z	1	Mantenimiento
4	Driver motor X	2	Mantenimiento/Reparación
5	Driver motor Y	3	Reemplazo

Nº	Componente	Cal.	Observación
6	Driver motor Z	1	Mantenimiento
7	Motor husillo	3	Reemplazo
8	Cable de comunicación	3	Reemplazo
9	Paro de emergencia	3	Mantenimiento/Reparación
10	Fines de carrera	3	Reemplazo

Nota: 1 = Bueno 2 = Regular 3 = Malo

Evaluación De Componentes Varios

Esta evaluación se hace en base al grado de desgaste de cada componente.

Tabla 11

Evaluación de componentes varios.

Nº	Componente	Cal.	Observación
1	HMI	3	Reemplazo
2	Documentación	3	Reemplazo
3	Software de control	3	Reemplazo
4	CPU	2	Mantenimiento
5	Pantalla	1	Mantenimiento
6	Teclado	3	Reemplazo
7	Mouse	3	Reemplazo

Nota: 1 = Bueno 2 = Regular 3 = Malo

Diagnóstico del estado de la máquina

Como se observa en las tablas 9, 10 y 11 todos los componentes de la máquina requieren de mantenimiento, debido a que, por más de 3 años la máquina no ha sido utilizada.

Muchos de los componentes aún se encuentran funcionales por lo que, el trabajo que se realizará sobre la máquina es una modernización y rehabilitación para su puesta en marcha.

Capítulo IV

Rediseño y selección de alternativas

En este capítulo se presentan criterios de diseño para el mejoramiento de la fresadora CNC TERCO LA-20, para lo cual se tomará de referencia el libro de “Diseño concurrente” de Carles Riba, pero enfocando el análisis al rediseño necesario para cumplir con la modernización de la máquina. También se emplearán los módulos planteados en el trabajo realizado anteriormente sobre la misma máquina.

Requerimientos del cliente

La fresadora es un equipo de laboratorio que será usado en beneficio de los estudiantes, por eso se requiere que la máquina sea puesta en marcha, pero para lograr esto se planteó como requisito principal que se reutilice y repare la mayor cantidad de componente para de esa forma el proyecto tenga el menor costo posible. En la tabla 12 se presentan los requerimientos del usuario.

Tabla 12

Requerimientos del usuario.

Nº	Requerimientos del usuario
1	Agregar fines de carrera
2	Cambiar el software empleado para controlar la fresadora.
3	Cambiar el motor del husillo.
4	Controlar la velocidad del husillo.
5	Cambiar la HMI.
6	Cambiar el paro de emergencia.
7	Reparar cableado de motores a pasos.
8	Dar mantenimiento a toda la máquina.

Especificaciones técnicas

Teniendo en cuenta los requerimientos planteados, estos se organizan en un documento breve denominado Documento de Especificación (tabla 13). (Riba Romeva, 2002)

Tabla 13

Documento de especificación.

Empresa:	Producto:	Fecha inicial:
Universidad de las	Rehabilitación y	28/06/2018
Fuerzas Armadas - ESPE	modernización del	Ultima revisión:
	taladro/fresador CNC	04/06/2019
	TERCO LA-20.	Página 1/1

Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	28/06/2018	I	R	Sistema de rotación husillo
Dimensiones	28/06/2018	C+I	R	Sujeción de motor del husillo
		I	R	Sujeción fines de carrera
Movimientos	28/06/2018	I	D	Movimiento longitudinal
		I	D	Movimiento transversal
		I	D	Movimiento vertical
		C	R	Movimiento rotacional del husillo
Energía	28/062018	I	R	Alimentación de 220V trifásico a 60 Hz para el motor del husillo
Señales y Control	28/06/2018	I	R	Control de posición
		C+I	D	Control de velocidad husillo
		C+I		Operación desde HMI

Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Mantenimiento	28/06/2018	I	D	Cambio de gabinete electrónico
		C	R	Reparación y mantenimiento de motores a paso
		C	D	Reparación y mantenimiento cajas reductoras
		C	D	Reparación y mantenimiento tornillos sin fin y carros de desplazamiento
Seguridad y Ergonomía	28/06/2018	C	R	Detener el sistema con el paro de emergencia
		C+I	D	Manual de usuario y documentación

Nota: Propone: C=Cliente; I=Ingeniería **R/D:** R=Requerimiento; D=Deseo

Estructura funcional

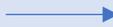
Es bastante común que cuando se realicen proyectos tecnológicos se los diseñe con una pauta modular; es decir que los productos están compuestos de partes y componentes que en lo posterior se integran en conjuntos complejos. (Riba Romeva, 2002)

Para este caso se emplearán módulos funcionales debido a que se trata de una modernización. Mas adelante en este capítulo se explicará de mejor manera la estructura de estos módulos.

Para completar la estructura funcional del sistema se emplea una simbología propuesta por la norma VDI 2222, que es descrita en la tabla 14.

Tabla 14

Simbología de la estructura modular.

Símbolo	Descripción	Representación
Función	Rectángulo de línea continua	
Flujo de material y dirección	Flecha de doble línea continua	
Flujo de energía y dirección	Flecha de línea continua	
Flujo de señal y dirección	Flecha de línea discontinua	
Sistema, subsistemas y módulos	Polígono que delimita al conjunto de funciones y flujos	

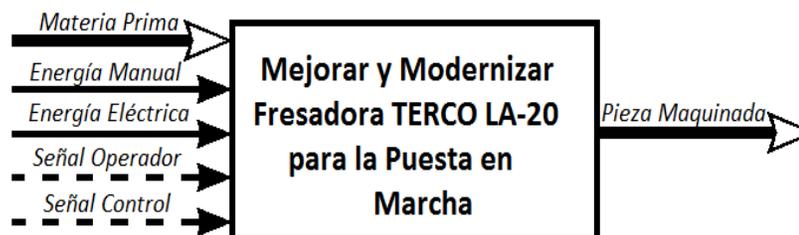
Función Global Del Sistema

Los módulos funcionales son representados por una *función global*, que da a conocer la tarea principal que debe ser realizada. Esta función global es representada como una caja negra que relaciona los flujos de entrada y los de salida.

La función principal del sistema es realizar maquinado por arranque de viruta en distintos tipos de materiales, para lo cual es necesario la materia prima, energía eléctrica, energía manual y señal del operador. De esta manera la función global será como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Función Global del Sistema o Nivel 0.



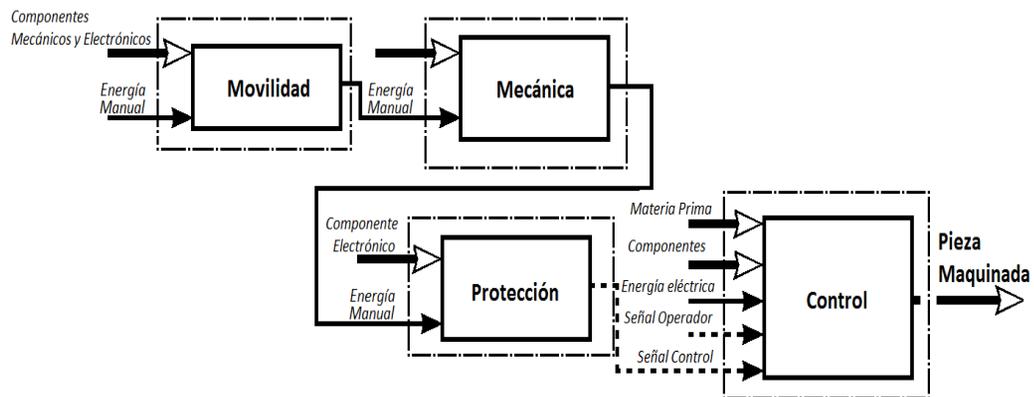
Subsistemas Funcionales Del Sistema

Para obtener una representación más precisa, se divide la función global en subfunciones, luego se establecen relaciones de flujos entre estas subfunciones.

De acuerdo al estado inicial de la máquina presentado en el capítulo 3 y a los requerimientos del cliente, los subsistemas están definidos por los módulos: Movilidad, Mecánica, Protección y Control (figura 11).

Figura 11

Subfunciones de Nivel 1.



Definición de módulos

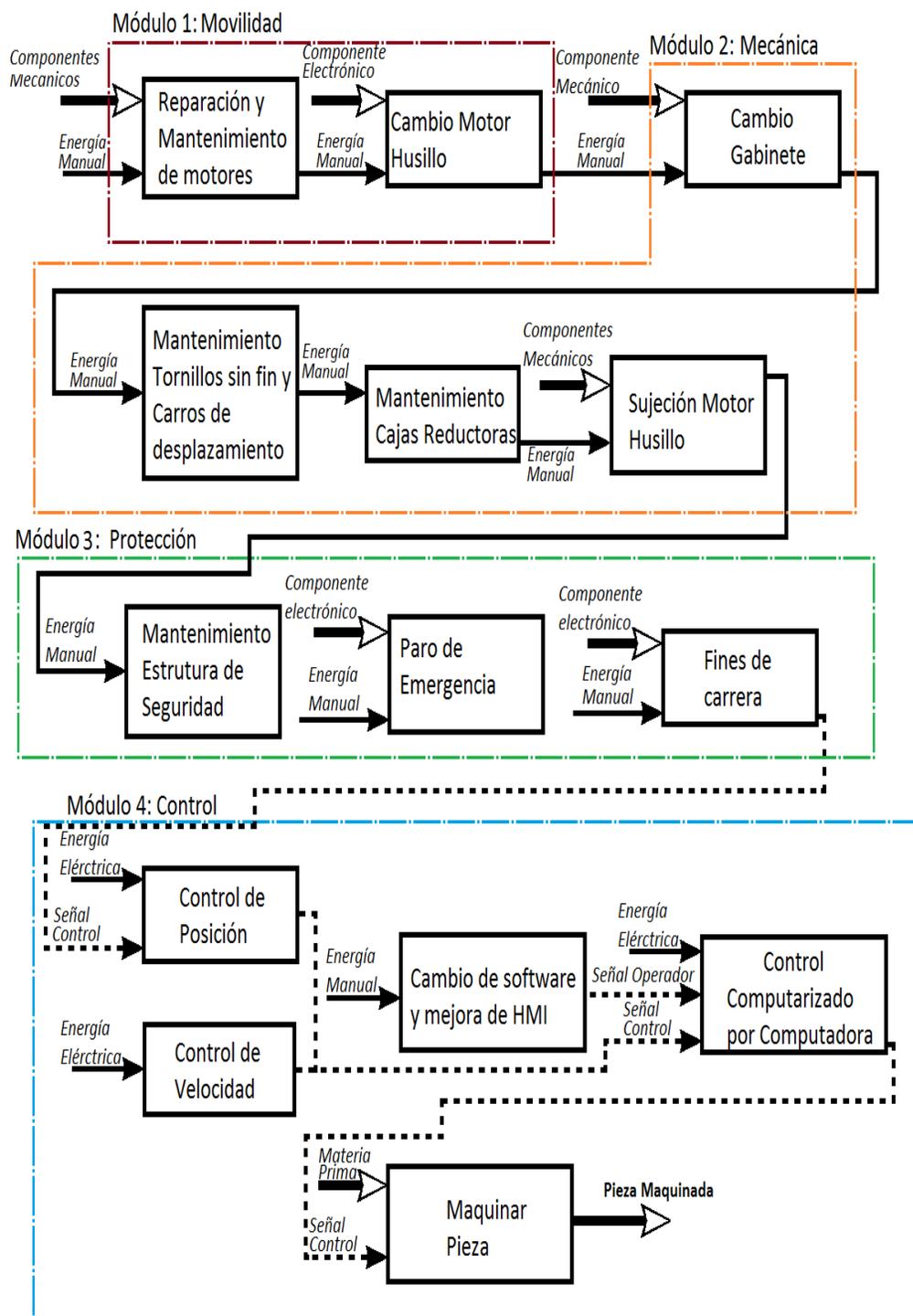
En la figura 12 se puede observar detalladamente como quedaron constituidos los módulos y los subsistemas de cada uno de ellos.

Módulo "Movilidad"

Este módulo se compone de los elementos que generan el movimiento de la fresadora, tanto lineal como rotacionalmente; es decir los motores que generan el desplazamiento de la mesa de trabajo sobre los ejes coordenados (XYZ) y el motor que hace girar la herramienta de corte.

Figura 12

Subfunciones de nivel 2.



Cambio Del Motor Del Husillo

Uno de los requerimientos del cliente es que el motor del husillo sea más potente para realizar trabajos de maquinado más robustos. En la tabla 15 se pueden observar las comparaciones de las alternativas para el cambio de motor del husillo.

Tabla 15

Ventajas y Desventajas de Alternativas para Cambio del Motor.

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Motor Paso A Paso Figura 13 <i>Motor paso a paso</i> SM86118.</p>  <p><i>Nota: obtenido de</i> <i>(Direct Industry, s.f.)</i></p>	<p>Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que transforman una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares; esto quiere decir que pueden girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Muy económico en comparación con otros sistemas de control de movimiento. • Son pequeños en comparación a motores trifásicos. • Fácil de configurar y usar. • Excelente repetibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia. • Esfuerzo de torsión cae rápidamente con la velocidad (esfuerzo de torsión es el inverso de la velocidad). • Motor se calienta mucho en configuraciones de alto rendimiento. • El motor es audible muy ruidoso a altas velocidades. • Baja potencia.

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Motor trifásico</p> <p>Figura 14</p> <p><i>Motor trifásico de 1 HP.</i></p>  <p><i>Nota: obtenido de (Feser, s.f.)</i></p>	<p>Son motores diseñados para trabajar con corriente alterna trifásica. Estos son ampliamente usados en la industria por su sencillez, robustez y fácil mantenimiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un par de giro alto y prácticamente constante. • Alta eficiencia. • Fácil conexión. • Alta durabilidad. • Alta potencia a velocidades altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Son grandes y pesados en comparación con motores paso a paso. • Su control es más complejo que el de motores a pasos. •

Módulo “Mecánica”

La máquina luego de haber pasado casi 3 años sin funcionar, requiere de mantenimiento en todos sus componentes mecánicos. Uno de los requerimientos planteados por el cliente es realizar el cambio del motor del husillo, por lo que resulta imperativo que el mismo sea sujetado de forma que no genere vibraciones al momento de su activación. En la tabla 16 se pueden observar las comparaciones de las alternativas para la sujeción del motor del husillo.

Tabla 16

Ventajas y Desventajas de Alternativas para Sujeción del Motor.

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
Sujeción horizontal Figura 15 Motor trifásico WEG.  <i>Nota: obtenido de (Eagle, s.f.)</i>	La sujeción del motor orientado de forma horizontal quiere decir que el eje del motor se encuentra de forma perpendicular al eje del husillo.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño del anclaje más sencillo. • Menor costo. • 	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión de potencia compleja. •
Sujeción vertical Figura 16 Motor Trifásico WEG con brida.  <i>Nota: obtenido de (Eagle, s.f.)</i>	La sujeción vertical implica que el eje del motor será paralelo y concéntrico al eje del husillo, para realizar esto se requiere de una brida sobre la cual se apoya el motor.	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil acople de eje motor con eje husillo. • Menos ruidoso. • 	<ul style="list-style-type: none"> • Mas costoso. •

Módulo “Protección”

En este módulo se establecen medidas para la seguridad tanto del operario como de la máquina.

Mantenimiento De Estructura Externa. Es necesario realizar el mantenimiento de la estructura de protección. Una de las acciones que se planea realizar es separar el gabinete electrónico que esta soldado a la misma, y esto impide su limpieza.

Fines De Carrera. La máquina no posee fines de carrera físicos, por lo que existe el riesgo de que se produzca una colisión entre la mesa de trabajo y la estructura de seguridad, e incluso entre la mesa y la herramienta de corte. En la tabla 17 se pueden observar las comparaciones de las alternativas para limitar el movimiento de la mesa de trabajo.

Tabla 17

Ventajas y Desventajas de Alternativas para Fines de carrera.

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
Fines de carrera Figura 17 <i>Fin de carrera.</i> 	Los interruptores de final de carrera son dispositivos electromecánicos que poseen un contacto normalmente abierto (NO), un contacto normalmente cerrado (NC) y un común (C).	<ul style="list-style-type: none"> • Son económicos (dependiendo del tipo y del tamaño). • Fácil de conectar. • Fácil de ubicar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidad de diseño.

Nota: obtenido de (Jorge, 2015)

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
Sensores Figura 18 <i>Sensor de proximidad.</i>	Los sensores de proximidad son módulos que se emplean para detectar la presencia de objetos cercanos sin necesidad de contacto físico. (Arrow, s.f.)	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen buen rango de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden llegar a ser costosos. • El tamaño puede ser un problema. • Necesitan más mantenimiento. • Pueden llegar a ser difíciles de instalar

Nota: obtenido de
 (Electrónica
 Embajadores, s.f.)

Módulo “Control”

Dentro de este módulo se encuentran las alternativas para el control de velocidad del husillo y el control general de la máquina a través de la nueva HMI.

Control De Velocidad. Como ya se mencionó antes el motor del husillo no funciona y adicionalmente a esto, con la información que se recuperó durante el análisis del estado inicial, se constató que dicho motor no está siendo controlado con el software, sino que posee una perilla para su encendido/apagado y también era usada para cambiar la velocidad del mismo entre 2 velocidades establecidas. En la tabla 18 se pueden observar las comparaciones de las alternativas para Control de Velocidad de Motor del Husillo.

Tabla 18*Ventajas y Desventajas de Alternativas para Control de Velocidad.*

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
Variador de frecuencia Figura 19 <i>Variador de frecuencia trifásico.</i>	Un variador de frecuencia es un regulador industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor.	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil instalación. • Reduce el consumo energético del motor. • Brinda protección y mayor vida útil al motor. • Eliminación de componente de accionamiento mecánico de altos precios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitación de la corriente de arranque. • Complejo solucionar averías internas. •
Control de forma mecánica Figura 20 Transmisiones de potencia por correas.	Los variadores mecánicos son capaces de modificar las velocidades al momento de ser accionados, sin alterar la del elemento motriz.	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento silencioso y sin vibración. • Rendimiento elevado 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de más mantenimiento. •



*Nota: obtenido de
(Zuendo, s.f.)*

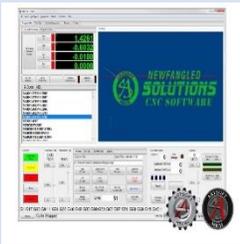


*Nota: obtenido de
(Pérez, 2006)*

Cambio De Software Y Mejora De Hmi. El software que usa la máquina es un programa licenciado, y no está configurado apropiadamente. En la tabla 19 se pueden observar las comparaciones de las alternativas para Software de Control.

Tabla 19

Ventajas y Desventajas de Alternativas para Software De Control

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Mach4 Figura 21 <i>Interfaz de Software Mach4.</i></p> 	<p>Mach4 es el predecesor de Mach3, pero casi toda su programación es nueva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es muy intuitivo y personalizable. • Puede controlar hasta 6 ejes de una máquina CNC. • Controla: fresadoras, tornos, routers, lasers, plasma etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un software licenciado y es costoso. • Solo compatible con S.O. Windows.

Nota: obtenido de (Newfangled Solutions, s.f.)

Alternativas	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Linuxcnc</p> <p>Figura 22</p> <p>Interfaz de LinuxCNC.</p>  <p><i>Nota: obtenido de (LinuxCNC, s.f.)</i></p>	<p>Previamente conocido como EMC2. Software libre para realizar el control de máquinas CNC.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es un software libre. • Controla: fresas, tornos, impresoras 3D, brazos de robot, etc. • Este software de control CNC es completamente de código abierto. • Puede controlar hasta 9 ejes de una máquina CNC 	<ul style="list-style-type: none"> • El software requiere una plataforma con capacidades de computación en tiempo real. •
<p>TurboCNC</p> <p>Figura 23</p> <p>Interfaz de TurboCNC.</p>  <p><i>Nota: obtenido de (DAK Engineering, 2005)</i></p>	<p>Este software de control de máquina proporcionado por Dak Engineering se ejecuta bajo DOS.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Controles: fresas, tornos, enrutadores, cortadoras láser, etc. • Puede controlar hasta 8 ejes de movimiento. • 	<ul style="list-style-type: none"> • No es costoso, pero para tener acceso a su código fuente y soporte gratuito se debe pagar. •

Análisis y selección de alternativas

Para la selección de alternativas se empleará el método de criterios ponderados en donde para decidir entre diversas soluciones basta conocer el orden de preferencia

de su evaluación global. Se basa en unas tablas donde cada alternativa se compara entre sí y se asignan los siguientes valores:

1: si el criterio (o solución) de las filas es superior (o mejor; $>$) que el de las columnas

0,5: si el criterio (o solución) de las filas es equivalente ($=$) al de las columnas

0: si el criterio (o solución) de las filas es inferior (o peor; $<$) que el de las Columnas

Después, para cada alternativa, se suman los valores asignados en relación a las otras alternativas, y se le añade una unidad (para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula); después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada alternativa,

Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada alternativa por el peso específico de la respectiva solución. (Riba Romeva, 2002)

Módulo "Movilidad"

Se procede a realizar el análisis para selección del motor encargado de girar el husillo de la máquina de acuerdo a lo descrito en la tabla 20. Las alternativas son:

Alternativa 1 = Motor paso a paso

Alternativa 2 = Motor Trifásico

Tabla 20

Criterios ponderados para selección de Motor.

- Evaluación del peso específico de cada criterio

Potencia>Control>Durabilidad>Costo						
Criterio	Control	Costo	Potencia	Durabilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Control		1	0	1	3	0.300
Costo	0		0	0	1	0.100
Potencia	1	1		1	4	0.400
Durabilidad	0	1	0		2	0.200
Suma					10.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Control

Alternativa 1>Alternativa 2				
Control	Alternativa 1	Alternativas 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Costo

Alternativa 1>Alternativa 2				
Costo	Alternativa 1	Alternativas 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Potencia

Alternativa 2>Alternativa 1				
Potencia	Alternativa 1	Alternativas 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1.0	0.333
Alternativa 2	1		2	0.667
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio

Durabilidad

Alternativa 2 > Alternativa 1				
Durabilidad	Alternativa 1	Alternativas 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1.0	0.333
Alternativa 2	1		2	0.667
Suma			3.0	1.000

- Resultados de la evaluación según los criterios

Solución	Control	Costo	Potencia	Durabilidad
Alternativa 1	0.667	0.667	0.333	0.333
Alternativa 2	0.333	0.333	0.667	0.667

- Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio

Conclusión	Control	Costo	Potencia	Durabilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.200	0.067	0.133	0.067	0.4667	2
Alternativa 2	0.100	0.033	0.267	0.133	0.5333	1

Mediante el análisis se llegó a la conclusión de que la mejor solución es emplear un motor trifásico para el giro de la herramienta de trabajo.

Módulo "Mecánica"

En este apartado se analiza cual es la mejor alternativa para la sujeción del motor de acuerdo a los criterios mostrados en la tabla 21. Para esto las alternativas son:

Alternativa 1 = Sujeción orientada Horizontalmente

Alternativa 2 = Sujeción orientada Verticalmente

Tabla 21

Criterios Ponderados para selección de Sujeción de motor.

- Evaluación del peso específico de cada criterio

Transmisión=Ruido>Costo					
Criterio	Costo	Transmisión	Ruido	$\sum+1$	Ponderación
Costo		0	0	1.0	0.167
Transmisión	1		0.5	2.5	0.417
Ruido	1	0.5		2.5	0.417
Suma				6.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Costo

Alternativa 1>Alternativa 2				
Costo	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Transmisión

Alternativa 2>Alternativa 1				
Transmisión	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1.0	0.333
Alternativa 2	1		2	0.667
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Ruido

Alternativa 2>Alternativa 1				
Ruido	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1.0	0.333
Alternativa 2	1		2	0.667
Suma			3.0	1.000

- Resultados de la evaluación según los criterios

Solución	Costo	Transmisión	Ruido
Alternativa 1	0.667	0.333	0.333
Alternativa 2	0.333	0.667	0.667

- Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio

Conclusión	Costo	Transmisión	Ruido	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.111	0.139	0.139	0.3889	2
Alternativa 2	0.056	0.278	0.278	0.6111	1

Una vez realizado el análisis se llegó a la conclusión de que la mejor solución es ubicar el motor verticalmente porque facilitaría la transmisión de potencia del eje del motor hacia el eje del husillo.

Módulo “Protección”

En este módulo se realizará el análisis para seleccionar la mejor alternativa en cuanto a la limitación de movimiento de la mesa de trabajo, de acuerdo a los criterios presentados en la tabla 22. Las alternativas son:

Alternativa 1 = Fines de Carrera

Alternativa 2 = Sensores de Proximidad

Tabla 22

Criterios Ponderados para selección de Control de Posición.

- Evaluación del peso específico de cada criterio

Conexión>Costo>Rango					
Criterio	Conexión	Costo	Rango	$\Sigma+1$	Ponderación
Conexión		1	1	3.0	0.500
Costo	0		1	2	0.333
Rango	0	0		1	0.167
			Suma	6.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Conexión

Alternativa 1>Alternativa 2				
Conexión	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
		Suma	3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Costo

Alternativa 1>Alternativa 2				
Costo	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
		Suma	3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Rango

Alternativa 2>Alternativa 1				
Rango	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1.0	0.333
Alternativa 2	1		2	0.667
		Suma	3.0	1.000

- Resultados de la evaluación según los criterios.

Solución	Conexión	Costo	Rango
Alternativa 1	0.667	0.667	0.333
Alternativa 2	0.333	0.333	0.667

- Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio

Conclusión	Conexión	Costo	Rango	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.333	0.222	0.056	0.6111	1
Alternativa 2	0.167	0.111	0.111	0.3889	2

La mejor solución para realizar el control de posición de la mesa de trabajo son los fines de carrera, por la simplicidad de su conexión y debido a que es conveniente para su integración con la máquina.

Módulo "Control"

Dentro de este módulo inicialmente se seleccionará la mejor alternativa para realizar el control de velocidad del husillo, de acuerdo a los criterios presentados en la tabla 23. Las alternativas son:

Alternativa 1 = Variador de Frecuencia

Alternativa 2 = Control De Forma Mecánica

Tabla 23

Criterios Ponderados para Selección de Control de Velocidad.

- Evaluación del peso específico de cada criterio

Costo=Ahorro Energético>Instalación>Mantenimiento						
Criterio	Costo	Mantenimiento	Instalación	Ahorro Energético	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	1	0.5	3.5	0.350
Mantenimiento	0		0	0	1.0	0.100
Instalación	0	1		0	2.0	0.200
Ahorro Energético	0.5	1	1		3.5	0.350
Suma					10.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Costo

Alternativa 1>Alternativa 2				
Costo	Alternativa 1	Alternativas 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
Suma			3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Mantenimiento

Alternativa 1>Alternativa 2				
Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
		Suma	3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Instalación

Alternativa 1>Alternativa 2				
Instalación	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
		Suma	3.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Ahorro Energético

Alternativa 1>Alternativa 2				
Ahorro Energético	Alternativa 1	Alternativas 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2.0	0.667
Alternativa 2	0		1	0.333
		Suma	3.0	1.000

- Resultados de la evaluación según los criterios.

Solución	Costo	Mantenimiento	Instalación	Ahorro Energético
Alternativa 1	0.667	0.667	0.667	0.667
Alternativa 2	0.333	0.333	0.333	0.333

- Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio

Conclusión	Costo	Mantenimiento	Instalación	Ahorro Energético	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.233	0.067	0.133	0.233	0.6667	1
Alternativa 2	0.117	0.033	0.067	0.117	0.3333	2

El análisis concluyo que la solución para controlar la velocidad de velocidad del husillo es el variador de frecuencia, debido a que de esta forma todo el sistema será controlado por la computadora.

Selección Para El Software. Dentro de este módulo también es necesario realizar la selección de la mejor alternativa en cuanto al software para controlar la CNC; es decir la selección del Software que se encarga de comunicar los motores de la máquina con la computadora, para lo cual los criterios empleados se presentan en la tabla 24. Las alternativas son:

Alternativa 1 = Mach4

Alternativa 2 = LinuxCNC

Alternativa 3 = TurboCNC

Tabla 24

Criterios Ponderados para Selección de Software de Control.

- Evaluación del peso específico de cada criterio

Interactividad=Costo>Robustez>Instalación						
Criterio	Costo	Robustez	Instalación	Interactividad	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	1	0.5	3.5	0.350
Robustez	0		1	0	2.0	0.200
Instalación	0	0		0	1.0	0.100
Interactividad	0.5	1	1		3.5	0.350
				Suma	10.0	1.000

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Costo

Alternativa 2>Alternativa 1=Alternativa 3					
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	1.5	0.25
Alternativa 2	1		1	3.0	0.5
Alternativa 3	0.5	0		1.5	0.25
Suma				6.0	1

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Robustez

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
Robustez	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3.0	0.5
Alternativa 2	0		1	2.0	0.3333
Alternativa 3	0	0		1.0	0.1667
Suma				6.0	1

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Instalación

Alternativa 1>Alternativa 3>Alternativa 2					
Instalación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3.000	0.5
Alternativa 2	0		0.0	1.000	0.1667
Alternativa 3	0	1		2.000	0.3333
Suma				6.000	1

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-Criterio Interactividad

Alternativa 2>Alternativa 1>Alternativa3					
Interactividad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	2.0	0.3333
Alternativa 2	1		1	3.0	0.5
Alternativa 3	0	0		1.0	0.1667
			Suma	6.0	1

- Resultados de la evaluación según los criterios.

Solución	Costo	Robustez	Instalación	Interactividad
Alternativa 1	0.250	0.500	0.500	0.333
Alternativa 2	0.500	0.333	0.167	0.500
Alternativa 3	0.250	0.167	0.333	0.167

- Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio

Conclusión	Costo	Robustez	Instalación	Interactividad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.088	0.100	0.050	0.117	0.3542	2
Alternativa 2	0.175	0.067	0.017	0.175	0.4333	1
Alternativa 3	0.088	0.033	0.033	0.058	0.2125	3

Después de analizar 3 opciones se llegó a la conclusión de emplear el programa

LinuxCNC, que es un software libre, por el que no es necesario pagar licencia, y adicionalmente es lo suficientemente robusto para ser empleado en el laboratorio.

Definición del rediseño

En la tabla 25 se presenta un resumen de todas las alternativas elegidas para la resolver los problemas planteados en cada módulo.

Tabla 25

Soluciones seleccionadas.

#	Necesidad	Solución
1	Maquinado más robusto (Cambio de motor)	Motor Trifásico

#	Necesidad	Solución
2	Orientación del Motor (Sujeción del motor)	Sujeción Orientada Verticalmente
3	Seguridad y control de posición	Fines de Carrera
4	Control de Velocidad (Motor del Husillo)	Variador de Frecuencia
5	Cambio de Software	LinuxCNC

Módulo “movilidad”

Es necesario realizar un mantenimiento y reparación de los motores a pasos que son empleados para generar el movimiento lineal de la máquina. En general dos de los tres motores se encontraban en buen estado, pero el motor del eje Y, no funcionaba debido a que los cables del mismo se habían deteriorado y no se comunicaba de forma correcta con el driver.

De requerirlo, el motor será reemplazo por uno de la misma marca y modelo, para mantener las mismas características de los otros motores que ya posee la máquina (figura 24).

Figura 24

Motor a pasos de 8 cables marca Probotix.



Nota: obtenido de <https://www.probotix.com/CNC-CONTROL-SYSTEMS/STEPPER-MOTORS/HT23-280-8>

Dentro de este módulo también se realizó el cambio del motor del husillo por un motor Trifásico WEG, para el giro de la herramienta de corte; de acuerdo al requerimiento este motor debe ser de mayor potencia.

Para determinar que potencia es la apropiada para el nuevo motor, se emplea la ecuación 8.

$$P_c = \frac{a_e \cdot A_p \cdot V_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} \quad (8)$$

Donde:

P_c : Potencia Neta (KW)

a_e : Profundidad de corte radial (mm)

A_p : Profundidad de corte axial (mm)

V_f : Avance de mesa (mm/min)

k_c : Fuerza de corte específica (N/mm)

Para determinar el avance se empleó la ecuación 1, la ecuación 2 y las tablas 5 y 6.

De (1) se despeja n

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_{cap}}$$

$$n = \frac{75 \cdot 1000}{\pi \cdot 16}$$

$$n = 1492.078 \approx 1492 \text{ RPM}$$

Se reemplaza en (2)

$$V_f = n \cdot f_z \cdot Z_c$$

$$V_f = 1492 \cdot 0.12 \cdot 4$$

$$V_f = 716.2 \text{ mm/min}$$

Se emplea una profundidad de corte axial (A_p) de 1 mm, y una profundidad de corte radial (a_e) de 16 mm, que es el valor de diámetro máximo que se puede colocar en la porta pinzas. Todos los datos obtenidos se reemplazan en (8).

$$P_c = \frac{a_e \cdot A_p \cdot V_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6}$$

$$P_c = \frac{16 \cdot 1 \cdot 716 \cdot 2200}{60 \cdot 10^6}$$

$$P_c = 0.42 \text{ KW} \approx 0.6 \text{ HP}$$

Con el resultado obtenido de P_c se decidió que el nuevo motor a instalar sería de 1 HP (ver figura 25), debido a que es un valor de potencia que se encuentra fácilmente en el mercado y adicionalmente el costo de un motor de estas características está dentro del presupuesto planteado para la realización del proyecto.

Una vez determinada la potencia que tendrá el motor trifásico se realiza el cálculo de los parámetros que se deben tomar en cuenta para la protección eléctrica.

Para lo cual el motor posee las siguientes características:

Potencia de salida: 1HP (075 kW)

Voltaje de operación: 220 V

$$I_N = \frac{H \cdot 0.746}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta \cdot FP} \quad (9)$$

Donde:

I_N : Corriente nominal (A)

H : Potencia de salida (HP)

V : Voltaje (kV)

η : Eficiencia

FP : Factor de potencia

Empleando la ecuación (3), se obtiene el valor de la corriente nominal del motor.

$$I_N = \frac{1 \cdot 0.746}{\sqrt{3} \cdot 0.220 \cdot 0.77 \cdot 0.8}$$

$$I_N = 3.178 \text{ A}$$

Figura 25

Motor WEG trifásico de 220 de 1HP.



Por el valor que se obtuvo, se decidió mantener el disyuntor y el contactor (figura 26) que eran usados anteriormente, debido a que cumplen con estos parámetros y se encontraron en buen estado.

Figura 26

Breaker y contactor de 10 A.



Nota: Balseca D. & Mora E. (2015). Diseño e Implementación de un Sistema Didáctico CNC para la Determinación de Parámetros de Corte en Procesos de Mecanizado con El Taladro/Fresador TERCO LA-20 del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, pag 71.

Se hará uso de un eje para transmitir el movimiento del motor trifásico al husillo (herramienta de corte). El eje será fabricado en acero SAE 1020, por su facilidad para el maquinado y se empleará un factor de seguridad (n_f) de 2.

Primero se calculará el torque que será transmitido desde el eje del motor hacia el eje del husillo.

$$H = T \cdot \omega \quad (10)$$

Donde:

H : Potencia del motor (W)

T : Par de torsión (N · m)

ω : Velocidad de giro (rad/s)

Despejando T de (10),

$$T = \frac{H}{\omega}$$

$$T = \frac{746 \text{ W}}{178.024 \text{ rad/s}}$$

$$T = T_m = 4.1905 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Debido a que el eje en cuestión será sometido a torsión constante, $M_m = T_a = 0$ y dado que el eje no será sometido a ningún otro tipo de carga, $M_a = 0$.

Empleando criterio de ED-Goodman se tiene:

$$d = \left(\frac{16 \cdot n_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f \cdot M_a)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f \cdot M_m)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Inicialmente se asumirán valores de concentradores de esfuerzos de acuerdo a lo indicado en el anexo C5. Para una primera estimación de dirá que $K_{fs} = K_{ts} = 2.2$.

Reemplazando los datos en (11)

$$d = \left(\frac{16 \cdot n_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_{ut}} \left[3(K_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$d = \left(\frac{16 \cdot 2}{\pi} \left\{ \frac{1}{470 \cdot 10^6} \left[3(2.2 \cdot 4.19)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$d = 7.0205 \cdot 10^{-5} \text{ m} \approx 7.02 \text{ mm}$$

Después de realizar el cálculo del diámetro, se decidió emplear un eje de diámetro 38.1 mm (1½"), debido a que el eje del motor tiene un diámetro de 19 mm y el diámetro del eje del husillo es 20 mm, adicionalmente se emplearán acoples directos (Lovejoy) tipo L075, para unir el eje diseñado con los ejes del motor y del husillo. El eje será escalonado para la colocación de los acoples por lo que $D = 38.1 \text{ mm}$, $d = 22 \text{ mm}$ y se empleará un filete de hombro agudo $r/d = 0.02$.

El límite de resistencia a la fatiga se obtiene de:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot 0.5 \cdot S_{ut} \quad (12)$$

Donde:

k_a : Factor por la condición superficial

k_b : Factor por el tamaño

k_c : Factor por la carga

k_d : Factor de temperatura

k_e : Factor de confiabilidad

k_f : Factor efectos varios

S_e : Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso

En el anexo C se encuentra la información empleada para determinar cada uno de los factores de la ecuación (12).

$$S_e = 0.883 \cdot 0.892 \cdot 0.59 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.5 \cdot 470$$

$$S_e = 109.206 \text{ MPa}$$

Finalmente se realizó el cálculo del esfuerzo máximo producido en el eje y se comparó con los límites de resistencia del material; para realizar este procedimiento se recalcularon los concentradores de esfuerzos con la medida de los diámetros mencionados anteriormente y las gráficas presentadas en el anexo C8.

$$K_{fs} = 1 + q(K_{ts} - 1) \quad (13)$$

$$K_{fs} = 1 + 0.7(2.4 - 1)$$

$$K_{fs} = 1.98$$

$$\tau_m = \frac{16 \cdot K_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \quad (14)$$

$$\sigma_{max} = \sigma'_m = \sqrt{3 \cdot \tau_m^2} \quad (15)$$

Donde:

K_{fs} : Concentrador de esfuerzos

d : Diametro (mm)

T_m : Torque (N · m)

τ_m : Esfuerzo cortante medio (Pa)

$$\sigma_{max} = \sqrt{3 \cdot \left(\frac{16 \cdot K_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2}$$

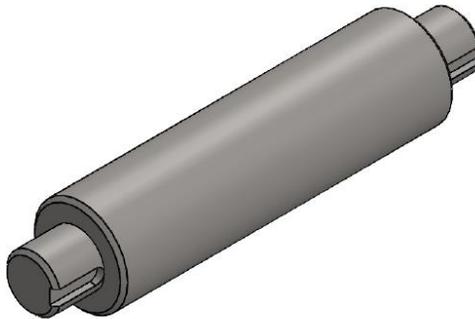
$$\sigma_{max} = \sqrt{3 \cdot \left(\frac{16 \cdot 1.98 \cdot 4.19}{\pi \cdot (0.022)^3} \right)^2}$$

$$\sigma_{max} = 6872929.8 \text{ Pa} \approx 6.87 \text{ MPa}$$

Debido a que el esfuerzo máximo en el eje es sumamente inferior al valor de resistencia a la tensión (470 MPa) y al límite de fatiga (109.20 MPa), se decidió fabricarlo con el material y los diámetros antes mencionados. En la figura 27 se puede observar el eje, y para más detalles remitirse al anexo A.

Figura 27

Eje de transmisión de movimiento Motor-Husillo.



Módulo “Mecánica”

Es necesario reemplazar el gabinete electrónico debido a que el que ya posee la máquina resulta muy pequeño para los componentes electrónicos ya existentes dentro del mismo, y para los que deben ser añadidos. Las dimensiones del nuevo gabinete son $40 \times 40 \times 25 \text{ mm}$.

Se realizará el mantenimiento a todo el sistema mecánico de desplazamiento que está conformado por un carro transversal, un carro vertical y la mesa de trabajo (carro longitudinal), y cada uno de ellos con su respectivo tornillo sin fin.

También es necesario realizar mantenimiento a las cajas reductoras que se encargan de transmitir la rotación de los motores a pasos, y por medio de un sistema “Tornillo Sin Fin–Corona” se aumenta el par para generar el movimiento de la mesa.

Módulo “Protección”

La estructura de seguridad necesitaba de unas pequeñas reparaciones, como lo son, las bisagras de una de las puertas de seguridad que permiten acceder a manipular la máquina.

La máquina posee un botón de paro de emergencia, pero no realiza ninguna acción, por lo que se asume que anteriormente el botón solo estaba conectado con el software de control. Para mejorar el funcionamiento del mismo, será empleado para detener tanto el software de control como la alimentación del sistema electrónico.

Se decidió que la mejor opción para evitar que se generen colisiones son los fines de carrera. Estos serán sujetados con pernos directamente sobre los carros de la mesa de trabajo.

Módulo “Control”

Es necesario saber la posición en la que se encuentra la máquina antes de empezar a realizar cualquier trabajo, es por eso que con la ayuda de los fines de carrera se realizará el control de posición de la mesa de trabajo, para de esta forma ubicarla en un punto conocido como “cero de máquina”.

Para realizar el control de velocidad del husillo se empleará un Variador WEG CFW 100 Mini Drive, que por su tamaño es ideal para la máquina (figura 28). Adicional al variador se empleó un módulo de expansión de I/O (CFW100-IOAR) que permite controlar la variación de velocidad con una señal analógica. Debido a que dicha señal deber ser de $0-10 V_{DC}$, se empleó el circuito mostrado en la figura 29 para acondicionar dicha señal.

Figura 28

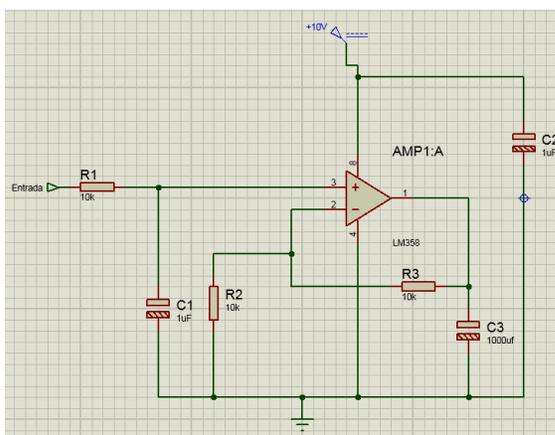
Variador de frecuencia WEG CFW 100.



Nota: obtenido de https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Automatizaci%C3%B3n-Industrial/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/Mini-y-Micro-Drives/Convertidores-de-Frecuencia-CFW100/CFW100-Mini-Drive/p/MKT_WDC_BRAZIL_FREQUENCY_INVERTER_MINI_DRIVE_CFW100

Figura 29

Simulación de circuito de acondicionamiento de la señal.



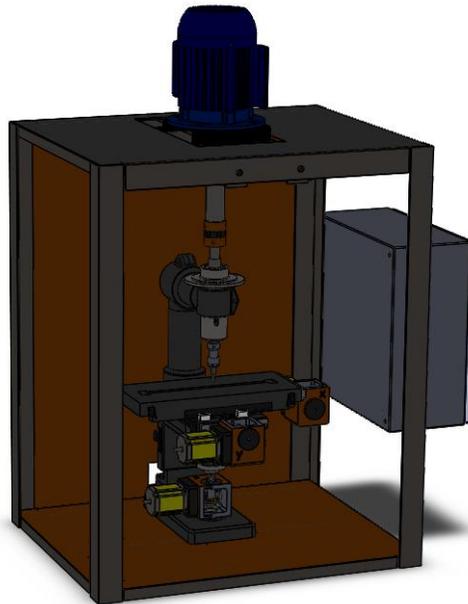
Para realizar el control de la fresadora CNC, se empleará el software LinuxCNC, que será instalado sobre sistema operativo Ubuntu, el software es capaz de controlar una gran variedad de máquinas como Tornos, Impresoras 3D, Cortadoras Laser, Brazos Robóticos y más.

El software controla la máquina por medio de un puerto paralelo estándar, que básicamente envía las señales paso y dirección, a los motores (drivers) que dan movimiento a la mesa.

El software requiere de una pantalla de al menos 800x600 de resolución para que todos los elementos de la HMI sean visibles.

Figura 30

Ubicación de nuevos componentes de la máquina.



Resumen

En este capítulo se presentan los requerimientos del usuario, y posteriormente estos son transcritos como especificaciones técnicas que la máquina debe tener para cumplir con su modernización.

Luego se subdivide el sistema global en módulos, estos a su vez en subfunciones y se analizan individualmente para plantear alternativas que den solución

a cada uno de los módulos. Las alternativas seleccionadas también deben permitir una integración entre todos los módulos.

También se realiza el análisis global de todo el sistema, para luego dividirlo en módulos y subfunciones. Dichos módulos componen todos los sistemas que al trabajar en conjunto finalmente desencadena en el maquinado de piezas de diferente material. En la figura 30 se presenta una imagen de cómo se van a ubicar todos los elementos que necesita la máquina, y se puede observar cómo lucirá la máquina luego del que se complete la modernización.

Capítulo V

Implementación, pruebas y análisis de resultados

Luego de haber seleccionado las mejores alternativas para los módulos, se procederá a la fabricación de las partes que sean requeridas, y a la implementación de las mismas, así como de las partes que necesitan ser modificadas. También se realizarán pruebas para comprobar el funcionamiento de todos los módulos y de todo el sistema en general, y finalmente se realizarán, pruebas de maquinado para comprobar la precisión del maquinado.

Implementación

Aquí se explicará cuál fue el proceso para poner en marcha la Fresadora CNC TERCO LA-20, desde el inicio con su desmantelamiento, que fue necesario tanto para el mantenimiento como para incorporar los nuevos componentes.

Desmantelamiento De Toda La Máquina

La primera acción que se realizó fue retirar la fresadora de la estructura, luego se cortó el gabinete de la estructura debido a que había sido soldado a la misma.

Posteriormente se procedió a desarmar la estructura de protección que poseía partes emperradas como se muestra en la figura 31.

Figura 31

Desmantelamiento de la fresadora.



Maquinado De La Mesa De Trabajo

Debido a que los fines de carrera iban a ser sujetados por medio de pernos, fue necesario maquinar tanto la mesa, carro transversal y el carro vertical la fresadora. Observar la figura 32, donde se muestra el trabajo de roscado que se realizó en las partes.

Figura 32

Maquinado de la mesa de trabajo.



Se realizo el diseño de unos elementos que ayudaran a activar los fines de carrera cuando la mesa cumpla su recorrido. En la figura 32 se observa el diseño en un software CAD y en el anexo A7 se puede observar mayor detalle de los mismos. Por facilidad se optó por hacer impresiones 3D de los activadores (ver figura 33).

Figura 33

Diseño de activadores para los fines de carrera.



Desmantelamiento De Motor Del Husillo

Uno de los requerimientos era cambiar el motor del husillo, y para hacerlo era necesario retirar el motor que vino con la fresadora cuando esta fue adquirida por la Universidad, como se muestra en la figura 34. Para aprovechar la sujeción que brinda el puente de la fresadora al husillo de la misma se decidió retirar el rotor del motor antiguo.

Figura 34

Desensamble de motor de 0.25 HP.



Estructura Base

Se decidió que por su peso el nuevo motor debía ser apoyado sobre la estructura de protección, para lo cual se colocaron 2 ángulos de 2"x2"x1/4" y 57 cm de

longitud, como se ve en la figura 35m, se maquinó la estructura de protección para poder empernar la estructura base a la misma.

Figura 35

Materiales para la estructura base.



Base Para Brida

Tomando en cuenta que la estructura de protección iba ser sometida a una buena cantidad de vibraciones se decidió diseñar una base sobre la cual se apoyaría la brida del motor como se muestra en la figura 36, de esta forma esta base absorberá cierta cantidad de vibraciones.

Figura 36

Maquinado de la base para la brida del motor.



Cambio de gabinete

Debido a que se contemplaba hacer un mantenimiento general se notó que el gabinete anterior estaba muy pequeño para todos los elementos empleados, por lo que se procedió a cambiar de gabinete con unos más grande de 40x40x20 cm como se ve en la figura 37.

Figura 37

Instalación de electrónica en el nuevo gabinete.



Instalación De Nuevo Software

Debido a que la maquina era controlada con un software que funciona bajo el sistema operativo Windows, fue necesario instalar Ubuntu y posteriormente realizar la instalación del software LinuxCNC como se aprecia en la figura 38.

Figura 38

Instalación del sistema operativo y del software LinuxCNC.



Conexión De Fines De Carrera

Una vez colocado los fines de carrera, con la ayuda de los activadores se procedió a calibrar los fines de carrera para evitar colisiones de la mesa de trabajo dentro de la estructura de protección.

Conexión De Nuevo Motor Con Variador De Frecuencia

Una vez montado el nuevo motor sobre la máquina se lo conecto con el variador de frecuencia WEG CFW 100 (figura 39) para configurar este último, y posteriormente se conectó con la tarjeta Probotix PBX-2 para realizar el control de velocidad desde el software LinuxCNC.

Figura 39

Conexión de Variador de frecuencia CFW 100.



Acoplamiento Motor/Husillo

El motor se encuentra ubicado a una altura de aproximadamente 20 cm del husillo, por lo que para realizar el acople directo (relación de transmisión 1:1) entre los 2 se optó por emplear acoples Lovejoy o matrimonios, y un eje de acero AISI 1018 (ver figura 40).

Figura 40

Eje, chavetas y 2 juegos de Lovejoy.



Instalación De Motor Trifásico

Una vez terminados tanto la base de la brida, como la estructura base, se procedió a realizar el montaje del motor trifásico de 220V y 1 HP como se muestra en la figura 42, seguido de esto se realizó la corrección de la desviación entre el eje del motor y el eje del husillo con la ayuda de un reloj comparador (ver figura 41).

Figura 41

Corrección de la desviación del eje.



Ya que se tuvo que reemplazar el motor del husillo, para la ubicación del nuevo motor se hizo uso de la norma NEC 430 inciso 14, que dice que los motores eléctricos deben ser ubicados en lugares abiertos.

Figura 42

Instalación del motor trifásico a la estructura de protección.



Paro De Emergencia

El paro de emergencia no estaba funcionando correctamente, por lo que se corrigió este inconveniente, y adicionalmente se cambió el funcionamiento del mismo, debido a que anteriormente solo detenía el movimiento del husillo, y ahora se encarga de parar todo el sistema.

Pruebas y análisis de resultados

Para verificar el desempeño final de la máquina se realizaron las pruebas de funcionamiento de acuerdo a lo establecido en el trabajo de investigación realizado anteriormente sobre la misma máquina, y también en base al libro Administración de Operaciones: Procesos y cadenas de valor de Krajewski, Malhotra & Ritzman.

En la figura 43 se observan las probetas de las cuales se realizaron las mediciones respectivas, estas fueron hechas sobre MDF por facilidad de maquinado.

Figura 43

Probetas para control estadístico de procesos.



Pruebas De Funcionamiento

Para operar la máquina fresadora CNC TERCO LA-20, se debe seguir el proceso detallado en el anexo C16. Posteriormente todo el manejo de la máquina se

realiza por medio de la computadora que se encarga de controlar todo el proceso de acuerdo a lo explicado en el anexo C6.

Control Estadístico De Procesos Para El Eje X

Los datos para realizar el control estadístico se presentan en la tabla 26. Se realizaron 4 probetas con 12 ranuras cada una, de las cuales se procede a medir la distancia de desplazamiento en X de todas las muescas.

Tabla 26

Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.

	P_1	P_2	P_3	P_4	\bar{x}	R
1	20.90	20.89	21.06	21.06	20.9775	0.1700
2	20.86	20.84	20.95	20.95	20.9000	0.1100
3	20.95	20.88	20.98	21.03	20.9600	0.1500
4	20.97	20.91	20.89	20.89	20.9150	0.0800
5	20.93	20.95	20.89	20.93	20.9250	0.0600
6	20.92	20.90	21.00	20.94	20.9400	0.1000
7	20.92	20.86	21.00	20.96	20.9350	0.1400
8	20.92	20.91	21.03	20.87	20.9325	0.1600
9	20.97	20.93	20.81	20.93	20.9100	0.1600
10	20.95	20.89	20.80	20.88	20.8800	0.1500
11	20.93	20.91	20.90	20.85	20.8975	0.0800
12	20.99	20.92	20.95	20.94	20.9500	0.0700
Promedio					$\bar{\bar{x}} = 20.9269$	$\bar{R} = 0.1192$

Nota: $\bar{x} = x$ barra; $\bar{R} = R$ barra; $\bar{\bar{x}} = x$ doble barra.

Haciendo uso de los datos presentados en el anexo D4 y resumidos en la tabla 27 se obtienen las constantes para calcular los límites de las gráficas.

Tabla 27

Constantes para calcular gráficos \bar{x} y R.

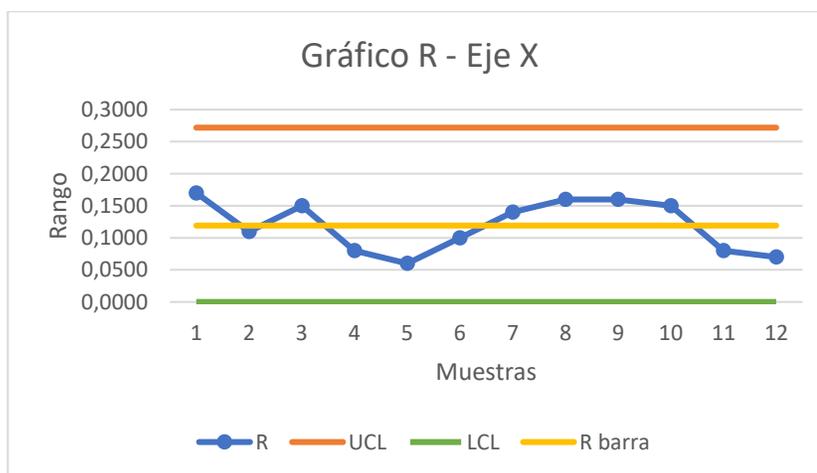
n	A_2	D_3	D_4
4	0.72	0	2.28
9		2	

Con los datos tabulados y una vez que se calcularon los valores de \bar{x} y \bar{R} , empleando las ecuaciones (4), (5), (6) y (7); y usando los factores de la tabla 27 se calculan los límites UCL_R , LCL_R , $UCL_{\bar{x}}$, $LCL_{\bar{x}}$.

Con los límites establecidos se procede a trazar las gráficas de control R y \bar{x} .

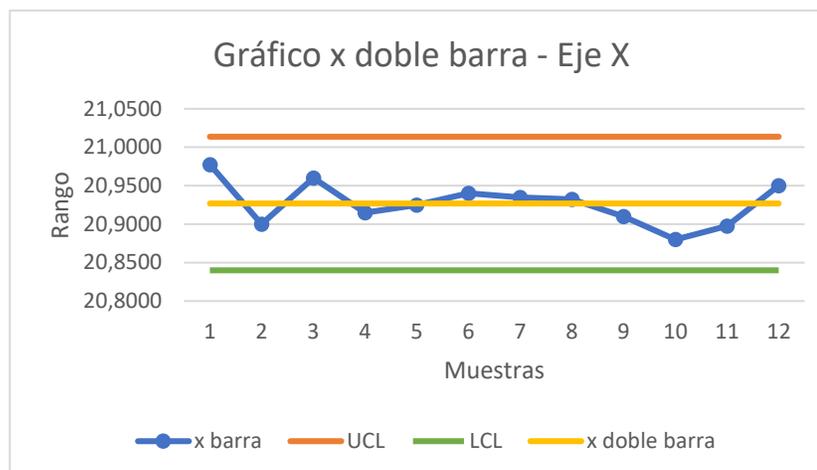
Figura 44

Gráfica de control R eje X.



Como se observa en la figura 44 los valores de rango se encuentran dentro de los límites calculados, lo que demuestra que la variabilidad del proceso está bajo control.

Figura 45

Gráfica de control \bar{x} .

En la figura 45 se observan las muestras de \bar{x} , dentro de los límites, por lo que se concluye que el recorrido en X de la mesa de trabajo cumple los requerimientos de precisión, y se encuentran dentro los límites las tolerancias permitidas.

Control Estadístico De Procesos Para El Eje Y

Al igual que para el eje X, se mide la distancia de desplazamiento en Y de todas las muescas. Los datos para realizar el control estadístico se presentan en la tabla 28.

Tabla 28

Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.

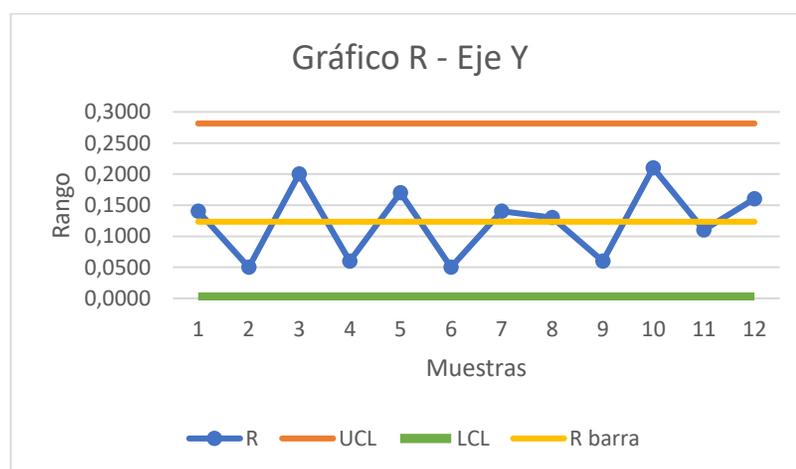
	P_1	P_2	P_3	P_4	\bar{y}	R
1	8.88	8.97	9.02	9.00	8.9675	0.1400
2	8.95	8.90	8.95	8.90	8.9250	0.0500
3	9.09	8.89	8.95	8.92	8.9625	0.2000
4	8.96	8.93	8.93	8.90	8.9300	0.0600
5	9.10	8.94	8.97	8.93	8.9850	0.1700
6	9.07	9.02	9.06	9.04	9.0475	0.0500
7	9.02	8.96	9.10	9.04	9.0300	0.1400

	P_1	P_2	P_3	P_4	\bar{y}	R
8	8.99	9.04	9.12	9.03	9.0450	0.1300
9	8.94	8.91	8.88	8.93	8.9150	0.0600
10	9.03	9.04	8.89	8.83	8.9475	0.2100
11	8.96	8.88	8.88	8.85	8.8925	0.1100
12	9.11	8.95	9.00	8.97	9.0075	0.1600
Promedio					$\bar{\bar{y}} = 8.9713$	$\bar{R} = 0.1233$

Se realiza el mismo procedimiento que se hizo para el eje X. Con los datos tabulados y los factores de la tabla 27 se obtienen los límites de las gráficas de control.

Figura 46

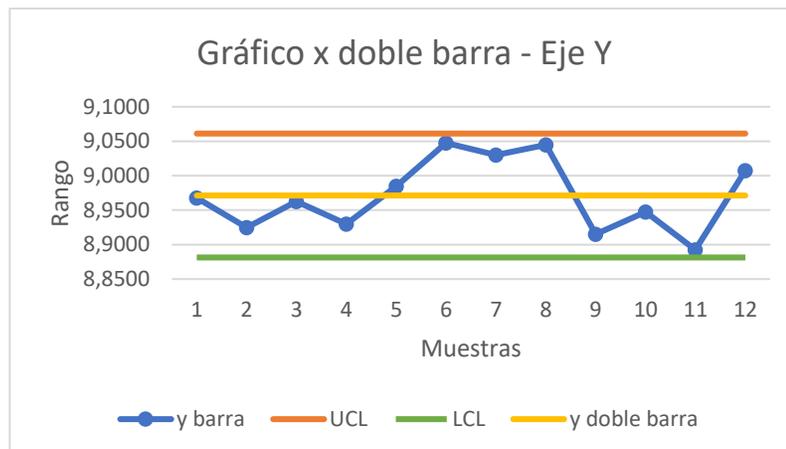
Gráfica de control R eje Y.



Como se observa en la figura 46 los valores de rango se encuentran dentro de los límites calculados, lo que demuestra que la variabilidad del proceso está bajo control.

Figura 47

Gráfica de control \bar{y} .



En la figura 47 se observan las muestras de \bar{y} , dentro de los límites, por lo que se concluye que el recorrido en X de la mesa de trabajo cumple los requerimientos de precisión.

Control Estadístico De Procesos Para El Eje Z

Se repite el procedimiento anterior con los datos de la tabla 29.

Tabla 29

Datos tabulados de mediciones de ranuras en probetas.

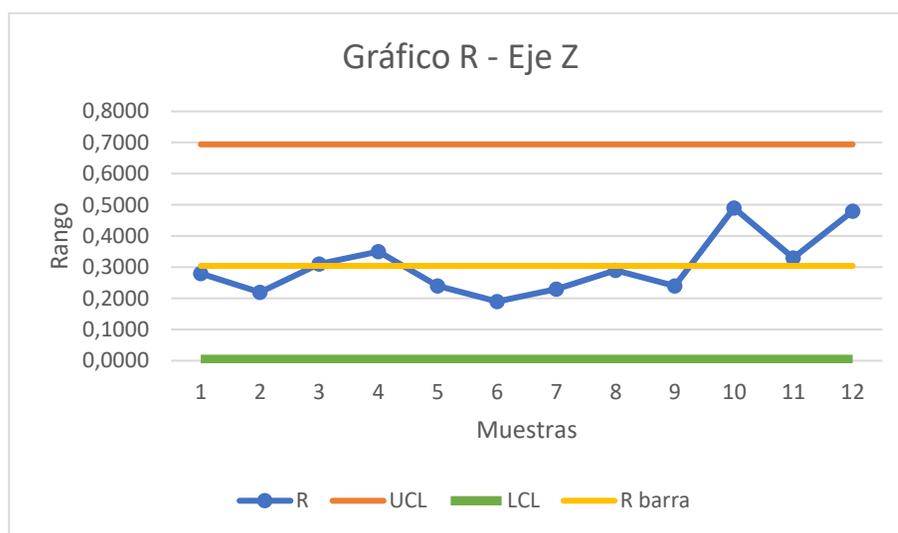
	P_1	P_2	P_3	P_4	\bar{z}	R
1	3.82	3.64	3.71	3.92	3.7725	0.2800
2	4.01	3.8	3.79	3.99	3.8975	0.2200
3	3.76	4.07	4.03	4.05	3.9775	0.3100
4	3.7	3.86	4.02	4.05	3.9075	0.3500
5	4.19	3.95	4.12	4.16	4.1050	0.2400
6	3.94	4.13	4.09	3.99	4.0375	0.1900
7	4.16	4.28	4.05	4.11	4.1500	0.2300
8	3.83	4.12	3.96	3.96	3.9675	0.2900
9	4.16	3.98	4.02	3.92	4.0200	0.2400

	P_1	P_2	P_3	P_4	\bar{z}	R
10	3.78	3.67	4	4.16	3.9025	0.4900
11	3.68	3.81	3.83	4.01	3.8325	0.3300
12	3.65	3.86	3.96	4.13	3.9000	0.4800
Promedio					$\bar{\bar{z}} = 3.9558$	\bar{R} = 0.3042

Se realiza el mismo procedimiento que se hizo para el eje Y. Con los datos tabulados y los factores de la tabla 27 se obtienen los límites de las gráficas de control.

Figura 48

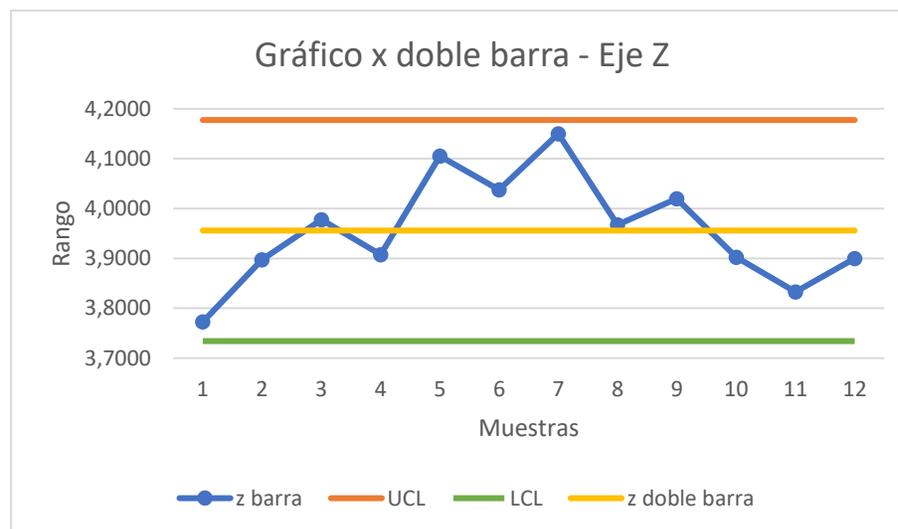
Gráfica de control R eje Z.



Como se observa en la figura 48 los valores de rango se encuentran dentro de los límites calculados, lo que demuestra que la variabilidad del proceso está bajo control.

Figura 49

Gráfica de control \bar{x} .



En la figura 49 se observan las muestras de \bar{x} , dentro de los límites, por lo que se concluye que el recorrido en X de la mesa de trabajo cumple los requerimientos de precisión, y se encuentran dentro los límites las tolerancias permitidas.

Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje X

Tomando en cuenta que la velocidad máxima de avance en X es 60 mm/min, en la tabla 30 se muestran los datos obtenidos para pruebas manuales sobre eje X.

Tabla 30

Prueba de velocidad de avance en X.

Velocidad Nominal (mm/min)	Tol. (mm/min)	Dist. (mm)	Tiempo (s)	Velocidad Calculada (mm/min)	Velocidad Promedio (mm/min)	Error	Resultado
24	0.24	50	125.51	23.90	23.90	0.10	Ok
		40	100.45	23.89			
		30	75.28	23.91			

Velocidad Nominal (mm/min)	Tol. (mm/min)	Dist. (mm)	Tiempo (s)	Velocidad Calculada (mm/min)	Velocidad Promedio (mm/min)	Error	Resultado
48	0.48	50	62.18	48.25	47.66	0.34	Ok
		40	50.46	47.56			
		30	38.16	47.17			
60	0.6	50	49.83	60.20	60.35	0.35	Ok
		40	39.81	60.29			
		30	29.72	60.57			

Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje Y

Al igual que para el eje Y la velocidad máxima de avance en X es 60 mm/min, en la tabla 31 se muestran los datos obtenidos para pruebas manuales sobre Y.

Tabla 31

Prueba de velocidad de avance en Y.

Velocidad Nominal (mm/min)	Tol. (mm/min)	Dist. (mm)	Tiempo (s)	Velocidad Calculada (mm/min)	Velocidad Promedio (mm/min)	Error	Resultado
24	0.24	50	125.44	23.92	23.90	0.10	ok
		40	100.41	23.90			
		30	75.37	23.88			
48	0.48	50	62.93	47.67	47.70	0.30	ok
		40	50.04	47.96			
		30	37.92	47.47			
60	0.6	50	49.38	60.75	59.79	0.21	ok
		40	39.81	60.29			
		30	29.72	60.57			

Pruebas Funcionales De La Máquina Para El Eje Z

La velocidad máxima de avance en Z es 125 mm/min, en la tabla 32 se muestran los datos obtenidos para pruebas manuales sobre Z.

Tabla 32*Prueba de velocidad de avance en Z.*

Velocidad Nominal (mm/min)	Tol. (mm/min)	Dist. (mm)	Tiempo (s)	Velocidad Calculada (mm/min)	Velocidad Promedio (mm/min)	Error	Resultado
24	0.24	30	75.45	23.86	23.77	0.23	ok
		20	50.51	23.76			
		10	25.33	23.69			
48	0.48	30	37.88	47.52	47.56	0.44	ok
		20	25.34	47.36			
		10	12.55	47.81			
72	0.72	30	24.83	72.49	71.61	0.39	ok
		20	16.61	72.25			
		10	8.56	70.09			

Resumen

En el capítulo se describe el proceso de implementación de todas las mejoras necesarias para la modernización. Inicialmente se desmantelo la máquina para realizar la sujeción del nuevo motor, también se separó el gabinete de la estructura de seguridad puesto que este fue reemplazado por uno de mayor tamaño que por facilidad para futuros mantenimientos ahora está sujeto a la estructura con pernos.

También se realizaron agujeros roscados sobre los carros de desplazamiento y la mesa de trabajo para la sujeción de los fines de carrera y los dispositivos empleados para la activación de los mismos.

Debido a la distancia entre el motor y el husillo fue necesario realizar un eje, que por medio de matrimonios (Love Joy) se usó para unir el eje del motor con el eje del husillo.

Principalmente en el capítulo se muestran los análisis y resultados de las pruebas realizadas en la máquina. El control estadístico a través del cual se verifica que la precisión de la máquina se encuentre entre los límites de control apropiados, para lo cual se realizaron 3 probetas con un número determinado de muescas, y luego de verificar las dimensiones de todas esas muescas se determinó que el proceso está controlado y que cumple con las tolerancias impuestas.

Finalmente se realizaron pruebas funcionales para determinar la respuesta de la máquina al realizar los movimientos, para lo cual se realizan movimientos individuales en cada eje, se programa una velocidad de avance y una distancia, luego se toma el tiempo que se demora en completar esa distancia, con la distancia y el tiempo medido, se calcula la velocidad de avance de la máquina y esta se compara con la velocidad que fue programada, luego de lo cual se determinó que la máquina cumple con las pruebas funcionales a la perfección.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se determinó que era necesario reemplazar el motor del husillo por un motor de mayor potencia, por lo que se instaló un motor trifásico de 1 HP; para realizar dicho cambio se modificó la estructura de seguridad, para sujetar en ella una base para el nuevo motor, esta base fue fabricada en una plancha de acero de 2.5 mm, y también fue diseñada con la intención de disminuir las vibraciones que se generan cuando se enciende el husillo. Se realizaron varios maquinados en la fresadora para colocar fines de carrera, que servirán para controlar la posición de la mesa de trabajo. También se realizó un mantenimiento de todos los componentes de la máquina, entre los cuales se destacan la limpieza y engrasado de las cajas reductoras, mediante las cuales se transmite el movimiento de los motores a pasos hacia cada eje de movimiento.
- Se implementó el filtro mostrado en la figura 29, con el fin de acondicionar la señal por medio de la cual se realiza el control de velocidad de giro del husillo. Se reemplazó el gabinete electrónico por uno de mayor tamaño, debido a que se integrarían más elementos a la máquina y se reorganizaron las conexiones previamente hechas. Para identificar todas las conexiones remitirse al anexo B.
- Las pruebas realizadas con la máquina fresadora siguiendo un estándar establecido por la ASTM E2587 (Práctica para el uso de gráficos de control en el control estadístico de procesos), establecieron que tanto la variabilidad como la precisión de la máquina se encuentran correctamente controlados. Pruebas funcionales de la máquina en todos sus ejes de movimiento (X, Y, Z), también

determinaron un funcionamiento con una tolerancia de ± 0.1 mm. La repetibilidad de la máquina depende de la ubicación de la pieza de trabajo para su posterior “encerado”.

Recomendaciones

- Modificar el sistema de sujeción del motor del husillo para de esta forma aumentar la distancia entre la herramienta y la mesa de trabajo, esto permitirá trabajos con herramientas más largas. Posteriormente se puede aprovechar dicha modificación para agregar un eje de movimiento o incluso para realizar un sistema de cambio de herramienta automático.
- Se puede realizar el reemplazo de los fines de carrera por sensores que permitan que el procedimiento de “Home” se realice de forma más rápida.
- Se propone emplear el software de control en otros equipos de laboratorio en los que se empleen softwares licenciados, debido a que LinuxCNC permite controlar otro tipo de máquinas como tornos o robots cartesianos.
- Cambiar la relación de transmisión de las cajas reductoras o cambiar los motores de los 3 ejes de movimiento para aumentar la velocidad de avance de la mesa de trabajo, para esto verificar que, el torque sea suficiente para lograr el movimiento de la mesa de trabajo.
- Implementar un sistema de refrigeración para evitar que la herramienta de corte se sobrecaliente, y así lograr que su tiempo de vida se prolongue.
- Si se presenta algún problema con la máquina, remitirse al manual de usuario, que posee información necesaria para dar solución a problemas comunes tanto en la parte mecánica como electrónica.

Bibliografía:

AbaroaDrive. (s.f.). Variador Mecánico. Obtenido de

<https://www.abaroadrive.com/variador-mecanico-epicicloidal-en-bano-de-aceite/>

ABB. (s.f.). Qué es un variador de frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas. Obtenido de ABB: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>

Arrow. (s.f.). *Sensor de proximidad*. Obtenido de Arrow:

<https://www.arrow.com/es-mx/categories/sensors/proximity-sensors>

Balseca, D., & Móra, E. (2015). Diseño e implementación de un sistema didáctico CNC para la determinación de parámetros de corte en procesos de mecanizado con el taladro/fresador TERCO LA-20 del Laboratorio de Máquinas y Herramientas (Tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador.

Bayne, G. (01 de Febrero de 2018). *Geniolandia*. Obtenido de ¿Cómo funcionan las máquinas CNC?: <https://www.geniolandia.com/13121958/como-funcionan-las-maquinas-cnc>

Bethany. (29 de Abril de 2017). *Which CNC Control Software Should I Use?*

Obtenido de Scan2CAD: <https://www.scan2cad.com/cnc/which-cnc-controller-software-should-i-use/#controller-software>

Carbonell, J. M. (2011). *Simulador de Mecanizados en código ISO-6983 (Tesis de PhD)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2012). *Control Estadístico de Procesos*.

Obtenido de Portal de Promoción y Difusión Pública del Conocimiento Académico y Científico: http://nulan.mdp.edu.ar/1617/1/12_control_estadistico.pdf

CNCDreamer. (21 de Enero de 2012). *What is LinuxCNC?* Obtenido de LinuxCNC: <http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?LinuxCNCVersion2>

DAK Engineering. (2005). *TurboCNC V4.01*. Obtenido de <http://www.dakeng.com/man/turbocnc.html>

De Máquinas y Herramientas. (08 de Mayo de 2013). *¿Cómo funciona la Fresadora CNC?* Obtenido de De Máquinas y Herramientas: <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresadoras-cnc>

De Máquinas y Herramientas. (07 de Marzo de 2015). *¿Qué tener en cuenta al elegir una Fresadora?* Obtenido de De Máquinas y Herramientas: <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/elegir-comprar-fresadora>

Direct Industry. (s.f.). *Motor DC/Paso a paso/Bipolar/Nema 34*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/smart-motor-devices/product-72050-698563.html>

Eagle. (s.f.). *Motor Eléctrico Trifásico 1 HP 4 Polos Brida C*. Obtenido de <http://www.motorreductores.mx/motor-trifasico-1-hp-2>

Electrónica Embajadores. (s.f.). *Sensor de proximidad*. Obtenido de <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/SSPX011/sensores/sensores-de-proximidad/sensor-de-proximidad-por-ultrasonidos-hc-sr04>

Emmegi Ibérica, S.A. (20 de Enero de 2017). *Diamant: un centro de mecanizado versátil*. Obtenido de Interempresas: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/167759-Diamant-un-centro-de-mecanizado-versatil.html>

Esteves, A. (15 de marzo de 2003). *Dos siglos de fresadoras*. Obtenido de Interempresas: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12066-Dos-siglos-de-fresadoras.html>

Feser. (s.f.). *Motor Electrico Trifásico IE2 – 0,33HP 4 Polos – Weg*. Obtenido de <http://feser.com.pe/product/motor-electrico-trifasico-ie2-033hp-4-polos-weg/>

Frank Mecafenix. (20 de Abril de 2017). *Motor paso a paso ¿que es y como funciona?* Obtenido de Ingeniería mecafenix: <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

Gausemeier, J., & Moehringer, S. (2003). *New Guideline VDI 2206 - A flexible procedure model for the design of mechatronic systems*.

GNC Caldereria. (04 de noviembre de 2016). *Qué tipos de fresadoras existen*. Obtenido de http://www.gnccaldereria.es/tipos-fresadoras-existen/#11_Tipos_de_fresadoras_verticales

Griful Ponsati, E., & Canela Campos, M. Á. (2005). *Gestión de la calidad*. Universitat Politècnica de Catalunya, España: Ediciones UPC.

HELLER. (s.f.). *Fresadora Universal Follow FU1600*. Obtenido de Heller Maquinaria: <https://www.hellermaquinaria.com/catalogo/fresadora-universal-follow-fu1600>

Herra Precio. (s.f.). *Fresadora Vertical Velocidad Variable ISO40 Mesa 12 X 54 AL-MILL*. Obtenido de Herra Precio: <https://herraprecio.com.mx/index.php/maquina-herramienta/fresadoras-convencionales-866-alms-1058.html>

Historia de la Fresadora. (04 de abril de 2018). Obtenido de Correa: <https://www.nicolascorrea.com/es/noticias/historia-fresadora-cnc>

Jácome, F., & Villacís, H. (2014). *Diseño e implementación de un sistema automático para la repotenciación de una máquina inyectora de plástico marca BJC en la empresa ISISTEM (Tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador.

Jorge. (25 de Enero de 2015). *Interruptores Fin de Carrera (I)*. Obtenido de <https://paletosdelaelectronica.wordpress.com/2015/01/25/interruptores-fin-de-carrera-i/>

Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2008). *Administración de Operaciones: Procesos y cadenas de valor*. México: Pearson Educacion.

Krar, S., Gill, A., & Smid, P. (2009). *Tecnología de las Máquinas Herramientas (Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., Mexico)*. New York, EEUU: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Leão, L. (19 de octubre de 2017). *CAD vs CAE vs CAM: ¿Cuáles son las diferencias?* Obtenido de E3 Series Center: <https://www.e3seriescenter.com/blog-de-ingenieria-electrica-moderna/cad-vs-cae-vs-cam-diferencias>

LinuxCNC. (s.f.). *Gscreen Development*. Obtenido de <http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?Gscreen>

Newfangled Solutions. (s.f.). *Mach4 Hobby*. Obtenido de Machsupport: <https://www.machsupport.com/software/mach4/>

Pérez, A. (11 de Julio de 2006). *Correa Sincronizada*. Obtenido de Mecapedia: http://www.mecapedia.uji.es/correa_sincronizada.htm

Probotix. (s.f.). *CNC SOFTWARE*. Obtenido de Probotix: https://www.probotix.com/CNC_SOFTWARE

Riba Romeva, C. (2002). *Diseño concurrente*. Universitat Politècnica de Catalunya, España: Edicions UPC.

s.a. (s.f.). *Programación de control numérico ISO STANDARD (Código G)*. Obtenido de <http://www.gulmi.com.ar/iso.pdf>

Sandvik. (s.f.). *Datos de corte*. Obtenido de Sandvik: https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/drilling/getting_started/cutting_data/pages/default.aspx

Schey, J. (2002). *Introduction to Manufacturing Processes [Introducción a Procesos de Manufactura]*. University of Waterloo, Ontario, Canada: McGraw-Hill Companies, Inc.

Schvab, L. (2011). *Máquinas y Herramientas*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Sideco. (20 de Noviembre de 2015). *Descubre cómo funciona una máquina CNC*. Obtenido de <https://sideco.com.mx/descubre-como-funciona-una-maquina-cnc/>

Suh, S.-H., Kang, S.-K., Chung, D.-H., & Stroud, I. (2008). *Theory and Design of CNC systems [Teoría y diseño de sistemas CNC]*. England: Springer-Verlag London.

TecnoMáquinas. (s.f.). *HBM 50 DRO VARIO 400V*. Obtenido de TecnoMáquinas: <http://tecnomaquinas.es/fresadoras/144-hbm-50-dro.html>

Universal Gcode Sender. (s.f.). Obtenido de https://winder.github.io/ugs_website/

ViwaCNC. (s.f.). Obtenido de <http://www.viwacnc.com/index.php?seccion=queescnc>

Zona CNC. (s.f.). *Fresadora CNC router 1300x2500mm. Profesional - Fresadoras*. Obtenido de Zona CNC: <https://www.zonacnc.com/es/fresadoras/812-fresadora-cnc-router-1300x2500mm-profesional.html>

Zuendo. (s.f.). *Variador de frecuencia trifásico*. Obtenido de <https://www.zuendo.com/variadores-de-frecuencia-trifasicos-380v-usados/2788-variador-de-frecuencia-trifasico-powtech-15kw2-cv-reacondicionado.html>

Anexos