



Automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe para mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria.

Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander

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. Acuña Coello, Fausto Vinicio

17 de enero 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenidos

INFORME DE DETECCIÓN DE PLAGIO

EL INFORME CERTIFICA QUE EL DOCUMENTO ADJUNTO

Tesis Rodríguez Christopher para antiplagio.docx

FUE REVISADO CON EL SERVICIO DE PREVENCIÓN DE PLAGIO

MY.PLAGRAMME.COM Y TIENE:

SIMILITUD

9%

Nombre del archivo: Tesis Rodríguez Christopher para antiplagio.docx

Archivo verificado: 2023-01-18

Informe generado: 2023-01-18



Ing. Acuña Coello, Fausto Vinicio

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “**Automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe para mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria**” fue realizado por el señor **Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 20 de enero del 2023

Ing. Acuña Coello, Fausto Vinicio

C. C.: 0501510267



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Responsabilidad de autoría

Yo, **Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander**, con cédula de ciudadanía n°1804939054, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe para mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria** 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.

Latacunga, 20 de enero del 2023

Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander

C.C.: 1804939054



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Autorización de publicación

Yo, **Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander**, con cédula de ciudadanía n°1804939054, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe para mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 20 de enero del 2023

Rodríguez Pazmiño, Christopher Alexander

C.C.: 1804939054

Dedicatoria

Este proyecto de titulación está dedicado en mi primer lugar a mi madre Carmita, quien ha sido un apoyo incondicional durante todo el trayecto de mi carrera universitaria brindándome su amor y sabiendo motivarme con mucha paciencia y comprensión en los momentos más difíciles.

A mi hermano Jorge, por su apoyo y cariño, y finalmente a mis amigos y compañeros de carrera, por brindarme su confianza compartiendo conocimientos durante este largo camino.

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" por permitirme formarme como ingeniero mecatrónico, y a todos aquellos docentes que de una u otra manera me inculcaron este deseo de aprender y de ser un excelente profesional.

De igual manera agradezco a la empresa Castro Maquinaria por abrirme sus puertas y confiar en mí para la implementación de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de verificación de contenidos	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	16
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo I: Aspectos generales	20
Planteamiento del problema.....	20
Antecedentes.....	21
Justificación e importancia.....	23
Objetivos.....	24
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos específicos</i>	24
Hipótesis.....	25
Variables de la investigación.....	25
<i>Variable Independiente</i>	25
<i>Variables Dependientes</i>	25
Capítulo II: Fundamentación teórica.....	26
Estado del arte.....	26

<i>Estudio de factibilidad para la automatización de un torno y automatización de una fresadora, José Del Valle Zúñiga, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003</i>	<i>27</i>
<i>Diseño de la automatización para una fresadora convencional, César Sánchez & Jaime Cortés, Universidad Autónoma de Occidente, 2011</i>	<i>28</i>
<i>Automatización de la fresadora Bridgeport serie I, Santiago Villacís & Lenin León, Escuela Politécnica del Ejército, 2006.....</i>	<i>29</i>
<i>Automatización de una máquina fresadora mediante control numérico computarizado, Edwin Freile, Escuela Politécnica Nacional, abril 2009</i>	<i>30</i>
<i>Diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de una fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Lenin Gonzáles & Cristian Changoluiza, 2016</i>	<i>31</i>
<i>Cabezal de indexación electrónico, Gary Liming, Snailworks Electronic, 15 de octubre de 2012</i>	<i>32</i>
<i>Plato divisor para fresadora, canal de YouTube Mundo C.N.C. con Arduino, octubre de 2020.....</i>	<i>33</i>
<i>Diseño y análisis de una fresadora CNC rentable a pequeña escala, Wei Qin, Urbana, 2013.....</i>	<i>34</i>
<i>Fresadora CNC inteligente compatible con STEP-NC con un controlador de arquitectura abierta, Mahanama Dharmawardhana, Asanga Ratnaweera & Gheorghe Oancea, Kandy, 2021</i>	<i>35</i>
<i>Diseño y control de una máquina fresadora de 4 ejes con retrofit para aplicaciones industriales, Darshan T, Mohanambica K & Basavaraju H, Mysuru, 2018.....</i>	<i>36</i>
<i>Soluciones en base al estado del arte.....</i>	<i>36</i>

Características de máquinas Brown & Sharpe.....	37
<i>Fresadora horizontal Brown & Sharpe modelo No. 2 Plain Light Type</i>	38
Diagnóstico de la fresadora.....	39
<i>Inspección de grietas o fisuras</i>	41
<i>Análisis de desgaste</i>	45
Desgaste en el tornillo-tuerca del eje longitudinal.	45
Desgaste en la entrada a la caja de engranajes.	46
<i>Análisis de ruidos</i>	47
<i>Análisis del lubricante y sistema de refrigeración</i>	48
<i>Análisis del juego presente en los ejes de desplazamiento</i>	48
Línea base de la empresa.....	51
<i>Demanda de ejes estriados en la construcción de máquinas</i>	51
<i>Proceso de producción de ejes estriados</i>	53
<i>Capacidad de producción en el mecanizado de ejes estriados</i>	55
Capítulo III: Diseño y selección	59
Parámetros de mecanizado del proceso de fresado de ejes estriados.....	59
Estado inicial de la máquina.....	64
<i>Modificaciones en la máquina</i>	64
<i>Rendimiento de la fresadora con el motor incorporado por la empresa</i>	65
Parámetros de diseño.....	66
<i>Casa de la calidad o matriz QFD de planificación del proyecto</i>	66
Alternativas de solución.....	67
<i>Método ordinal corregido de criterios ponderados</i>	67
Mecanismo de transmisión de movimiento.	68
Mecánica y electrónica.	68
Control del sistema.	71

Interfaz de usuario	75
Diseño del sistema mecánico.....	78
<i>Cálculo del torque resistivo en el eje longitudinal (Eje X)</i>	<i>78</i>
<i>Medición experimental del torque resistivo en el eje longitudinal (Eje X).....</i>	<i>81</i>
<i>Torque de aceleración en el eje longitudinal (Eje X)</i>	<i>81</i>
Inercia en el sistema del eje longitudinal (Eje X).	81
Variación de velocidad en el eje longitudinal (Eje X).	83
<i>Torque de movimiento en el eje longitudinal (Eje X)</i>	<i>84</i>
<i>Medición experimental del torque resistivo en el cabezal divisor (Eje A).....</i>	<i>84</i>
<i>Torque de movimiento en el cabezal divisor (Eje A).....</i>	<i>85</i>
Control del sistema electromecánico.....	86
Selección del sistema de control.....	88
Selección y especificación de componentes.....	88
<i>Motores con sus componentes de control.....</i>	<i>88</i>
Eje longitudinal (Eje X).....	88
Cabezal divisor (Eje A).	90
Driver controlador de los motores.	92
<i>Controlador del sistema</i>	<i>93</i>
<i>Pantalla HMI</i>	<i>95</i>
<i>Final de carrera.....</i>	<i>96</i>
<i>Botoneras de control.....</i>	<i>97</i>
<i>Relé</i>	<i>98</i>
<i>Fuente de alimentación.....</i>	<i>99</i>
Programación de la máquina.....	100
Capítulo IV: Implementación y pruebas.....	104
Cambios o adaptaciones en la estructura mecánica de la máquina.....	104

<i>Sistema de transmisión del motor trifásico a la caja de engranajes</i>	
<i>de la máquina</i>	104
<i>Bomba de refrigeración de la máquina</i>	105
Implementación de los ejes automatizados.....	106
<i>Eje longitudinal (Eje X)</i>	106
<i>Cabezal divisor (Eje A)</i>	106
Incorporación del tablero eléctrico.....	107
Incorporación del tablero de control.....	108
Pruebas de funcionamiento de la máquina.....	109
<i>Instalación u operación</i>	109
<i>Temperatura de trabajo en los motores</i>	110
<i>Corriente suministrada a los controladores y los motores</i>	111
<i>Precisión en los ejes automatizados</i>	113
<i>Producción conseguida después de la automatización</i>	116
Capítulo V: Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones	119
Análisis de instalación u operación.....	119
Análisis de temperatura y corrientes de trabajo en los motores a pasos.....	119
Análisis de precisión conseguida después de la automatización.....	121
Validación de la hipótesis.....	122
Conclusiones.....	123
Recomendaciones.....	125
Bibliografía.....	126
Anexos.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes indispensables para la solución de los proyectos del estado del arte....	37
Tabla 2 Resultados del ensayo por líquidos penetrantes.....	44
Tabla 3 Desplazamiento en los ejes de la fresadora.....	49
Tabla 4 Desviaciones en los desplazamientos del eje X.....	49
Tabla 5 Desviaciones en los desplazamientos del eje Y.....	50
Tabla 6 Desviaciones en los desplazamientos del eje Z.....	50
Tabla 7 Tiempos característicos del mecanizado de ejes estriados en la fresadora	55
Tabla 8 Capacidad de producción del mecanizado de ejes estriados en la fresadora.....	57
Tabla 9 Hoja de proceso de fresado de ejes estriados con herramienta del catálogo 2021.2 Fresado de Seco Tools.....	61
Tabla 10 Hoja de proceso de fresado de ejes estriados con herramienta usada por la empresa.....	63
Tabla 11 Modificaciones en la fresadora a lo largo de su estancia en la empresa	64
Tabla 12 Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en los motores con sus componentes de control.....	69
Tabla 13 Evaluación sobre precio en las alternativas para los motores con sus componentes de control.....	69
Tabla 14 Evaluación sobre torque a baja velocidad en las alternativas para los motores con sus componentes de control.....	70
Tabla 15 Evaluación sobre precisión en las alternativas para los motores con sus componentes de control.....	70
Tabla 16 Conclusiones de las alternativas para los motores con sus componentes de control.....	71
Tabla 17 Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en el controlador del sistema.....	72

Tabla 18 <i>Evaluación sobre precio en las alternativas para el controlador del sistema</i>	73
Tabla 19 <i>Evaluación sobre software libre en las alternativas para el controlador del sistema</i> ...	73
Tabla 20 <i>Evaluación sobre robustez en las alternativas para el controlador del sistema</i>	73
Tabla 21 <i>Evaluación sobre velocidad de procesamiento en las alternativas para el controlador del sistema</i>	74
Tabla 22 <i>Conclusiones de las alternativas para el controlador del sistema</i>	74
Tabla 23 <i>Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en la pantalla HMI</i>	75
Tabla 24 <i>Evaluación sobre precio en las alternativas para la pantalla HMI</i>	76
Tabla 25 <i>Evaluación sobre dimensiones en las alternativas para la pantalla HMI</i>	76
Tabla 26 <i>Evaluación sobre manejo en las alternativas para la pantalla HMI</i>	77
Tabla 27 <i>Conclusiones de las alternativas para la pantalla HMI</i>	77
Tabla 28 <i>Especificaciones de las alternativas de motores paso a paso en eje X</i>	89
Tabla 29 <i>Numero de pulsos enviados por el controlador para que el motor realice las divisiones necesarias en el mecanizado</i>	90
Tabla 30 <i>Especificaciones de las alternativas de motores paso a paso en eje A</i>	91
Tabla 31 <i>Especificaciones de las alternativas de drivers para los motores paso a paso</i>	92
Tabla 32 <i>Especificaciones de las alternativas de controlador del sistema</i>	93
Tabla 33 <i>Especificaciones de las alternativas de pantallas HMI micro panel</i>	96
Tabla 34 <i>Alternativas de final de carrera</i>	97
Tabla 35 <i>Alternativas de botoneras de control</i>	98
Tabla 36 <i>Alternativas de relé</i>	99
Tabla 37 <i>Elementos influyentes en la fuente de alimentación</i>	100
Tabla 38 <i>Pruebas de instalación u operación del proyecto</i>	110
Tabla 39 <i>Temperatura de trabajo en los motores</i>	110
Tabla 40 <i>Corriente suministrada a los controladores y motores</i>	111
Tabla 41 <i>Muestras de los desplazamientos del eje longitudinal</i>	113

Tabla 42 <i>Distancia entre divisiones del mecanizado de eje estriado de 3 pulgadas con 32 divisiones.....</i>	114
Tabla 43 <i>Tiempo del proceso de mecanizado después de la automatización.....</i>	116
Tabla 44 <i>Capacidad de producción del mecanizado de ejes estriados en la fresadora.....</i>	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista frontal de fresadora Brown & Sharpe modelo No. 2 Plain Light Type.....	39
Figura 2 Elementos de la fresadora con variables asociadas a su estado.....	40
Figura 3 Líquidos penetrantes Magnaflux empleados para la inspección de discontinuidades	42
Figura 4 Esquema lateral derecho de la fresadora con las juntas inspeccionadas	43
Figura 5 Esquema lateral izquierdo de la fresadora con las juntas inspeccionadas.....	43
Figura 6 Tornillo y tuerca de transmisión del eje longitudinal de la máquina.....	45
Figura 7 Transmisión de entrada a la caja de engranajes de la máquina	46
Figura 8 Lugares con concentración de ruidos en la máquina.....	47
Figura 9 Demanda de producción de ejes estriados mensual (Oct2018 – Jul2021).....	52
Figura 10 Diagrama de flujo del proceso de mecanizado de ejes estriados mediante la fresadora.....	54
Figura 11 Comparación entre el tiempo de flujo y el takt time en la producción de ejes estriados	56
Figura 12 Demanda de ejes estriados según su tamaño.....	56
Figura 13 Parámetros del eje estriado respecto a la capacidad de producción	58
Figura 14 Dibujo del eje estriado con características de mayor complejidad en el mecanizado	59
Figura 15 Matriz QFD de planificación del proyecto	66
Figura 16 Fuerzas externas presentes en el eje longitudinal.....	78
Figura 17 Dimensiones referenciales para el cálculo de la inercia del tornillo de potencia	82
Figura 18 Esquema de conexión de los componentes del sistema electromecánico.....	87
Figura 19 Diagrama de programación global.....	101
Figura 20 Procedimiento realizado por el operario previo al inicio del programa	102
Figura 21 Diagrama de flujo del programa para mecanizar ejes estriados	103

Figura 22 <i>Acoplamiento de la polea de entrada a la caja de engranajes de la máquina</i>	104
Figura 23 <i>Reposicionamiento de la bomba de refrigeración de la máquina</i>	105
Figura 24 <i>Acoplamiento del motor del eje longitudinal</i>	106
Figura 25 <i>Acoplamiento del motor del cabezal divisor</i>	107
Figura 26 <i>Tablero eléctrico de la máquina</i>	108
Figura 27 <i>Tablero de control de la máquina</i>	109
Figura 28 <i>Representación de la temperatura de trabajo en los motores</i>	111
Figura 29 <i>Representación gráfica de la corriente suministrada en mecanizado o anclaje</i>	112
Figura 30 <i>Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento rápido</i>	112
Figura 31 <i>Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento lento</i>	112
Figura 32 <i>Desplazamientos en el eje longitudinal después de la automatización</i>	113
Figura 33 <i>Desviación entre el valor real y medido del ángulo en cada división</i>	115
Figura 34 <i>Comparación del tiempo del proceso antes y después de la automatización con el Takt time</i>	117
Figura 35 <i>Comparación de la capacidad de producción actual respecto a la anterior</i>	118
Figura 36 <i>Reducción del eje del motor al eje longitudinal de la fresadora</i>	120
Figura 37 <i>Representación de la temperatura de trabajo en el motor del eje longitudinal después de la reducción</i>	121
Figura 38 <i>Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento rápido después de la reducción</i>	121

Resumen

En el presente trabajo de titulación se realiza la automatización del eje longitudinal y cabezal divisor de la fresadora horizontal Brown & Sharpe perteneciente a la empresa Castro Maquinaria con el objetivo de mejorar la producción de ejes estriados. En primera instancia, se realiza una investigación documental o estado del arte acerca de la aplicación de sistemas para la automatización de máquinas, enfocándose en fresadoras. Seguidamente se realiza el diagnóstico de la máquina, mediante el cual se determina su funcionabilidad, encontrando problemas de desgaste y ruido relacionados con la transmisión de entrada a la caja de engranajes. Además, se detalla la línea base de la empresa, donde se analiza la capacidad de producción de ejes estriados. El diseño del proyecto parte de establecer la hoja de datos del proceso de fresado de ejes estriados y realizando un análisis mediante la matriz QFD de planificación del proyecto y el método ordinal corregido de criterios ponderados considerando a su vez los criterios analizados en el estado del arte, se opta por emplear un PLC Xinje modelo XD3 como controlador del sistema, realizando un control en lazo abierto con motores a pasos de la marca Kinco, obteniendo un error cuadrático de $\pm 1.33\text{mm}$ de desplazamiento en el eje longitudinal y $\pm 0.1^\circ$ de posición angular en el cabezal divisor, lo cual es permisible para el trabajo realizado por la empresa, obteniendo así un incremento en la capacidad de producción de ejes estriados mayor al doble de la capacidad anterior.

Palabras clave: automatización de máquinas-herramientas, interfaz humano-máquina (HMI), fresadora horizontal, productividad de ejes estriados, ejes estriados

Abstract

In this degree work, the automation of the longitudinal axis and dividing head of the horizontal milling machine Brown & Sharpe belonging to the company Castro Maquinaria is carried out with the aim of improving the production of splined shafts. First, a documentary research or state of the art about the application of systems for the automation of machines is carried out, focusing on milling machines. Next, a diagnosis of the machine is carried out, through which its operability is determined, finding wear and noise problems related to the input transmission to the gearbox. In addition, the baseline of the company is detailed, where the production capacity of splined shafts is analyzed. The project design starts by establishing the data sheet of the splined shaft milling process and performing an analysis using the QFD matrix for project planning and the corrected ordinal method of weighted criteria considering the criteria analyzed in the state of the art, it is decided to use a PLC Xinje model XD3 as the system controller, performing an open-loop control with Kinco stepper motors, obtaining a square error of $\pm 1.33\text{mm}$ of displacement in the longitudinal axis and $\pm 0.1^\circ$ of angular position in the dividing head, which is permissible for the work done by the company, thus obtaining an increase in the production capacity of splined shafts more than double the previous capacity.

Keywords: machine-tool automation, human-machine interface (HMI), horizontal milling machine, splined shaft productivity, splined shaft

Capítulo I

Aspectos generales

Planteamiento del problema

Cuando una empresa requiere de una producción intermitente o por lotes, resulta de mucha utilidad sustituir o adaptar las máquinas para conseguir una mayor eficiencia. Esto se debe a que el trabajo del operario se vuelve excesivamente repetitivo, llegando al punto de ser tedioso o agotador y al contar con una máquina manual, la calidad de la producción dependerá directamente de la condición física en la que se encuentre el operario. Por lo que esta situación perjudica tanto al operario como a la empresa. Siendo así que, analizándolo técnicamente, este problema se centra en las limitaciones de la máquina-herramienta con la que cuenta la empresa para realizar este tipo de producción. Lo cual a su vez no permite un buen aprovechamiento de la mano de obra.

La empresa Castro Maquinaria al contar con una demanda que ha incrementado aproximadamente el 20% en los últimos dos años, ha implementado ciertas medidas para conseguir el abastecimiento en cuanto a la maquinaria que ofrecen, sin embargo, aun así, ha existido una pérdida que, si bien está relacionada con la pandemia que atraviesa el país, también ha sido resultado de requerir una mayor cantidad de tiempo para cumplir a cabalidad con los pedidos de clientes. El último año aproximadamente el 6% de clientes de la empresa han cancelado un pedido o lo han recibido tarde, con lo cual no se está aprovechando la demanda y se tiene una pérdida de credibilidad para la empresa. Este aspecto hace que se requiera del mecanizado de piezas por lotes, siendo los ejes estriados una parte importante de las piezas que requieren este tipo de producción.

Antecedentes

La empresa Castro Maquinaria es una empresa dedicada a la industria metalmeccánica y construcción de maquinaria para labrar madera, dentro de esta maquinaria se encuentran canteadoras, cepilladoras y otros equipos en los cuales se requiere de diversos procesos de manufactura para la obtención de las respectivas piezas, siendo los ejes estriados uno de estos componentes necesarios en el ensamble de varios equipos. La producción de estos ejes estriados es de aproximadamente 15 unidades al mes, gracias a la fresadora horizontal Brown & Sharpe con la que cuenta la empresa, sin embargo, debido a la antigüedad de la máquina y al existir un incremento en la demanda del mercado se requiere de una mejora en dicha producción.

La producción dentro de una empresa es uno de los pilares que, al ser potenciado, le permiten a ésta sobresalir respecto a la competencia mejorando su capacidad y calidad. El desarrollo de la ciencia y de la tecnología es cada vez mayor con el transcurso de los años y este hecho ha permitido posicionar a la automatización industrial como uno de los factores clave para impulsar la capacidad de producción con la que cuenta una determinada empresa.

Una fresadora convencional, al ser diseñada para operarse manualmente, cuenta con actuadores mecánicos con una precisión menor en comparación a una CNC, además de otras características que facilitan el trabajo manual realizado por el operador y dependerán del año en el que se fabricó dicha máquina. Por lo que para realizar la automatización resulta imprescindible analizar estos detalles. No obstante, para este proyecto lo que se busca no es un control CNC como tal, lo cual se debe a ciertas singularidades como el costo de inversión, la antigüedad de la máquina y su uso, lo cual se detallará oportunamente. Es necesario analizar como referencia algunos proyectos que permitan tener una mejor visión de lo que se pretende implementar.

Existe un proyecto de grado realizado en la universidad EAFIT de Medellín que tiene como tema la sistematización de una fresadora de piñón recto. Esta “sistematización” posee una gran semejanza a lo que se propone en este proyecto, puesto que implementa una interfaz donde el usuario ingresa los parámetros que le darán la forma final a su piñón.

“En primera instancia la máquina trabaja y tiene motorizado disco de corte, y el eje ‘Y’ de recorrido. Al sistematizarla, se motorizan los otros ejes los cuales se controlan por una computadora” (Sierra Ibáñez, 2006, p. 13). Cabe aclarar que la máquina señalada, por su estructura mecánica, permite únicamente el mecanizado de piñones y ha sido fabricada previamente por estudiantes de esa universidad, es así que se tuvo una mayor accesibilidad en su adaptación.

Mientras que para la automatización que se plantea en el presente proyecto se adaptará una fresadora convencional de la marca Brown & Sharpe por lo que se requerirá de ciertos cambios mecánicos que permitan una mejor precisión. Es de esta manera que se obtendrá un análisis acerca de cómo esta fresadora convencional puede incrementar su precisión al ser automatizada.

Enfocándose en un plano más actual, ya existen controladores numéricos en el mercado o incluso kits que son desarrollados para precisamente una automatización industrial de máquinas-herramientas como fresadoras, taladros, tornos, etc. Esto ha permitido la creación de empresas dedicadas a la automatización de máquinas manuales a CNC, retrofit y repotenciación CNC. En este punto es importante recalcar que una automatización de este tipo representa una fuerte inversión, que se vuelve aún más elevada al contar con una fresadora antigua siendo éste el caso, es por esta razón que, con este proyecto, se plantea una alternativa que permita una automatización para la fresadora horizontal de la empresa que cumpla con las necesidades de producción consiguiendo una buena relación entre costo y beneficio.

Justificación e importancia.

La automatización de la fresadora horizontal Brown & Sharpe resulta ser necesaria para la empresa Castro Maquinaria debido a que la empresa requiere de una producción de ejes estriados por lotes, y al ser esta fresadora una máquina-herramienta manual o convencional la productividad no es suficiente para satisfacer el incremento de la demanda. Esto se traduce en pérdidas para la empresa, de clientes y de credibilidad en el mercado, como se mencionó anteriormente el último año se tuvo un problema con aproximadamente el 6% de pedidos de maquinaria relacionados con el tiempo de producción. Este aspecto hace importante optimizar la producción, que puede conseguirse mediante la implementación de este proyecto que ayudará a la empresa organizando y empleando la mano de obra de operarios de máquinas de una mejor manera. Consiguiendo a su vez que el trabajo del operario sea menos tedioso y agotador al tener a su disposición un lote de piezas que estarán listas para el ensamble de la maquinaria contando siempre con el mismo tiempo y calidad del mecanizado.

Además de la necesidad de producción que atraviesa la empresa, resulta de igual importancia en la gestión de la calidad y productividad el adaptarse al cambio tecnológico que atraviesa la industria día a día, puesto que la competencia siempre estará presente y si una empresa se estanca serán necesarias muchas más medidas estratégicas para mantenerse en una buena posición dentro del mercado.

Objetivos

Objetivo General

Automatizar el cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe para mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria.

Objetivos específicos

- Investigar acerca de la aplicación de sistemas para la automatización de máquinas, enfocándose en la fresadora horizontal.
- Realizar un diagnóstico de la fresadora horizontal Brown & Sharpe, así como de la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria.
- Realizar el diseño mecánico y electrónico considerando los parámetros de diseño del sistema a implementar para la automatización de los ejes de la fresadora horizontal Brown & Sharpe.
- Seleccionar los componentes apropiados para la implementación de acuerdo con el diseño realizado, considerando su disponibilidad en el mercado.
- Implementar el sistema de automatización adaptando mecánicamente la fresadora Brown & Sharpe para incrementar su precisión y acoplar eficientemente los componentes electrónicos necesarios.
- Realizar las respectivas pruebas y análisis de los resultados para concluir adecuadamente sobre la funcionalidad del proyecto.

Hipótesis

¿La automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe mejorará la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria?

Variables de la investigación***Variable Independiente***

Automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe.

Variables Dependientes

Mejora de la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria.

Capítulo II

Fundamentación teórica

Estado del arte

La automatización de máquinas – herramientas es un proceso que incorpora diversos elementos pertenecientes a áreas como la mecánica, electrónica, neumática, hidráulica y de control. Y tiene como finalidad reducir la intervención de la mano de obra brindada por el ser humano para realizar una operación con la máquina – herramienta dentro de la industria.

En el presente proyecto se llevará a cabo la automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe perteneciente a la empresa Castro Maquinaria con el propósito de mejorar la producción de ejes estriados, permitiendo así una producción intermitente que satisfaga las necesidades de la empresa. Previo al diseño del proyecto, es fundamental realizar una investigación documental para analizar las alternativas de solución más adecuadas.

En el aspecto nacional, existen varios proyectos donde se automatiza una fresadora convencional variando sus especificaciones. Por lo que se tiene una multiplicidad de resultados con ciertas singularidades que le proporcionan a cada idea numerosos criterios a examinar. En el aspecto global, existen proyectos donde se implementan las nuevas normas de programación para el control de máquinas – herramientas enfocadas en emitir mayor información por parte de la fase CAD-CAM previo al CNC, consiguiendo máquinas más inteligentes.

Por consiguiente, se consideran diversos trabajos que tienen relación con este proyecto, siendo descritos y analizados a continuación.

Estudio de factibilidad para la automatización de un torno y automatización de una fresadora, José Del Valle Zúñiga, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003

Existe un estudio acerca de la factibilidad para la automatización de una fresadora de la empresa AKA Precisión, empresa metalmecánica dedicada a la fabricación de repuestos de precisión. El estudio es realizado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica y para la automatización se emplea de un kit con un controlador especializado CNC, llamado ACU-RITE MILLPWR, que efectúa un control de lazo cerrado.

El kit cuenta con una PC industrial con Pentium 75MHz para la interfaz humano máquina, memoria Dram 4Mb, Floppy 3.5" de 1.44Mb, Puerto serie DB9, paralelo DB25 y una fuente de poder monofásica 115 VAC, 8.5 A rms nominal 18 A pico. Sus sensores lineales de posición son transductores marca ACU-RITE ENC150 de vidrio con $2\mu\text{m}/0.0001''$ de resolución, esta precisión permite que no se requieran compensaciones de backlash y es conseguida gracias al vidrio, que es un material resistente en sus propiedades físicas cuando experimenta variaciones de temperatura. Adicionalmente, el kit posee servomotores de corriente continua de 3Nm y tornillos de bolas fijos de alta precisión.

Este kit ha sido diseñado y probado previamente por una empresa dedicada a su distribución, dicha empresa garantiza el funcionamiento de su kit siendo una útil referencia de que la automatización de una fresadora convencional puede realizarse con buenos resultados. Sin embargo, se deben tomar en cuenta diversos factores en este estudio, como lo son el costo de adquisición e implementación del kit, que ciertamente ha sido elevado, pero para este caso es una inversión que favorece significativamente las necesidades de la empresa. Además de que para este estudio se dispuso de una fresadora convencional Frejoth modelo FVTM1-1/2VS, la cual era bastante nueva para ese entonces y contaba con mejores condiciones operativas respecto a las demás fresadoras con las que trabajaba la empresa en la que se implementó este proyecto.

Diseño de la automatización para una fresadora convencional, César Sánchez & Jaime Cortés, Universidad Autónoma de Occidente, 2011

En este proyecto se diseña la automatización para una fresadora convencional perteneciente a la empresa Colombiana EPI LTDA, especializada en la fabricación de productos de protección personal para la seguridad industrial. Para este diseño se parte de las necesidades de la empresa y se realiza una generación de conceptos mediante una matriz QFD.

Dentro del diseño se seleccionan los servomotores y mediante los respectivos cálculos se determinan los torques requeridos, optando por dos servomotores 1FL5062 con torque nominal de 4Nm y torque máximo de 8Nm; y un último servomotor 1FL5060 con torque nominal de 6Nm y torque máximo de 12Nm, dichos motores cuentan con encoders TTL con 2500 PPR y con velocidad nominal de 2000 RPM. El driver seleccionado es el SINAMICS V60 el cual es recomendado por Siemens específicamente para este tipo de servomotores. Para el control se opta por el PLC HMI sinumerik 802S base line, que es el CNC de Siemens ideal para automatización de tornos y fresadoras con un máximo de 3 ejes.

Uno de los aspectos de gran importancia en cuanto a la parte mecánica del proyecto es el considerar el tipo de husillo que se encargará de proporcionar el movimiento al eje longitudinal de la mesa en la fresadora, lo más adecuado para obtener una mayor eficiencia es reemplazar el husillo convencional, que viene incorporado en la máquina de fábrica, por un husillo de bolas. Esto se debe a que, en un husillo de bolas, “la bola realiza un movimiento basculante entre el eje del husillo y la tuerca, con un par de torsión inferior en una tercera parte o menos al de un husillo deslizante convencional” (Sánchez Robledo & Cortés Rodríguez, 2011, p. 46). De esta manera, este husillo le permitirá al motor tener un mejor accionamiento para realizar el desplazamiento requerido, incrementando su precisión.

***Automatización de la fresadora Bridgeport serie I, Santiago Villacís & Lenin León,
Escuela Politécnica del Ejército, 2006***

Para la automatización de esta fresadora se emplea un servo drive DC3IO, el cual es muy versátil puesto que permite no sólo el control de los servomotores, sino que también, al contar con varios tipos de entradas y salidas auxiliares, posibilita el envío de señales útiles para el funcionamiento de la inversión de giro del husillo, lubricación automática, alarmas, refrigeración, parada del husillo, parada de emergencia y finales de carrera o limit switch. En el sistema de control, además de este servo drive, se emplea una tarjeta de control de movimiento, llamada CPU 10, la cual proporciona una interfaz con la PC con el software CNC 10 comunicándose mediante un terminal PCI bus, y recibe las señales enviadas por los encoders de los servomotores. En este proyecto se indican además los requerimientos con los que debe contar la PC o computadora de control para que sea compatible con la tarjeta de control CPU10, entre ellos se encuentran el disponer de: procesador Pentium con mínimo 400MHz, disco duro de 128Mb, RAM de 128Mb, ser compatible con LINUX, y tener ranuras IDE y PCI. De igual manera, se establece que lo más adecuado es contar con un disco duro de estado sólido puesto que es más apropiado para el ambiente industrial.

Los servomotores se seleccionan de acuerdo a las especificaciones de la tarjeta de control DC3IO tomando en cuenta voltajes y corrientes, como algunas características técnicas de los motores se tiene: voltaje de 12Vdc, corriente de 8A, velocidad angular de 2225 rpm, y torque de 3.3Nm. Estos servomotores son acoplados a los ejes con una transmisión por bandas trapeciales, las relaciones son de 2:5 en los ejes X & Y, y de 1:2 en el eje Z, además cuentan con encoders de tipo diferencial con 8000 PPR.

En cuanto a las pruebas y resultados, se verifica la correcta alineación de los servomotores con los ejes de desplazamiento mediante la observación del movimiento de la banda de transmisión. Se realiza una prueba de compensación de holguras con la ayuda de un

palpador, indicando que el sistema puede compensar hasta un milímetro de juego. También se detalla una prueba de relación de transmisión de los ejes, que se realiza mediante una regla de tres entre la medida del palpador, el recorrido lineal mostrado en pantalla y el dato por defecto del motor en rev/mm proporcionado en pantalla gracias al software CNC 10, este cálculo es realizado iterativamente reemplazando el valor del parámetro dado en rev/mm hasta obtener un valor igual o aproximado entre el recorrido lineal y la medida del palpador.

***Automatización de una máquina fresadora mediante control numérico computarizado,
Edwin Freile, Escuela Politécnica Nacional, abril 2009***

El diseño del sistema eléctrico es un componente esencial en el desarrollo de este proyecto, puesto que se emplea de un computador con el software Match 3 Mill y se diseñan dos circuitos de control con la ayuda de microcontroladores PIC16F877A, un circuito de potencia y dos circuitos necesarios para el funcionamiento de la interfaz con el computador. Para el desplazamiento de los ejes de movimiento X & Y el sistema emplea motores paso a paso de 2° por paso, de los cuales no se establecen sus demás especificaciones. En el eje Z se utiliza un servomotor AC trifásico con resolución de 0.036°, y un servo driver marca GSK DA98D. Conectados a los motores paso a paso se dispone de encoders rotativos incrementales de 400 PPR.

Al primer circuito de control le corresponde indicar la posición, controlar los límites de corriente en los motores y alertar si se sobrepasase este límite. El segundo circuito de control, por otra parte, es el encargado de recibir las señales de los encoders para acondicionarlas y enviar los datos de posición al primer circuito; también recibe las señales de dirección y pulsos enviadas por el computador, con el objetivo de controlar los motores, indicando a la vez si el error de posición es elevado.

El circuito de potencia amplifica las señales enviadas del circuito de control a los motores a pasos, agrupa circuitos integrados, opto acopladores, resistencia de potencia, entre otros. En los circuitos de la interfaz se diseña al primero como el encargado de acondicionar las señales enviadas por el computador al controlador de los motores paso a paso y al servo driver; mientras que el segundo circuito de la interfaz acondiciona señales de salida del computador para relés de 12V y PWM para el motor de inducción del husillo, también acondiciona señales de entrada generadas por interruptores inductivos.

Las pruebas realizadas a los servomotores con control en lazo abierto y control en lazo cerrado deducen realizar el control con micro pasos para velocidades bajas y con medios pasos para velocidades altas, optimizando líneas de código. El sistema microprocesado requiere del primer circuito de la interfaz debido a que el software Match 3 Mill proporciona señales de control tipo pulso con un estado en alto o bajo de $25\mu\text{s}$, siendo un tiempo de estado insuficiente para la transmisión de datos.

Este proyecto tiene como parte de sus conclusiones que el emplear servo motores trifásicos es lo óptimo para el control en maquinaria CNC gracias a su desempeño en torque y velocidad. Siendo relevados los motores paso a paso, que según Freile (2009) presentan “problemas de vibraciones mecánicas causadas por saltos entre pasos” (p. 173).

Diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de una fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Lenin Gonzáles & Cristian Changoluisa, 2016

En primer lugar, para el desarrollo de este proyecto se establecen las necesidades de los diseñadores y usuarios respecto al funcionamiento de la fresadora automatizada, consiguiendo con esto la siguiente definición de especificaciones: desplazamiento de los ejes X, Y & Z de 400, 300 y 290 mm respectivamente; velocidades de avance en X, Y & Z de 250

mm/min; precisión de ± 0.1 mm y velocidad de husillo de 2500 rpm. Posteriormente, se realizan definiciones de la estructura funcional y de alternativas de diseño considerando módulos como: movilidad, control, interfaz, comunicación, potencia AC, y transmisión de potencia; Después de evaluar y seleccionar, se define el diseño. En cuanto a la movilidad, se hace uso de motores a pasos con 3.5 Nm en los ejes X & Y, y 12Nm en el eje Z, de acuerdo a los cálculos del torque necesario. El control se realiza mediante un computador, del cual no se establecen sus especificaciones, realizando un control de lazo abierto donde para la interfaz se emplea el software CncControl. La comunicación entre el computador y los componentes del sistema es de tipo serial, y se realiza mediante la placa Arduino. La potencia AC considerada para el giro del husillo hace necesario un variador de frecuencia.

Finalmente, la transmisión de potencia se realiza con un acople directo de los motores a los ejes de movimiento X & Y, y para el eje Z se realiza una reducción mediante engranes. Para la realización de pruebas se considera el control estadístico de procesos en operaciones de ranurado y taladrado, donde se determina que los ejes cumplen con los valores de tolerancia especificados.

Cabezal de indexación electrónico, Gary Liming, Snailworks Electronic, 15 de octubre de 2012

En el sitio web de Snailworks Electronic, www.liming.org, se encuentra detallado un proyecto en el cual se implementa un cabezal divisor electrónico. Para ello se hace uso de un motor paso a paso bipolar Nema 23 con un torque de anclaje de 2.4 Nm, conectado a un driver bipolar basado en el chip Toshiba TB6560, el cual es un controlador PWM tipo Chopper con un puente H interno que, al contar con estas características, requiere de un disipador de calor. Se emplean dos sensores de temperatura TMP36 que sensan el motor y el disipador de calor del driver. La visualización de los parámetros se imprime en un display con teclado incorporado, que tiene la marca SainSmart. El control de este sistema se efectúa gracias a la placa Arduino

Uno, en cuya interfaz programada se le permite al usuario operar el sistema con las siguientes opciones: ingresando el número de pasos que el motor dará por revolución, ingresando el ángulo que se desea rotar al eje del motor, ingresando los pasos que se desea hacer girar al motor e ingresando una velocidad para que el motor se accione continuamente.

El motor realiza una transmisión de potencia a un segundo eje de $\frac{1}{2}$ pulgada mediante una correa dentada con una relación de 3:1, este segundo eje es fijado a una base junto al motor mediante dos chumaceras y cuenta con un mandril de pinza ER16 en su otro extremo. Debido a que este proyecto no está enfocado a mecanizar un tipo de pieza en específico, no se realizan consideraciones de diseño en cuanto al torque y velocidad angular de trabajo. Al desarrollar el diseño mecánico en este proyecto se considera como una alternativa el adaptar un cabezal divisor 5C dependiendo de la relevancia del aspecto financiero.

Plato divisor para fresadora, canal de YouTube Mundo C.N.C. con Arduino, octubre de 2020

Este proyecto es presentado mediante tres vídeos en el canal “Mundo C.N.C. con Arduino” del sitio web de YouTube. Como es de suponer por el nombre del canal, en esta automatización se emplea la placa SBC Arduino mega para el control de todo el sistema, además se hace uso de un motor a pasos Nema 23 de 3 amperios, el cual es controlado con su respectivo driver para motor a pasos. Para este proyecto se adquiere un plato divisor chino, cuya estructura cuenta con un espacio para la incorporación del motor encargado de generar el movimiento, la relación de transmisión del motor al plato divisor cuenta con una reducción de 1:6 y se realiza mediante poleas.

La interfaz de usuario se presenta en una pantalla táctil TFT la cual es compatible con Arduino, por lo que toda la programación se realiza mediante el IDE de Arduino. El programa le permite al usuario proporcionarle movimiento del cabezal ingresando las divisiones que se

desea tener en el cabezal, ingresando los pasos que desea que realice el motor, o que se mueva continuamente variando su velocidad mediante un potenciómetro.

Diseño y análisis de una fresadora CNC rentable a pequeña escala, Wei Qin, Urbana, 2013

En este proyecto se desarrolla un prototipo de fresadora para realizar micro – manufactura, siendo capaz de mecanizar en un volumen de trabajo de $50 \times 50 \times 40 \text{ mm}^3$, con una repetibilidad de $10 \mu\text{m}$ y precisión igual a $50 \mu\text{m}$.

El desplazamiento de los ejes se realiza mediante servomotores chinos DC36.10S1, cada uno con su respectivo amplificador BLM57180, de los cuales no se establecen especificaciones. Los husillos de bolas se seleccionan considerando tanto el aspecto económico, como medidas de paso y diámetros mínimas, optando por el modelo C7 1204. Mientras que las guías lineales se seleccionan considerando la robustez y rigidez, siendo más apropiadas las guías de rodillos cruzados o cross-roller guides que cuentan con un rango limitado de movimiento, no siendo un problema debido a que el proyecto se enfoca en un mecanizado a pequeña escala, de esta manera, también resulta apropiado el uso de encoders lineales, los cuales cuentan con una resolución de una micra.

El controlador del sistema es el PLC Delta Tau's UMAC que cuenta con una placa CPU Turbo PMAC2 y dos interfaces de ejes ACC-24E2A que permiten controlar 8 ejes de la máquina a automatizar. Se emplean 3 softwares, Pwin32 como terminal y editor de texto de programas, PmacTuningPro encargado del control PID de los servomotores, y Pmac-NC Pro2 encargado del HMI.

Fresadora CNC inteligente compatible con STEP-NC con un controlador de arquitectura abierta, Mahanama Dharmawardhana, Asanga Ratnaweera & Gheorghe Oancea, Kandy, 2021

Este proyecto se destaca por emplear un control mediante la norma de programación ISO 14649 o STEP-NC introducida en el 2014. Esta norma incorpora un conjunto de datos de la fase CAD/CAM previo al mecanizado CNC.

En el sistema mecánico, todos los ejes de desplazamiento se accionan mediante husillos de bolas, con un tipo de bola de 15mm. La mesa de trabajo es de 300 x 200 mm, está hecha de hierro fundido y posee un husillo de bolas de 16mm de diámetro con una tuerca de bolas tipo brida de 5mm de longitud. El error máximo permisible del desplazamiento es de 50 μ m/300mm, y cada eje cuenta con guías lineales con una capacidad de carga estática de 16.97 kN, esto permite que la fresadora cuente con menor juego y una mayor precisión.

En el sistema eléctrico, se emplea del SBC Raspberry Pi, con controlador de cuatro núcleos Broadcom BCM2837B0 Cortex-A53 de 64 bits y 1.4GHz, como controlador principal. Para el manejo de señales de entrada y salida analógicas se emplea de un Arduino Mega 2560, el cual es configurado como esclavo y se comunica con la Raspberry Pi mediante puerto USB usando la librería Firmata. La fresadora usa motores de tipo servo con corriente continua y torque de 1.6Nm, cada uno con su respectivo controlador G320X Servodrive y encoder rotatorio marca AMT102. El Servodrive cuenta con control PID interno y tres potenciómetros de ajuste para cada constante de control, asegurando así una posición precisa y exacta para cada eje de la fresadora CNC.

Diseño y control de una máquina fresadora de 4 ejes con retrofit para aplicaciones industriales, Darshan T, Mohanambica K & Basavaraju H, Mysuru, 2018

En este artículo científico, se implementa una máquina fresadora de cuatro ejes, la cual incorpora servomotores con especificaciones obtenidas mediante cálculos de diseño, tomando en cuenta las fuerzas de corte. En el eje Y, el servomotor cuenta con velocidad angular de 1500 rpm y torque de 30 Nm, mientras que en los demás ejes los servomotores poseen una velocidad angular de 2000rpm y torques de: 22 Nm para el eje X, 40 Nm para el eje Z y 8Nm para el eje rotatorio o eje B. El control del sistema se realiza mediante un controlador Fanuc CNC modelo FS 0i Mate-MD, el cual se programa mediante el software FANUC PLC v7.6. En este proyecto se realiza una gran inversión al emplear un controlador específico para máquinas CNC y servomotores de elevada potencia, sin embargo, se cumple con los requerimientos de la empresa, incrementando a productividad y precisión, consiguiendo a la vez la reducción de la mano de obra.

Soluciones en base al estado del arte

Una vez analizados los proyectos del estado del arte, se identifican los elementos que aportan eficientemente a las soluciones de los mismos. De esta manera, se facilita conseguir un mayor enfoque en la selección de una alternativa de solución, lo cual se realiza posteriormente en el capítulo tres. En la tabla 1 se pueden apreciar los componentes claves en la implementación de estos proyectos.

Tabla 1

Componentes indispensables para la solución de los proyectos del estado del arte

Aspecto	Componente	Proyectos que lo usan	Consideraciones destacables
Generación de movimiento en los ejes	Motores a pasos	4	Empleados primordialmente en el cabezal divisor, mediante control por lazo abierto. Para el movimiento de los ejes no resulta ser la mejor opción debido a este tipo de control y a la pérdida de pasos que presentan.
	Servomotores AC	1	Menormente empleados debido a su elevado costo.
	Servomotores DC	5	Optimizan el control y la precisión que se consiguen.
Transmisión de movimiento	Husillo de bolas	6	Reduce el juego aumentando la precisión en los ejes.
	Tornillo – tuerca de potencia	2	No recomendado debido a problemas de juego.
Controlador del sistema	Controlador CNC	2	Posee un elevado número de ventajas siendo el más costoso.
	Computador	3	Requiere mayor espacio.
	PLC	2	Algunos se especializan en CNC.
	SBC	3	No recomendado en la industria.

Características de máquinas Brown & Sharpe

Entre las máquinas desarrolladas por Brown & Sharpe se encuentran tornos, taladros, amoladoras, fresadoras, rectificadoras, entre otras. El primer aspecto que se debe considerar es su antigüedad debido a que Brown & Sharpe dejó de fabricar este tipo de máquinas poco después de la segunda guerra mundial, la cual concluyó en 1945. Sin embargo, esta empresa

llegó a ser fundamental para el desarrollo de la industria, puesto que agregó numerosas características que le otorgaron a sus máquinas funciones novedosas para esa época. En 1853, se fabricó la primera fresadora universal que contaba con cabezal divisor para mecanizado de engranajes rectos y helicoidales por parte de la empresa Brown & Sharpe (Cruz, Guerra, Herrera, & Meza, 2014). En 1880, Brown & Sharpe introdujo la rectificadora universal al incorporarle un dispositivo a una rectificadora cilíndrica para conseguir rectificadores interiores (Amor, 2018). En 1898, la empresa desarrolló un torno automático mono husillo con torreta revólver de eje horizontal (Maquinaria Madrid S. A., 2002).

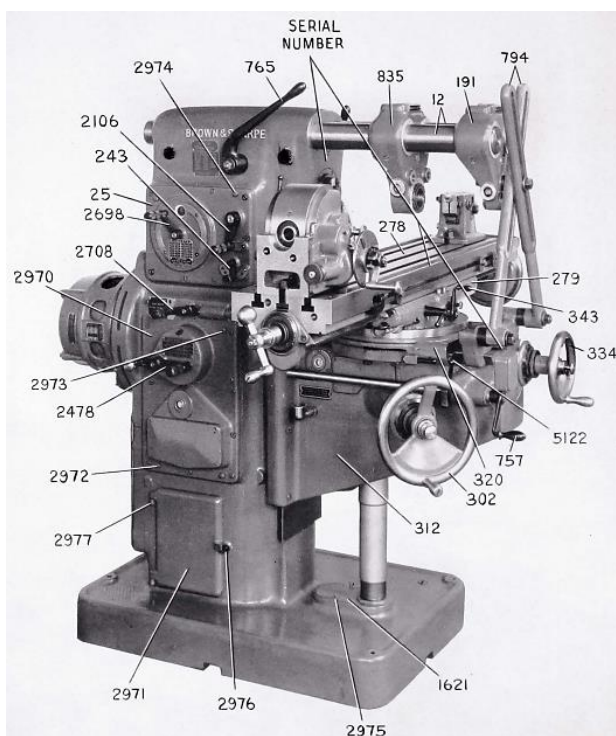
Fresadora horizontal Brown & Sharpe modelo No. 2 Plain Light Type

La empresa Castro Maquinaria realiza la producción de ejes estriados mediante la fresadora horizontal modelo No. 2 Plain Light Type, marca Brown & Sharpe. Esta fresadora cuenta con 4 velocidades del husillo en “alto” y 4 velocidades en “bajo” tanto para conducción directa o “back gear out”, donde la velocidad mayor es de 1300 rpm y la menor de 175 rpm; como para retroceso de engranajes o “back gear in”, donde la velocidad mayor es de 300 rpm y la menor de 40 rpm. También cuenta con 16 velocidades de avance automático, siendo la mayor de 18 ¼ de pulgadas por minuto y la menor de ½ pulgada por minuto. En la figura 1 se puede observar este modelo de fresadora indicando los siguientes componentes: 12. Puente o brazo superior; 25. Case de velocidad; 191. Soporte de árbol, exterior; 243. Palanca de retroceso del husillo; 278. Mesa; 279. Sillín; 302. Manivela del eje elevador de la ménsula; 312. Ménsula; 320. Cama de sujeción; 334. Manivela de avance transversal; 343. Palanca de acoplamiento de avance; 757. Manivela del eje de la abrazadera de la ménsula; 765. Palanca de inicio; 794. Soporte del brazo; 835. Soporte de árbol, interior; 1621. Tope del tornillo de la ménsula; 2106. Palanca de bloqueo de la marcha atrás; 2478. Palanca de cambio de avance; 2698. Palanca de cambio de velocidad; 2708. Palanca de serie de velocidad; 2970. Case de control de avance; 2971. Tapa de la caja de engranajes; 2972. Clavija del soporte de la bomba

de lubricación; 2973. Clavija del case de control de avance; 2974. Clavija del case de velocidad; 2975. Clavija del tope del tornillo de la ménsula; 2976. Pestillo de la tapa de la caja de engranajes; 2977. Perno de bisagra de la tapa de la caja de engranajes; 5122. Palanca de retroceso del avance.

Figura 1

Vista frontal de fresadora Brown & Sharpe modelo No. 2 Plain Light Type



Nota. Tomado de *Repair parts for Brown & Sharpe No. 2 Universal, No. 2 Plain and No. 2 Vertical Milling Machines* (p. 2), por Brown & Sharpe Mfg. Co., 1944, Providence

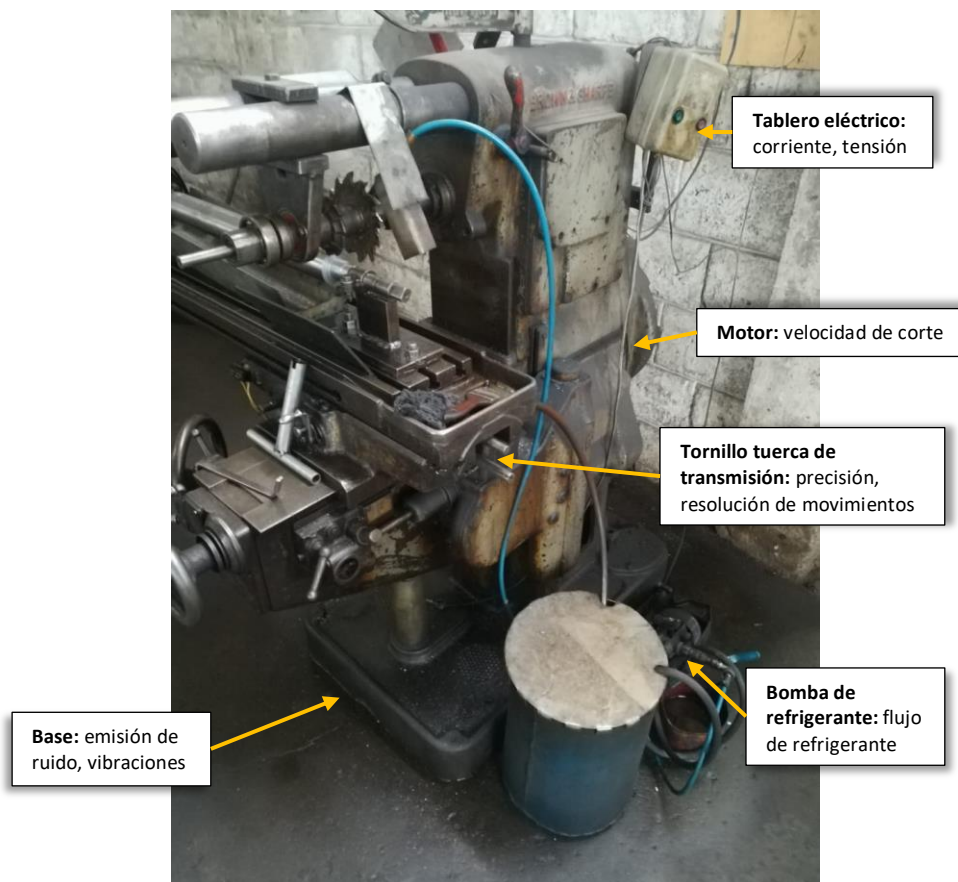
Diagnóstico de la fresadora

La fresadora Brown & Sharpe con la que trabaja la empresa Castro Maquinaria cuenta con 4 ejes de movimiento: el eje horizontal longitudinal o también llamado eje X, el eje horizontal transversal o también llamado eje Y, el eje vertical conocido como eje Z, y el eje de rotación respecto al eje X conocido como eje A, el cual se consigue con el acoplamiento del

cabezal divisor. Para determinar la funcionalidad de la fresadora se deben identificar las distintas variables que intervienen en su desempeño. En la figura 2, se pueden observar los elementos de la fresadora con algunas de las variables asociadas al estado de la misma.

Figura 2

Elementos de la fresadora con variables asociadas a su estado



Los elementos indicados en la figura 1 no presentan averías o inconvenientes en cuanto a su funcionalidad, por lo que las variables asociadas al estado de la máquina se encontrarían dentro del rango permisible para que la fresadora realice su trabajo.

Debido al elevado costo que implica realizar un diagnóstico completo de la máquina, es decir, evaluar empleando los equipos necesarios para llevar a cabo las mediciones, pruebas o ensayos. Se ha optado por enfocarse primordialmente en la inspección de grietas o fisuras,

juntamente con un análisis sobre desgastes, ruidos, lubricación, sistema de refrigeración y del juego presente en los ejes de la máquina. De esta manera se describen aspectos importantes que han sido examinados para resolver los problemas que podría presentar la máquina antes de su automatización.

Inspección de grietas o fisuras

Al ser una máquina que posee más de 60 años de antigüedad, resulta importante analizar si presenta discontinuidades que sean perjudiciales para su estructura. Mediante un ensayo por líquidos penetrantes, en el cual se emplea un presupuesto moderado, se consigue determinar si la máquina presenta alguna discontinuidad superficial.

Debido a que se requiere de una certificación que permita validar la realización de este ensayo se ha optado por solicitar la ayuda de la empresa ITQM, que cuenta con personal capacitado y está especializada en efectuar ensayos no destructivos. Por lo que todo el procedimiento juntamente con el análisis de resultados se llevó a cabo bajo la supervisión de un inspector con certificación ASNT Nivel II en el método de líquidos penetrantes, empleando la norma SNT-TC-1A.

Para la realización de este ensayo se han empleado líquidos penetrantes visibles y autoemulsificantes de la marca Magnaflux, la cual “ofrece a los profesionales de END insumos químicos desarrollados y probados para maximizar la confiabilidad de los procesos de inspección por PND con ensayos por tinta penetrante” (Magnaflux, 2017). Como se puede apreciar en la figura 3, estos líquidos se pueden encontrar en el mercado en latas de aerosol.

Figura 3

Líquidos penetrantes Magnaflux empleados para la inspección de discontinuidades

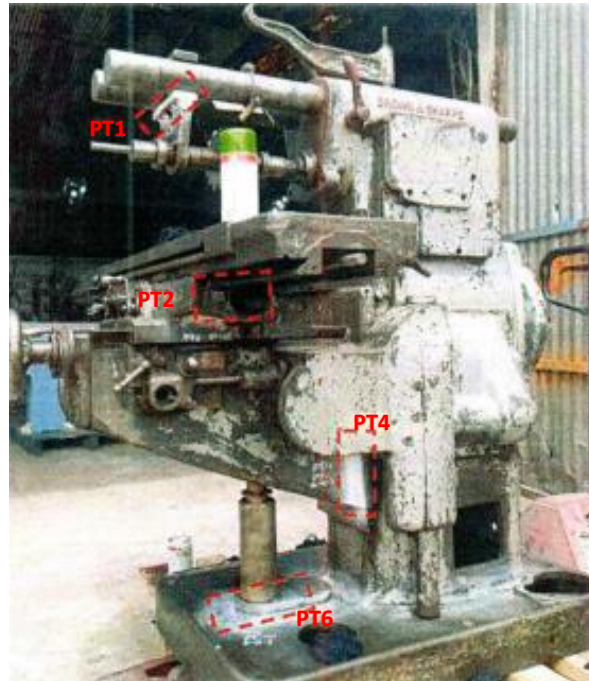


Nota. Se muestra el kit empleado para el ensayo por líquidos penetrantes. SKL-WP2 es el líquido penetrante y SKD-S2 el revelador. No es necesario un removedor como suele incluirse en otros kits, puesto que como se indicó anteriormente es un líquido penetrante autoemulsificante por lo que es removible con agua.

El ensayo ha sido aplicado a las juntas fundidas en la base de la estructura y a las juntas en la ménsula, que son las áreas donde la máquina posee una mayor concentración de esfuerzos. Adicionalmente, se ha realizado el ensayo en las juntas soldadas del soporte de árbol, el cual ha sido elaborado por la empresa reemplazando al de fábrica debido a problemas de vibración ocurridos hace algunos años. En las figuras 4 y 5, se muestran los esquemas de la fresadora donde se indican las juntas inspeccionadas. Los resultados del ensayo se presentan seguidamente en la tabla 2.

Figura 4

Esquema lateral derecho de la fresadora con las juntas inspeccionadas

**Figura 5**

Esquema lateral izquierdo de la fresadora con las juntas inspeccionadas

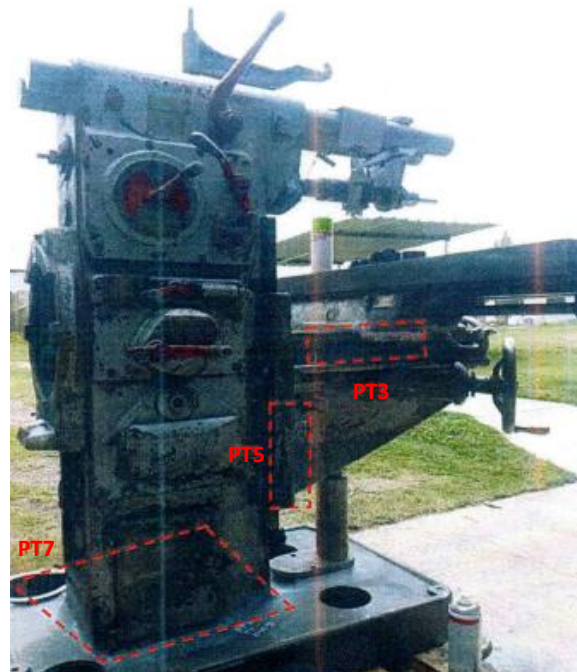








Tabla 2*Resultados del ensayo por líquidos penetrantes*

Elemento	Juntas	Resultado	Registro fotográfico
Soporte de árbol	PT1	Defecto de fusión incompleta	
Ménsula	PT2	No muestra discontinuidades	
	PT3	No muestra discontinuidades	
	PT4	No muestra discontinuidades	
	PT5	No muestra discontinuidades	
	Base	PT6	No muestra discontinuidades
PT7		No muestra discontinuidades	

En general, la estructura de la máquina no presenta grietas superficiales que puedan perjudicar su funcionamiento, sin embargo, la pieza fabricada por la empresa como el soporte de árbol muestra una fusión incompleta. Este defecto resulta ser peligroso debido a que se traduce en una unión débil o deficiente, por lo que lo recomendable según (Murillo Sigero, 2010) es establecer un método de remoción del defecto, que al ser un defecto superficial

puede ser removido por esmerilados o desbastados, para posteriormente preparar el área a soldar y realizar la soldadura empleando el procedimiento calificado (pp. 29-30).

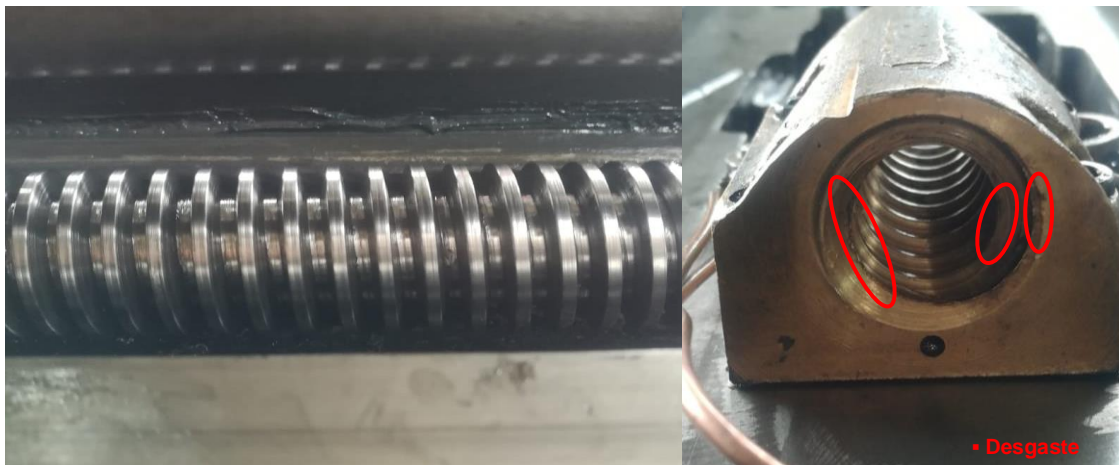
Análisis de desgaste

Se ha realizado un desmontaje e inspección visual, enfocándose en el tornillo-tuerca del eje longitudinal de la mesa de trabajo, puesto que es el eje a automatizar, y en los engranajes encargados de transmitir el movimiento del eje del motor hacia la caja de engranajes, los cuales se encuentran al alcance y además de desgaste presentan deformación.

Desgaste en el tornillo-tuerca del eje longitudinal. En la figura 6 se pueden apreciar el tornillo y tuerca de transmisión mecánica del eje longitudinal indicando la presencia de desgaste abrasivo en parte de la tuerca.

Figura 6

Tornillo y tuerca de transmisión del eje longitudinal de la máquina



Nota. El tornillo no presenta ningún tipo de desgaste, mientras la tuerca sí posee desgaste de tipo abrasivo en su extremo, las marcas de desgaste se muestran encerradas en color rojo.

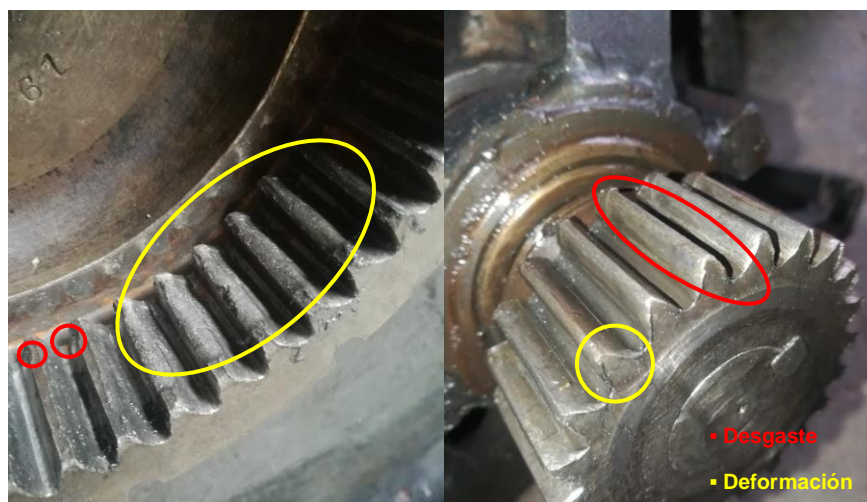
Según (Motion & Control NSK, 2017) “este desgaste tiene como probables causas la lubricación insuficiente, la intrusión de contaminación, o la desalineación”. Estos son aspectos

que efectivamente presenta la máquina debido a que no se le ha realizado un mantenimiento en un largo tiempo. Resulta recomendable considerar el reemplazo de estos elementos puesto que, a pesar de que sea un desgaste mínimo, le resta precisión a la máquina.

Desgaste en la entrada a la caja de engranajes. En la figura 7 se muestra el desgaste y la deformación producida en los engranajes de entrada a la caja de engranajes de la máquina

Figura 7

Transmisión de entrada a la caja de engranajes de la máquina



Nota. Esta transmisión se realiza mediante un engranaje interno y un piñón, en el engranaje interno se indican desgastes por erosión, encerrados en color rojo, y una gran cantidad de deformación plástica por flujo en caliente, encerrada en color amarillo; mientras que en el piñón se puede apreciar desgaste abrasivo, encerrado en color rojo, y deformación por aplastamiento, encerrada en color amarillo.

Según (Espejo Mora & Martínez, 2008) este tipo de desgastes y deformaciones en los engranajes están relacionados con algunas causas como la falta de lubricación y su transmisión abierta, por lo que estos aspectos deben corregirse. Adicionalmente, es necesario

reemplazar estos engranajes debido a las fallas evidenciadas, que darán lugar a fracturas donde la pérdida de dientes es total.

Análisis de ruidos

Mediante el uso de un estetoscopio industrial se identifican ruidos intermitentes provenientes de la base de la máquina, específicamente en donde se encuentra situado el motor. El ruido no proviene del motor sino de su base de acople a la estructura de la máquina, esto se debe a que hace varios años la empresa reemplazó el motor de fábrica por otro motor trifásico, el cual se adecuó a la base de la máquina en la parte trasera, realizando una transmisión mediante poleas a los engranajes de entrada de la caja de engranajes. De la misma manera, se identifican ruidos fluctuantes e impulsivos en los engranajes de entrada a la caja de engranajes, esto se debe evidentemente a su desgaste y deformación evidenciados en el análisis de desgaste. En la figura 8 se indican los lugares de la máquina donde se concentran estos ruidos.

Figura 8

Lugares con concentración de ruidos en la máquina



Nota. Las zonas donde se genera el ruido se encuentran señaladas en color verde.

Por lo tanto, para evitar que se generen vibraciones en la fresadora es importante reposicionar el motor encargado de girar el husillo porta herramientas, asegurándolo firmemente a la estructura de la máquina, además de reemplazar los engranajes de entrada, lo cual es primordial debido al desgaste.

Los rodamientos en los diferentes elementos de la máquina, como los ejes de desplazamiento, el soporte de árbol y husillo portaherramientas no presentan sonidos de ruido, los cuales son perjudiciales para su funcionamiento.

Análisis del lubricante y sistema de refrigeración

La lubricación de los elementos internos de la máquina fue realizada hace aproximadamente dos años como parte de su mantenimiento, la máquina cuenta con tres bombas encargadas de proporcionar lubricante a la columna, ménsula y sillín. Sin embargo, las mangueras de distribución están rotas u obstruidas, por lo que resulta necesario realizar una lubricación de estos lugares y una limpieza de las guías de deslizamiento en la ménsula y mesa de la fresadora. Igualmente será necesario realizarle este mantenimiento al cabezal divisor.

En cuanto al sistema de refrigeración, la bomba que emplea el sistema actualmente ha sido incluida por la empresa como una pequeña modificación al sistema de refrigeración anteriormente empleado dentro de la fresadora. Este sistema es funcional, sin embargo, se analizará su modificación dentro de las adecuaciones en su estructura mecánica para que sea empleado de la manera más eficiente.

Análisis del juego presente en los ejes de desplazamiento

Las fresadoras convencionales, al emplear tornillos de potencia como mecanismo de transmisión de movimiento, poseen cierto juego. Para determinar esta medida se ha girado la manivela de cada eje comprobando el respectivo desplazamiento, los resultados de estas pruebas se presentan en la tabla 3.

Tabla 3*Desplazamiento en los ejes de la fresadora*

	Eje x		Eje y		Eje z	
	Giro (°)	Desplaz. (mm)	Giro (°)	Desplaz. (mm)	Giro (°)	Desplaz. (mm)
Sentido horario	360	6.3	360	2.5	360	3
	720	12.5	720	5	720	7
	1080	19	1080	7.5	1080	10.5
	1800	31.5	1800	12.5	1800	16
	3600	63	3600	25	3600	29
Sentido antihorario	360	6.2	360	2.5	360	2.5
	720	12.5	720	5	720	6
	1080	19	1080	7.5	1080	8
	1800	31.5	1800	12.5	1800	16
	3600	63	3600	25	3600	32

Como se puede apreciar en la tabla 3, los valores poseen cierta variación, para determinar esta medida se emplea la teoría de errores, la cual permitirá encontrar una medida de juego aproximada. Según (Torrelavega, 2002) el error cuadrático define el error que se tiene con el valor verdadero (p. 3). Por lo cual se ha calculado el valor del error medio de la media cuadrática considerando los pasos de la tuerca de cada eje.

En el eje X se tienen los siguientes valores de desviaciones mostrados en la tabla 4.

Tabla 4*Desviaciones en los desplazamientos del eje X*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n=10
δ	1	1	0,5	-0,5	-2,5	0	1	0,2	-0,5	-3	$\Sigma\delta^2$
δ^2	1	1	0,25	0,25	6,25	0	1	0,04	0,25	9	19,04

Por lo cual calculando el error cuadrático mediante la ecuación 1, donde ϵ_m representa el error cuadrático, $\sum \delta^2$ es la suma de los cuadrados de cada desviación, la cual se estableció en la tabla 4 y n es el número de muestras realizadas, que es igual a 10, de esta manera se tiene que:

$$\epsilon_m = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}} \quad (1)$$

$$\epsilon_m = \pm \sqrt{\frac{19.04}{10}} = 1.379$$

Con lo cual se puede aproximar un valor de juego de $\pm 1.38\text{mm}$ en el eje X.

En el eje Y se tienen los siguientes valores de desviaciones mostrados en la tabla 5.

Tabla 5

Desviaciones en los desplazamientos del eje Y

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n=10
δ	0	-0,5	-0,5	-1	-2,5	0	-0,5	-0,2	-0,8	-2,2	$\sum \delta^2$
δ^2	0	0,25	0,25	1	6,25	0	0,25	0,04	0,64	4,84	13,52

Al calcular del mismo modo que en el eje X, mediante la ecuación 1, se obtiene que el valor del juego en el eje Y se puede aproximar a $\pm 1.16\text{mm}$. En el eje Z se tienen los siguientes valores de desviaciones mostrados en la tabla 6.

Tabla 6

Desviaciones en los desplazamientos del eje Z

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n=10
δ	0	-1	-1,5	-1	1	0,5	0	1	-1	-2	$\sum \delta^2$
δ^2	0	1	2,25	1	1	0.25	0	1	1	4	11,5

Al calcular del mismo modo que en el eje X y en el eje Y, mediante la ecuación 1, se obtiene que el valor del juego en el eje Z se puede aproximar a $\pm 1.07\text{mm}$.

Para determinar la holgura en la tuerca del eje longitudinal se ha realizado una prueba desplazando la mesa las mismas distancias que se presentan en la tabla 3, la prueba consiste en tomar un punto de referencia para mover la mesa hacia la izquierda regresando al mismo punto, y posteriormente hacia la derecha regresando al mismo punto, el desfase que existe respecto al punto inicial con el punto final es de 1.11mm siendo este el dato de la holgura en la tuerca.

Línea base de la empresa

La empresa Castro Maquinaria, dedicada a la industria metalmecánica y construcción de maquinaria para labrar madera, al realizar un análisis exhaustivo de su situación actual como empresa, en las áreas de marketing, producción y financiación, desarrolla estrategias y planes de acción con el objetivo de obtener un crecimiento que le permita mejorar su trabajo consiguiendo mayor éxito en el mercado.

Como una de las estrategias dentro del área de producción, se plantea la automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de una de sus fresadoras antiguas, favoreciendo el proceso de mecanizado de ejes estriados.

Demanda de ejes estriados en la construcción de máquinas

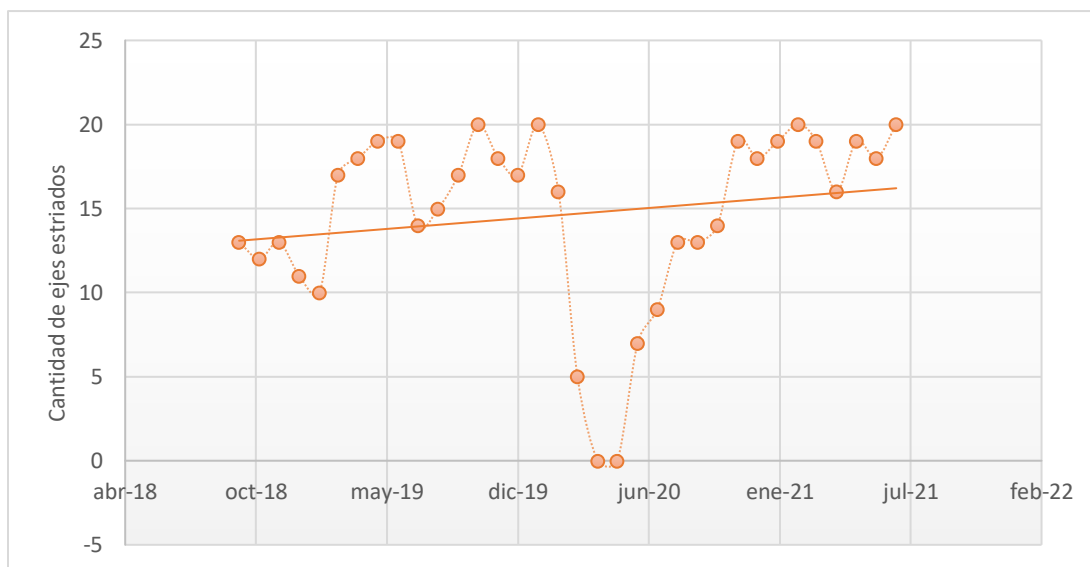
Los ejes estriados son piezas empleadas en gran parte de la maquinaria construida por la empresa, siendo un componente clave en la implementación de máquinas cepilladoras de madera, las cuales cuentan con diferentes medidas y pueden ser de tres tipos: simples, dobles y de cuatro caras. En los últimos dos años la empresa ha presenciado un incremento de

aproximadamente el 20% en los pedidos de estas máquinas, teniendo por consiguiente una demanda de producción de ejes estriados.

Cabe resaltar que, a mediados del mes de marzo del año 2020, debido al arribo de la enfermedad por coronavirus al país, la producción de la empresa fue paralizada por tres meses. Lo cual significó un descenso abrupto de la demanda de maquinaria, sin embargo, a pesar de esta crisis la empresa consiguió adaptarse a la nueva normalidad y retomar su ritmo de trabajo empleando las debidas normas de bioseguridad. En la figura 9 se puede apreciar una gráfica de dispersión que indica como ha incrementado la demanda de ejes estriados en los últimos tres años.

Figura 9

Demanda de producción de ejes estriados mensual (Oct2018 – Jul2021)



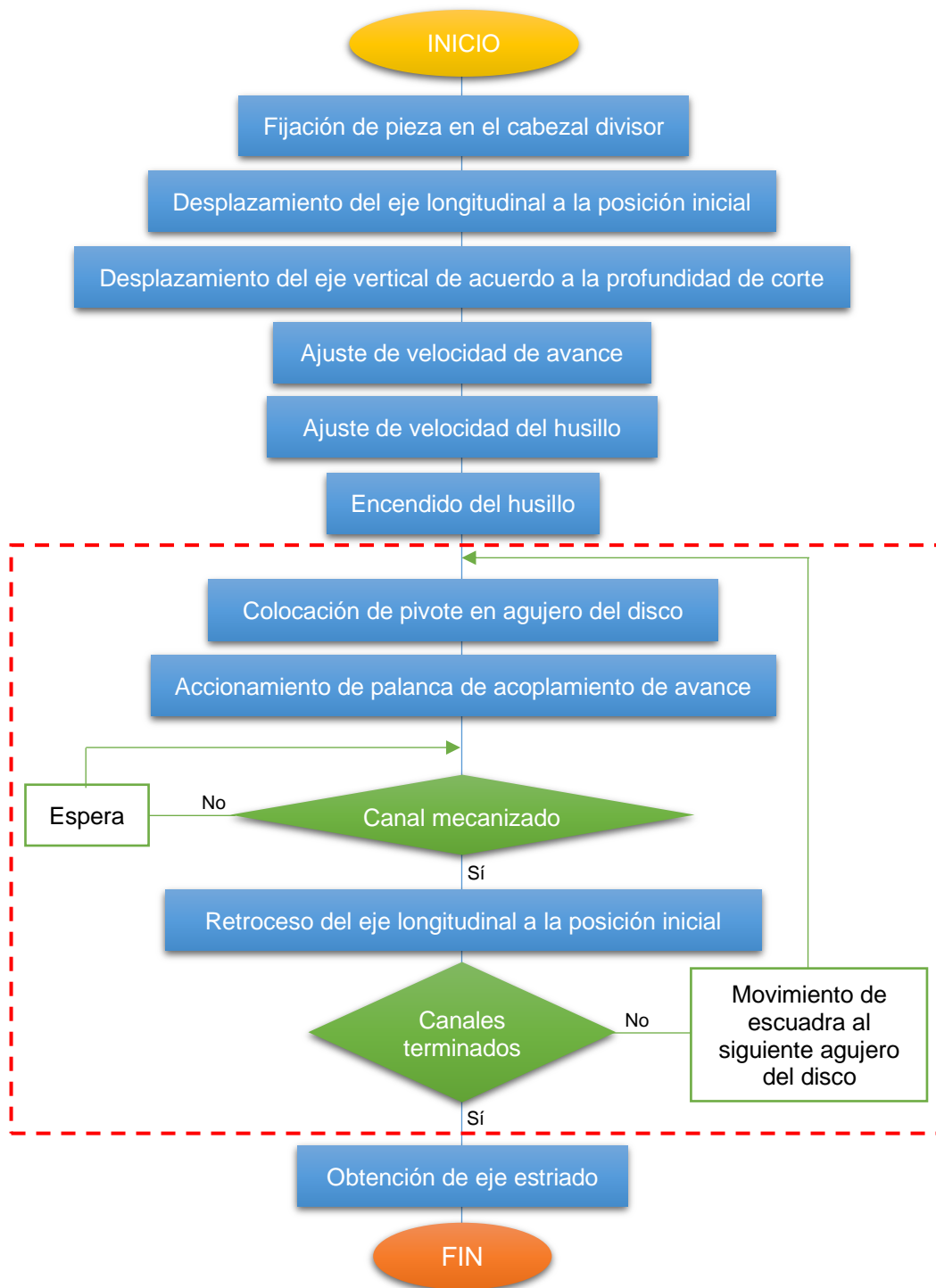
Nota. En la gráfica se puede observar mediante la línea de tendencia como la cantidad de ejes estriados aumenta en el transcurso del tiempo.

Proceso de producción de ejes estriados

El proceso de producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria conlleva una serie de procedimientos realizados con la ayuda de tres distintas máquinas. En primer lugar, se emplea una máquina de sierra de cinta que cumple la función de cortar el eje de acero de transmisión AISI 1018, entregado por el proveedor de la empresa, a la longitud que se requiera; después se hace uso de un torno CNC que cilindra la pieza de acuerdo a las medidas necesarias; finalmente, la fresadora se encarga de mecanizar los canales que le dan la forma final al eje estriado, siendo este último proceso o subproceso el que genera un cuello de botella en la línea de producción de ejes estriados. En la figura 10 se puede apreciar un diagrama de flujo indicando el procedimiento que realiza el operario al mecanizar un eje estriado con la fresadora horizontal Brown & Sharpe, en el recuadro rojo se muestra a su vez la parte del proceso que se requiere simplificar con la automatización de la máquina.

Figura 10

Diagrama de flujo del proceso de mecanizado de ejes estriados mediante la fresadora



Capacidad de producción en el mecanizado de ejes estriados

Primordialmente, el análisis de la capacidad de producción en el mecanizado de ejes estriados mediante la fresadora horizontal Brown & Sharpe requiere establecer los tiempos característicos de este proceso, los cuales se presentan en la Tabla 7. En el Takt time se ha establecido una relación de producción entre los diferentes tipos de ejes considerado el valor más alto al cual tiende la demanda, que corresponde a 20 unidades al mes, basándose en la figura 9 sobre la demanda de ejes estriados en la construcción de máquinas. Seguidamente en la figura 11 se presenta un gráfico de barras comparando el tiempo de flujo con el takt time, visualizando como existe una diferencia notoria entre ambos.

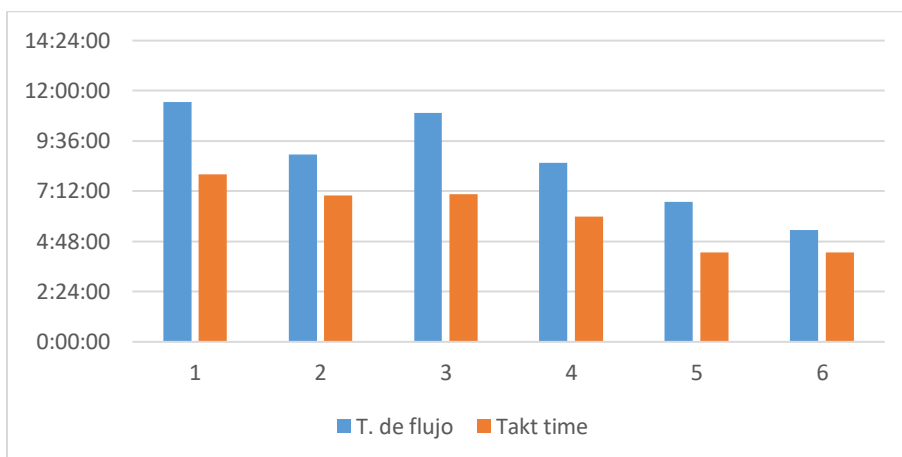
Tabla 7

Tiempos característicos del mecanizado de ejes estriados en la fresadora

Parámetros de eje estriado			Tiempo de proceso	Tiempo de flujo	Tiempo de ciclo de proceso	Takt time
Diámetro (in)	Largo (cm)	# de estrías	(hh:mm:ss)	(hh:mm:ss)	(hh:mm:ss)	(hh:mm:ss)
3	60	32	09:54:25	11:27:25	22:59:50	08:00:00
		25	07:45:09	08:57:00	17:59:18	07:00:00
2.5	60	32	09:53:54	10:55:54	21:56:48	07:03:32
		25	07:44:45	08:32:45	17:10:30	06:00:00
2	40	25	05:53:30	06:41:30	13:28:00	04:17:09
		20	04:43:30	05:21:30	10:48:00	04:17:09

Figura 11

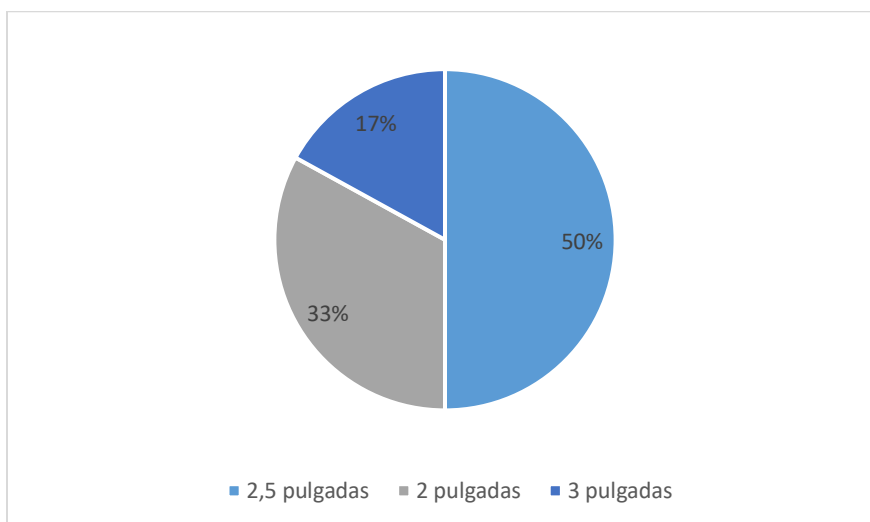
Comparación entre el tiempo de flujo y el takt time en la producción de ejes estriados



Aproximadamente el 50% de la demanda corresponde a ejes de 2.5 pulgadas, el 33% a ejes de 2 pulgadas y el 17% restante a ejes de 3 pulgadas, como se muestra a continuación en el diagrama de pastel de la figura 12.

Figura 12

Demanda de ejes estriados según su tamaño



Debido a que el tiempo de ciclo de proceso se considera como la inversa de la capacidad, ya que toma en cuenta todos los aspectos que pueden representar tiempos de

espera o retrasos en el proceso de producción, la capacidad de producción se deduce de este valor, de esta manera, en la Tabla 8 se presenta la capacidad de producción de ejes estriados. Esta capacidad considera 6 horas diarias de trabajo que un operario de la empresa emplea en el manejo de la fresadora, debido a la demanda este tiempo suele extenderse de 20 a 40 minutos extra por semana. Cabe aclarar que los operarios de las distintas máquinas en la empresa realizan diversas labores adicionales relacionadas con la mano de obra, como ensamble, mantenimiento, soldadura, etc. Por lo que la automatización permite a su vez optimizar esta mano de obra. En la figura 13 se puede apreciar mediante un gráfico de barras como la capacidad de producción varía primordialmente en función de la cantidad de estrías.

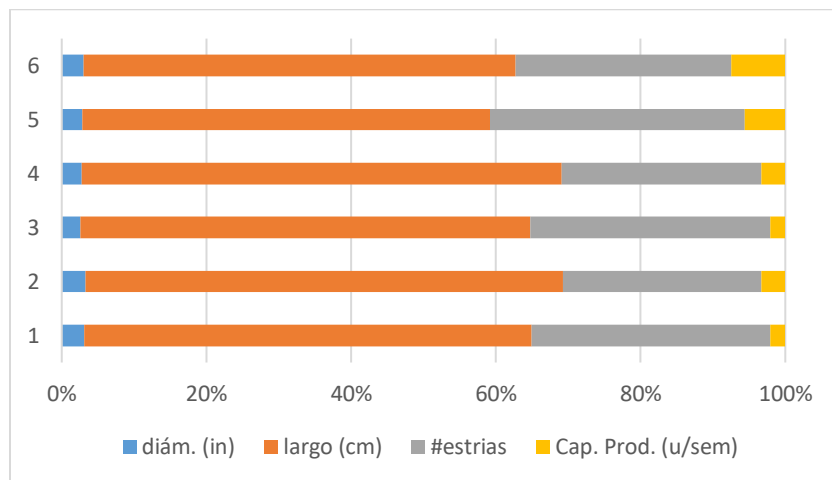
Tabla 8

Capacidad de producción del mecanizado de ejes estriados en la fresadora

Ord.	Parámetros de eje estriado			Capacidad de producción (Unidades/semana)
	Díámetro (in)	Largo (cm)	# de estrías	
1	3	60	32	2
2			25	3
3	2.5	60	32	2
4			25	3
5	2	40	25	4
6			20	5

Figura 13

Parámetros del eje estriado respecto a la capacidad de producción



Otro aspecto importante considerado por la empresa es el manejo del lote óptimo de producción, el cual se relaciona con la demanda y la capacidad del ensamble de máquinas en la empresa. En la empresa Castro Maquinaria, los lotes de producción se establecen dependiendo del tipo de máquina que solicite el cliente, puesto que cada máquina emplea cierto tipo y cantidad de ejes estriados.

Capítulo III

Diseño y selección

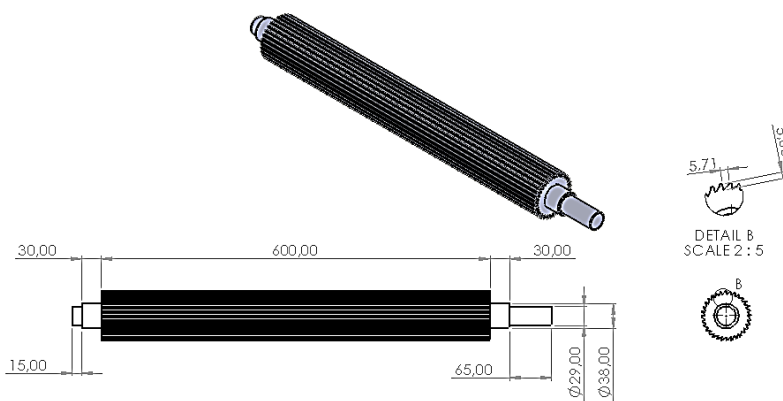
Para el diseño de este proyecto se parte de los parámetros de mecanizado necesarios para el fresado de ejes estriados, con lo cual se establecen los parámetros de diseño de tal manera que, mediante el método ordinal de criterios ponderados, se determine la mejor alternativa de solución para la empresa. Con lo cual se procede a realizar el diseño mecánico, y la selección de componentes electrónicos y del sistema de control; permitiendo así la correcta implementación del proyecto.

Parámetros de mecanizado del proceso de fresado de ejes estriados

Para la obtención de los parámetros de fresado de ejes estriados se comienza analizando la pieza a mecanizar, es decir su plano, se ha tomado como referencia el eje estriado con mayor profundidad de corte y cantidad de divisiones, puesto que esto aumenta la complejidad del mecanizado, en la figura 14 se presenta el dibujo mediante CAD del eje estriado con una profundidad de corte de 5mm y 32 divisiones. Para mayor detalle se muestra el plano en el Anexo 1.

Figura 14

Dibujo del eje estriado con características de mayor complejidad en el mecanizado



Nota. Las medidas se encuentran en milímetros

El material por mecanizar, de todos los ejes estriados producidos por la empresa, es acero AISI 1018 y la operación que efectúa la fresadora es un ranurado mediante fresado periférico en oposición. Teniendo esto en consideración, se selecciona la fresa de disco R335.10-160-04.40-12 del catálogo 2021.2 Fresado de Seco Tools, debido a que es la indicada para ranurados de ancho reducido siendo de fácil manipulación y ajuste. Para la cual a su vez se seleccionan las plaquitas o insertos 150.10-4N-14 CP600 P12, apropiados para trabajar con acero de transmisión. Su sujeción se realiza mediante anillos de arrastre 335.10-16340, mientras que los insertos se fijan por amarre elástico. Para la sujeción de la pieza a mecanizar se requiere de un contrapunto y del cabezal divisor.

Al contar con las herramientas y consideraciones mencionadas, se procede a realizar el cálculo de los parámetros de corte. Partiendo de los datos de la herramienta, que, según el catálogo de Seco Tools, cuenta con un número de dientes (Z) igual a 12, y posee un diámetro (d) de 160mm. Además, su avance por diente (a_z) es de 0.06mm y se recomienda mecanizar a una velocidad de corte (V_c) de 90 m/min, para el inserto seleccionado. Obteniendo la velocidad del husillo (N) con la ecuación 2, el avance (f) con la ecuación 3 y el tiempo de mecanizado (T_m) con la ecuación 4, en el cual se considera la longitud de mecanizado $L_m = 600 \text{ mm}$.

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \quad (2)$$

$$f = Z \cdot a_z \cdot N \quad (3)$$

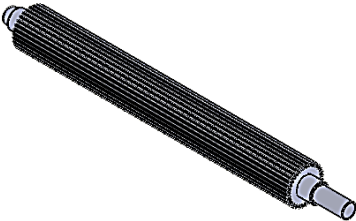
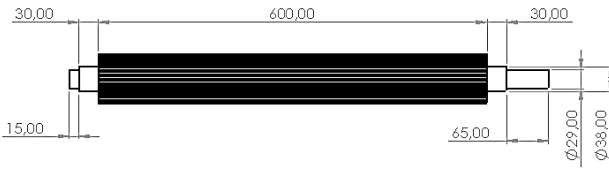
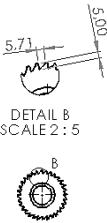
$$T_m = \frac{L_m}{f} \quad (4)$$


De esta manera, estos datos sobre los parámetros de corte necesarios para el diseño del proyecto se resumen a continuación en la tabla 9.

Tabla 9

Hoja de proceso de fresado de ejes estriados con herramienta del catálogo 2021.2 Fresado de Seco Tools

Castro Maquinaria			
Hoja del proceso de mecanizado de ejes estriados			
Responsable:	Christopher Rodríguez	Revisado por:	Ing. Fausto Acuña
Fecha de Realización:	17/02/2022	Fecha de presentación:	

Operación	Parámetros	Herramientas	Esquema del proceso
Ranurado	Vc: 90 m/min	<u>Herramienta de corte</u>	
mediante	N: 180 rpm	Nombre: Plaquita de ranurado	
fresado	f: 129 mm/min	Designación: 150.10-4N-14 CP600	
periférico en	p: 5 mm		
oposición	Tm: 4min39s por ranura	<u>Sujeción de herramienta</u>	
		Nombre: Fresa de disco Designación: R335.10-160-04.40-12	
		<u>Sujeción de pieza</u> Nombre: Cabezal divisor y contrapunto	

Nota. Vc, representa la velocidad de corte; N la velocidad del husillo portaherramientas; f la velocidad de avance; p la profundidad de corte; y Tm el tiempo de mecanizado para cada ranurado.

Sin embargo, la empresa Castro Maquinaria cuenta con una fresa convencional con la cual se realiza este trabajo, por lo cual requiere que el diseño del proyecto se realice en base a esta herramienta, la cual no dispone de datos de mecanizado del fabricante.

Debido a esto se toma como referencia el tipo y características de la herramienta, la cual es de acero al carbono, y de dientes fresados. Refiriéndose a la velocidad de corte, según Salazar & Rossi (2019) al ser una fresa de dientes fresados de acero rápido que mecaniza acero AISI 1018, el cual es acero dulce que posee una resistencia mecánica de hasta 55 kg/mm², la velocidad de corte recomendada se encuentra entre 18 a 25m/min (p. 15). La empresa requiere únicamente del desbaste en el mecanizado, por lo cual se considera la velocidad menor de 18m/min.

En cuanto al avance por diente se refiere, se toma en cuenta que, para una fresa de disco o una fresa de ranurado en fresado periférico, de acero rápido, que realiza el desbaste de acero dulce, considerando una profundidad de corte de hasta 10mm, se emplea un avance por diente de 0.1 a 0.2 mm (Urrego Ospina, 2010).

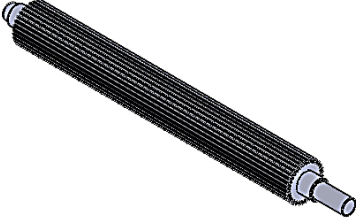
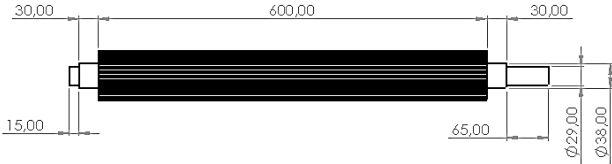
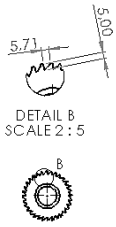
Para los cálculos se usa el avance menor de 0.1 mm por diente puesto que este valor proporciona una mayor potencia de corte. Esta fresa posee 12 dientes y un diámetro de 145 mm.


Gracias a estos datos se calculan los parámetros de corte requeridos para mecanizar ejes estriados con la herramienta ya usada por la empresa mediante las ecuaciones 2, 3 y 4. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10

Hoja de proceso de fresado de ejes estriados con herramienta usada por la empresa

Castro Maquinaria			
Hoja del proceso de mecanizado de ejes estriados			
Responsable:	Christopher Rodríguez	Revisado por:	Ing. Fausto Acuña
Fecha de Realización:	17/02/2022	Fecha de presentación:	

Operación	Parámetros	Herramientas	Esquema del proceso
Ranurado mediante fresado periférico en oposición	Vc: 18 m/min N: 40 rpm f: 47 mm/min p: 5 mm Tm: 12min40s por ranura	<u>Herramienta de corte</u> Nombre: Fresa convencional usada por la empresa <u>Sujeción de pieza</u> Nombre: Cabezal divisor y contrapunto	

Nota. Vc, representa la velocidad de corte; N la velocidad del husillo portaherramientas; f la velocidad de avance; p la profundidad de corte; y Tm el tiempo de mecanizado para cada ranurado.

El cálculo de la potencia de corte se establece posteriormente, siendo requerido para realizar el análisis del rendimiento de la máquina; y la fuerza de corte se establece en el diseño mecánico, donde es necesaria para determinar el torque resistivo en el eje longitudinal.

Estado inicial de la máquina

Como se determinó en el diagnóstico de la fresadora, sus elementos no presentan fallas en su funcionamiento, y las pruebas de discontinuidades a su estructura muestran buenos resultados. Sin embargo, los análisis de desgaste y ruido hacen necesario considerar las modificaciones que se le han realizado a la máquina para que el diseño y la implementación se realicen de manera eficaz.

Modificaciones en la máquina

Debido a la antigüedad de la máquina, ésta presenta algunas modificaciones que se le han realizado por problemas en el funcionamiento de sus componentes de fábrica a lo largo de su estancia en la empresa. Estas modificaciones se presentan en la Tabla 11, junto a las acciones que se consideran en la etapa de diseño.

Tabla 11

Modificaciones en la fresadora a lo largo de su estancia en la empresa

Elemento	Modificaciones	Acciones al respecto
Motor del eje portaherramientas	Sustitución por motor trifásico Posicionamiento del motor en la base de la estructura Incorporación de tablero eléctrico para su encendido y apagado	Reposicionamiento del motor, incorporación del tablero en el sistema eléctrico.
Bomba de refrigeración	Sustitución de bomba y contenedor para refrigerante Posicionamiento de la bomba y contenedor a un costado de la fresadora	Sustitución de contenedor y reposicionamiento de bomba

Rendimiento de la fresadora con el motor incorporado por la empresa

Para verificar que la máquina trabaje adecuadamente es necesario verificar su rendimiento, para ello se parte del cálculo de la potencia de corte que requiere el mecanizado, ésta se puede hallar mediante la ecuación 5.

$$P_c[kW] = \frac{A_c[mm] \cdot p[mm] \cdot f \left[\frac{mm}{min} \right] \cdot k_c \left[\frac{N}{mm^2} \right]}{60 \left[\frac{s}{min} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{mm}{m} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{W}{kW} \right] \cdot \rho} \quad (5)$$

Donde: A_c es el ancho de corte, y p es la profundidad de pasada, que son datos que dependen de la geometría de la fresa, de tal manera que la mayor profundidad de corte con la cual trabaja la empresa es de 10 mm con un ancho de corte de 5 mm aproximadamente; f es la velocidad de avance, la cual fue calculada previamente para la hoja de datos del proceso de fresado de ejes estriados; k_c es la fuerza específica de corte, que según (Mitsubishi Materials, 2014) corresponde a 2200 N/mm² al trabajar a un avance de 0.1mm/diente mecanizando acero dulce; y ρ es el rendimiento de la fresadora, que de acuerdo con (Bartsch, 2020) “puede suponerse un valor de 0.6 para máquina a plena carga” (p. 104).

Al reemplazar los valores en la ecuación 5, se tiene que:

$$P_c[kW] = \frac{(5mm) \cdot (10mm) \cdot \left(47.41 \frac{mm}{min}\right) \cdot \left(2200 \frac{N}{mm^2}\right)}{60 \left[\frac{s}{min} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{mm}{m} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{W}{kW} \right] \cdot 0.6}$$

$$P_c = 0.1448kW$$

De esta manera se evidencia que la potencia de corte en este mecanizado, es decir la potencia útil es de 0.194 HP, mientras que la potencia total entregada por el motor trifásico incorporado en la máquina por parte de la empresa es de 3 HP, teniendo un rendimiento en la máquina de 0.064, lo cual significa que existe un alto desperdicio de energía, siendo lo recomendable reemplazar el motor por uno de menor potencia.

Parámetros de diseño

Casa de la calidad o matriz QFD de planificación del proyecto

Las necesidades de la empresa con mayor relevancia en la realización de este proyecto comprenden el uso de un presupuesto moderado, la simplicidad en la programación, la interacción amigable con el operario, la seguridad adecuada para el operario y la precisión idónea de movimientos en el mecanizado. En la figura 15 se traducen estas necesidades mediante la matriz QFD de planificación del proyecto.

Figura 15

Matriz QFD de planificación del proyecto

		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fuerte</td> <td>● 9</td> </tr> <tr> <td>Moderada</td> <td>○ 3</td> </tr> <tr> <td>Baja</td> <td>▼ 1</td> </tr> </tbody> </table>						Correlación		Fuerte	● 9	Moderada	○ 3	Baja	▼ 1			
Correlación																		
Fuerte	● 9																	
Moderada	○ 3																	
Baja	▼ 1																	
		<table border="1"> <tr><td>19</td><td>5</td><td>17</td><td>4</td><td>15</td><td>1</td><td>14</td><td>5</td><td>14</td><td>1</td><td>17</td></tr> </table>						19	5	17	4	15	1	14	5	14	1	17
19	5	17	4	15	1	14	5	14	1	17								
		<table border="1"> <tr> <td>Importancia ponderada de los requisitos técnicos</td> <td>1,4</td> <td>1,2</td> <td>1,1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1,2</td> </tr> </table>						Importancia ponderada de los requisitos técnicos	1,4	1,2	1,1	1	1	1,2				
Importancia ponderada de los requisitos técnicos	1,4	1,2	1,1	1	1	1,2												
1: bajo, 5: alto →		<table border="1"> <tr> <td>INGENIERO ¿CÓMO?</td> <td>Componentes de bajo costo</td> <td>Controlador con software libre</td> <td>Pantalla HMI con interfaz amigable</td> <td>Tablero eléctrico normalizado</td> <td>Dispositivos de seguridad y finales de carrera</td> <td>Motores con controlador o encoders</td> </tr> </table>						INGENIERO ¿CÓMO?	Componentes de bajo costo	Controlador con software libre	Pantalla HMI con interfaz amigable	Tablero eléctrico normalizado	Dispositivos de seguridad y finales de carrera	Motores con controlador o encoders				
INGENIERO ¿CÓMO?	Componentes de bajo costo	Controlador con software libre	Pantalla HMI con interfaz amigable	Tablero eléctrico normalizado	Dispositivos de seguridad y finales de carrera	Motores con controlador o encoders												
Importancia para la empresa ↓		<table border="1"> <tr> <td>EMPRESA ¿QUÉ?</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> </table>						EMPRESA ¿QUÉ?	1	2	3	4	5	6				
EMPRESA ¿QUÉ?	1	2	3	4	5	6												
1	5	Presupuesto moderado	●	●	●	○	○	●										
2	4	Simplicidad de programación	●	●	▼	▼	○	○										
3	4	Interacción amigable	●	▼	●	○	○	▼										
4	3	Seguridad adecuada	○	▼	▼	●	●	▼										
5	3	Precisión idónea	●	▼	▼	▼	▼	●										
Importancia ponderada respecto al cliente (Absoluta)		153	91	83	59	69	85											
Importancia ponderada respecto al cliente (Relativa)		2,6	1,5	1,4	1,0	1,2	1,4											
Ev. Ponderada de los requisitos del cliente	ABSOLUTA	208	111	89	59	69	103											
	RELATIVA	3,5	1,9	1,5	1	1,2	1,7											

Estableciendo como requerimiento de diseño con mayor relevancia el adquirir componentes de bajo costo, lo cual se relaciona con la gran mayoría de los demás requerimientos, priorizando contar con un controlador con software libre, seguido de motores eléctricos con sus respectivos controladores o encoders y una pantalla HMI que permita desarrollar una interfaz amigable para el usuario.

Alternativas de solución

Gracias a la información obtenida hasta este punto, es oportuno analizar las alternativas de solución más adecuadas para el presente proyecto, éstas han sido evaluadas según el método ordinal corregido de criterios ponderados. Dentro de las alternativas de solución se consideran los componentes de los proyectos analizados previamente en el estado del arte, en el capítulo dos.

Método ordinal corregido de criterios ponderados

En este método se emplean tablas que permiten comparar las alternativas de solución, estableciendo los criterios de valoración más importantes. En cada tabla se asignan los valores siguientes: 1 si el criterio de las filas es superior que el de las columnas; 0.5 si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas; y 0 si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas. El procedimiento para usar este método se encuentra detallado en el libro "Diseño Concurrente" de Carles Riba Romeva. Según (Riba Romeva, 2002) este método "permite obtener resultados globales suficientemente significativos sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio" (p. 59).

Para establecer los criterios de valoración, se deben considerar las necesidades de la empresa por lo cual, como se determinó en la matriz QFD de planificación del proyecto, se requiere que los componentes empleados en las distintas áreas de ingeniería posean un bajo

costo, de manera que este criterio de valoración se encuentra presente en cada evaluación, acompañado de los demás criterios propios de cada aspecto del proyecto, los cuales también se encuentran presentes en la matriz QFD de planificación del proyecto, en la figura 15.

Mecanismo de transmisión de movimiento. Como se ha evidenciado en el estado del arte, lo óptimo para este tipo de proyectos es contar con un husillo de bolas, reemplazando el tornillo-tuerca de potencia con el que viene incorporado la máquina, por lo que únicamente en este ítem no se aplica el método ordinal corregido de criterios ponderados. Sin embargo, a pesar de que este cambio sea lo más recomendable, la empresa ha decidido usar el tornillo-tuerca de potencia convencional, consiguiendo de esta manera reducir costos al no tener como prioridad contar con una precisión elevada en el movimiento del eje longitudinal.

Mecánica y electrónica. Los motores que le proporcionan movimiento a los ejes esencialmente deben tener el torque adecuado a bajas velocidades debido al mecanizado de desgaste que realiza la máquina tanto en el eje longitudinal como en el cabezal divisor, y para el caso del cabezal divisor, el motor debe poseer una precisión adecuada al controlarse con su respectivo componente electrónico. Por lo que el peso específico de cada uno de los criterios de valoración fundamentales para los motores y su componente de control es evaluado en la tabla 12.

Tabla 12

Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en los motores con sus componentes de control

Precio > Torque a baja velocidad = Precisión

<i>Criterio</i>	<i>Precio</i>	<i>Torque a baja velocidad</i>	<i>Precisión</i>	$\Sigma+1$	<i>Pondera.</i>
<i>Precio</i>		1	1	3	0,5
<i>Torque a baja velocidad</i>	0		0.5	1.5	0,25
<i>Precisión</i>	0	0.5		1.5	0,25
			<i>Suma</i>	6	1

Dentro de las alternativas de solución para los motores con sus componentes de control se pueden emplear servomotores con encoders (solución A), o motores paso a paso con sus respectivos drivers (solución B). La evaluación de los pesos específicos de estas soluciones para los criterios de precio, torque a baja velocidad y precisión se presentan a continuación en las tablas 13, 14 y 15, respectivamente.

Tabla 13

Evaluación sobre precio en las alternativas para los motores con sus componentes de control

Solución B > Solución A

<i>Precio</i>	<i>Solución A</i>	<i>Solución B</i>	$\Sigma+1$	<i>Pondera.</i>
<i>Solución A</i>		0	1	0,333
<i>Solución B</i>	1		2	0,667
		<i>Suma</i>	3	1

Tabla 14

Evaluación sobre torque a baja velocidad en las alternativas para los motores con sus componentes de control

<i>Solución B > Solución A</i>				
<i>Torque a baja velocidad</i>	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		0	1	0,333
<i>Solución B</i>	1		2	0,667
		Suma	3	1

Tabla 15

Evaluación sobre precisión en las alternativas para los motores con sus componentes de control

<i>Solución A > Solución B</i>				
<i>Precisión</i>	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		1	2	0,667
<i>Solución B</i>	0		1	0,333
		Suma	3	1

Una vez evaluados estos criterios de valoración se establecen las conclusiones mediante la tabla 16, presentada a continuación.

Tabla 16

Conclusiones de las alternativas para los motores con sus componentes de control

<i>Conclusiones</i>	<i>Precio</i>	<i>Torque a bajas velocidades</i>	<i>Precisión</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Solución A</i>	0.1665	0.08325	0.16675	0.4165	2
<i>Solución B</i>	0.3335	0.16675	0.08325	0.5835	1

De esta manera se define a los motores a pasos con sus drivers como la mejor alternativa de solución, esto se debe en gran medida al elevado precio que involucra un servomotor industrial. Los motores paso a paso son más asequibles en la industria y cuentan con un mayor torque a bajas velocidades, además del denominado torque de anclaje el cual es de gran ayuda en el cabezal divisor. Si bien la mayoría de los proyectos del estado del arte recomiendan el servomotor; ya que al ser controlado mediante encoders, permite un control en lazo cerrado que a la vez asegura una mayor precisión o exactitud de posición; La precisión que se consigue mediante los motores a pasos con sus drivers que emplean un control de lazo abierto abastece las necesidades de la empresa, siendo que el eje longitudinal realiza el mecanizado de ejes estriados realizando desplazamientos en centímetros, y la precisión para el cabezal divisor puede llegar a ser altamente eficiente si se cumplen adecuadamente las condiciones de carga y velocidad.

Control del sistema. Como se ha ido evidenciando en el capítulo dos, la empresa requiere mecanizar ejes estriados para cumplir sus necesidades de producción, siendo necesaria una programación secuencial donde se varían los parámetros del eje a mecanizar, debido a este aspecto y al elevado costo que implica un controlador CNC, esta alternativa de solución queda descartada.

El controlador principal encargado de enviar y recibir las señales de todo el sistema debe trabajar con software libre, puesto que esto reduce el costo de su adquisición y facilita la programación al contar con el libre acceso al código fuente y la libertad de conocimiento para el programador a través de internet. La robustez del controlador es importante ya que debe funcionar en un ambiente industrial, y una adecuada velocidad de procesamiento permite que el proceso fluya apropiadamente.

Por lo que el peso específico de cada uno de los criterios de valoración fundamentales para el controlador del sistema es evaluado en la tabla 17.

Tabla 17

Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en el controlador del sistema

Precio = Software libre = Robustez > Velocidad de procesamiento

<i>Criterio</i>	Precio	Software libre	Robustez	Velocidad de procesamiento	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Precio</i>		0.5	0.5	1	3	0,3
<i>Software libre</i>	0.5		0.5	1	3	0,3
<i>Robustez</i>	0.5	0.5		1	3	0,3
<i>Velocidad de procesamiento</i>	0	0	0		1	0,1
				Suma	10	1

Dentro de las alternativas de solución para el controlador del sistema se pueden emplear un PLC (solución A), una placa SBC (solución B) o hasta un computador (solución C). La evaluación de los pesos específicos de estas soluciones para los criterios de precio, software libre, robustez y velocidad de procesamiento se presentan a continuación en las tablas 18, 19, 20 y 21, respectivamente.

Tabla 18

Evaluación sobre precio en las alternativas para el controlador del sistema

Solución B > Solución A > Solución C

<i>Precio</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		0	1	2	0,333
<i>Solución B</i>	1		1	3	0,5
<i>Solución C</i>	0	0		1	0,167
	Suma			6	1

Tabla 19

Evaluación sobre software libre en las alternativas para el controlador del sistema

Solución A = Solución B > Solución C

<i>Software libre</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		0.5	1	2.5	0,4165
<i>Solución B</i>	0.5		1	2.5	0,4165
<i>Solución C</i>	0	0		1	0,167
	Suma			6	1

Tabla 20

Evaluación sobre robustez en las alternativas para el controlador del sistema

Solución A > Solución C > Solución B

<i>Robustez</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		1	1	3	0,5
<i>Solución B</i>	0		0	1	0,167
<i>Solución C</i>	0	1		2	0,333
	Suma			6	1

Tabla 21

Evaluación sobre velocidad de procesamiento en las alternativas para el controlador del sistema

Solución C > Solución A > Solución B

<i>Velocidad de procesamiento</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		1	0	2	0,333
<i>Solución B</i>	0		0	1	0,167
<i>Solución C</i>	1	1		3	0,5
	Suma			6	1

Una vez evaluados estos criterios de valoración se establecen las conclusiones mediante la tabla 22, presentada a continuación.

Tabla 22

Conclusiones de las alternativas para el controlador del sistema

<i>Conclusiones</i>	<i>Precio</i>	<i>Soft. libre</i>	<i>Robustez</i>	<i>Vel. de proc.</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Solución A</i>	0.0999	0.12495	0.15	0.0333	0.40815	1
<i>Solución B</i>	0.15	0.12495	0.0501	0.0167	0.34175	2
<i>Solución C</i>	0.0501	0.0501	0.0999	0.05	0.2501	3

Por lo tanto, la alternativa de solución más adecuada como controlador del sistema para este proyecto es el PLC. Que, si bien no es la alternativa menos costosa, se destaca por su robustez y por incluir su propio software libre, dependiendo de la marca y modelo seleccionados. Seguidamente se encuentra la placa SBC, la cual podría ser una buena opción considerando su bajo costo, sin embargo, la robustez juega un papel importante al requerir una automatización industrial, y como se evidenció en el estado del arte, a pesar de que estas

placas se han ido empleando con mayor medida en los últimos años, son usadas primordialmente en prototipos o proyectos cuyo propósito no está enfocado en trabajar óptimamente dentro de un entorno industrial, existiendo la posibilidad de ser sometido a vibraciones, fallos de corto circuito, fluidos, etc.; por lo que su vida útil o durabilidad resulta ser mucho menor en comparación con la de un PLC. El computador se encuentra en último lugar debido a su alta diferencia de precio en comparación con las otras alternativas, además de que para que adquiriera robustez se debe adecuar a la máquina de una manera más compleja. Si se requiriera de una automatización completa en la máquina el computador podría adecuarse de mejor manera a los criterios de valoración.

Interfaz de usuario. La interfaz de usuario se traduce en emplear una pantalla HMI que permita el ingreso de datos por parte del operario, ésta debe ocupar dimensiones reducidas debido a que de esta manera se facilita su incorporación a la máquina y debe poseer un manejo sencillo para que su uso sea intuitivo para el operario.

Por lo que el peso específico de cada uno de los criterios de valoración fundamentales para la interfaz de usuario es evaluado en la tabla 23.

Tabla 23

Evaluación del peso específico de los criterios de valoración en la pantalla HMI

Precio > Dimensiones reducidas= Manejo sencillo

<i>Criterio</i>	Precio	Dimensiones	Manejo	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Precio</i>		1	1	3	0,5
<i>Dimensiones</i>	0		0.5	1.5	0,25
<i>Manejo</i>	0	0.5		1.5	0,25
			Suma	6	1

Dentro de las alternativas de solución para la pantalla HMI se pueden emplear un HMI Móvil (solución A), un HMI de panel (solución B), o un HMI de micro panel (Solución C).

La evaluación de los pesos específicos de estas soluciones para los criterios de precio, dimensiones y manejo se presentan a continuación en las tablas 24, 25 y 26, respectivamente.

Tabla 24

Evaluación sobre precio en las alternativas para la pantalla HMI

Solución C > Solución B > Solución A

<i>Precio</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		0	0	1	0,167
<i>Solución B</i>	1		0	2	0,333
<i>Solución C</i>	1	1		3	0.5
	Suma			6	1

Tabla 25

Evaluación sobre dimensiones en las alternativas para la pantalla HMI

Solución A > Solución C > Solución B

<i>Dimensiones</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
<i>Solución A</i>		1	1	3	0,5
<i>Solución B</i>	0		0	1	0,167
<i>Solución C</i>	0	1		2	0.333
	Suma			6	1

Tabla 26

Evaluación sobre manejo en las alternativas para la pantalla HMI

<i>Solución A > Solución C > Solución B</i>					
<i>Manejo</i>	<i>Solución A</i>	<i>Solución B</i>	<i>Solución C</i>	$\Sigma+1$	<i>Pondera.</i>
<i>Solución A</i>		0	0	1	0,167
<i>Solución B</i>	1		0	2	0,333
<i>Solución C</i>	1	1		3	0.5
	Suma			6	1

Una vez evaluados estos criterios de valoración se establecen las conclusiones mediante la tabla 27, presentada a continuación.

Tabla 27

Conclusiones de las alternativas para la pantalla HMI

<i>Conclusiones</i>	<i>Precio</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Manejo</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Solución A</i>	0.0835	0.125	0.04175	0.25025	3
<i>Solución B</i>	0.1665	0.04175	0.08325	0.2915	2
<i>Solución C</i>	0.25	0.08325	0.125	0.45825	1

Teniendo como la solución óptima para la interfaz de usuario el emplear una pantalla HMI de micro panel, esto debido al costo en primera instancia, y al manejo de esta pantalla, que resulta ser más comprensible y simple para el operario. La pantalla HMI de panel se encuentra en segundo lugar, al tener mayores dimensiones y poseer su funcionalidad de manera táctil en gran mayoría. La última alternativa es el HMI móvil que presenta un beneficio de dimensión muy superior al de las demás soluciones, puesto que no hay que preocuparse al conectarse inalámbricamente con el controlador, sin embargo, la diferencia de su costo es elevada.

Diseño del sistema mecánico

Cálculo del torque resistivo en el eje longitudinal (Eje X)

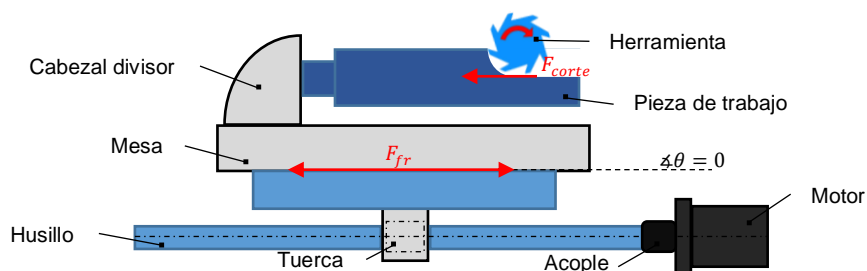
El cálculo del torque mínimo requerido por el motor precisa como dato el torque resistivo de la carga a velocidad constante, el cual es necesario para vencer la fricción y fuerzas externas. Según (Automationdirect, 2007) en un tornillo de transmisión de potencia el torque resistivo puede hallarse mediante la ecuación 6:

$$T_{Lresist} = \left((F_{total} \cdot P \div (2\pi\eta)) + T_{preload} \right) \div i \quad (6)$$

Donde la fuerza total, F_{total} , representa la sumatoria de todas las fuerzas externas; P representa el paso del tornillo; η es la eficiencia; $T_{preload}$ es el torque de precarga; e i es la razón de reducción del reductor de velocidad. Las fuerzas externas en este caso son la fricción y la carga en dirección al eje del husillo debido a la fuerza de corte, éstas se pueden visualizar en la figura 16.

Figura 16

Fuerzas externas presentes en el eje longitudinal



Nota. La fuerza de corte está representada como F_{corte} y la fuerza debido a la fricción como F_{fr}

La sumatoria de fuerzas externas F_{total} se calcula mediante la ecuación 7 mostrada a continuación.

$$F_{total} = F_A + m \cdot g(\sin \theta + \mu \cdot \cos \theta) \quad (7)$$

Donde el ángulo θ es el ángulo al cual está inclinado el sistema. Por lo que en este caso $\theta = 0$, como se mostró en la figura 16. Además, la fuerza $F_A = F_{corte}$ y en fresado es variable debido a la sección de viruta, que también es variable, y a la energía específica de corte, que depende del espesor de viruta que varía a lo largo del recorrido del diente (Bilbao, 2012). Sin embargo, según (González López, 2015) “la potencia de corte se puede calcular como el resultado de multiplicar la velocidad de corte y la fuerza de corte” (p. 39). Siendo así que despejando la fuerza de corte se obtiene la ecuación 8, con la cual se consigue un valor de la fuerza de corte aproximada.

$$F_{corte}(N) = \frac{P_c(W) \cdot 60(s/min)}{V_c(m/min)} \quad (8)$$

Tanto el valor de la potencia de corte P_c , como el de la velocidad de corte V_c para este caso ya han sido analizados. Reemplazando estos datos en la ecuación 9 se obtiene lo siguiente.

$$F_{corte} = \frac{194.295 W \cdot 60(s/min)}{18 m/min}$$

$$F_{corte} = 482.95 N$$

La mesa de la fresadora con el cabezal divisor incorporado tiene una masa de 560 kg, y se ha calculado mediante la ecuación 9, la masa de la pieza de trabajo o eje con mayores dimensiones m_{eje} , empleando como datos su volumen V_{eje} y la densidad del material d_m , ya que todos los ejes mecanizados en la empresa son de acero AISI 1018.

$$m_{eje} = d_m \cdot V_{eje} \quad (9)$$

$$m_{eje} = \left(7.9 \frac{g}{cm^3}\right) \cdot (\pi \cdot (3.81cm)^2 \cdot (60cm)) \cdot \frac{kg}{1000g}$$

$$m_{eje} = 21.616kg$$

El valor del coeficiente de rozamiento para este caso según (Koshkin & Shirkévich, 1975) es de 0.18 debido a que las superficies de deslizamiento son de acero. Por lo que la ecuación 8, proporciona como resultado:

$$F_{total} = 482.95N + (560kg + 21.616kg) \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) \cdot (0.18)$$

$$F_{total} = 1509.97N$$

Para el cálculo del torque de precarga, $T_{preload}$, se emplea el coeficiente de fricción interno en la tuerca μ_0 , el cual según (Juliá Lerma, 2019) es de 0.154, tomando en cuenta que la tuerca es de bronce y el tornillo de acero puesto que se implementará el sistema con el tornillo tuerca de transmisión propios de la fresadora.

Adicionalmente, se emplean en el cálculo la fuerza de precarga $F_{preload}$, la cual es aproximadamente un tercio de la fuerza total de acuerdo con (Orientalmotor, 2016); y el paso de la tuerca P . De esta manera, a continuación, se resuelve la ecuación 10, que proporciona el valor del torque de precarga.

$$T_{preload} = \frac{\mu_0 \cdot F_{preload} \cdot P}{2\pi} \quad (10)$$

$$T_{preload} = \frac{(0.154) \cdot (1509.97N/3) \cdot (0.006 \text{ m/rev})}{2\pi}$$

$$T_{preload} = 0.074Nm$$

Retomando la ecuación 6, se tiene que el torque resistivo es:

$$T_{Lresist} = \left((1509.97N \cdot (0.006 \text{ m/rev}) \div (2\pi \cdot 0.8)) + 0.074Nm \right) \div 1$$

$$T_{Lresist} = 1.876Nm$$

Este torque resistivo calculado no considera factores técnicos como la adecuada lubricación, ajuste de soportes y reglillas en la ménsula, etc. De no tener bajo control estos

factores mediante el debido mantenimiento, estos pueden incrementar significativamente el valor del torque resistivo.

Asimismo, se requiere un análisis de la velocidad a la que se realizará el movimiento, esto se consigue con el cálculo del torque de aceleración.

Medición experimental del torque resistivo en el eje longitudinal (Eje X)

Para tener una mayor certeza sobre el valor del torque resistivo obtenido mediante el cálculo teórico, adicionalmente se realiza una medición experimental donde se ha empleado un torquímetro de aguja de 0 a 200 Nm, colocando un acople al tornillo de potencia en el eje longitudinal y midiendo de esta manera el torque necesario para desplazar la mesa mientras se mecaniza el eje estriado. Para mayor detalle se muestra una imagen en el Anexo 2.

Como resultado se obtuvo un torque aproximadamente menor a 2 Nm. Por lo que el torque del motor debe poseer un valor mayor a esta medida, la cual efectivamente se aproxima al valor del cálculo teórico.

Torque de aceleración en el eje longitudinal (Eje X)

Además de este torque resistivo, se debe considerar el torque de aceleración, el cual es requerido por la carga para acelerar y desacelerar la inercia total del sistema. Este torque se calcula mediante la ecuación 11.

$$T_{acel} = J_{total} \cdot (\Delta_{velocidad} \div \Delta_{tiempo}) \cdot 2 \cdot \pi \div 60 \quad (11)$$

Donde J_{total} es la inercia total del sistema, $\Delta_{velocidad}$ es la variación de velocidad, y Δ_{tiempo} es la variación de tiempo.

Inercia en el sistema del eje longitudinal (Eje X). La inercia total del sistema del eje longitudinal se calcula mediante la ecuación 12, y es la suma de las inercias de cada

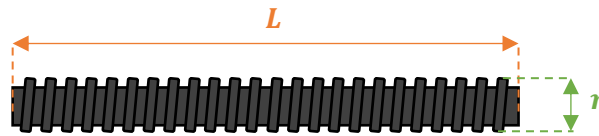
componente presente en el sistema reflejadas en el motor, puesto que el motor se acoplará directamente sin el uso de un reductor la ecuación queda de la siguiente manera.

$$J_{Ltotal} \approx J_{motor} + J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + J_{carga} \quad (12)$$

La inercia del motor inicialmente no es considerada hasta después de la selección del motor y la inercia del acoplamiento es despreciable. La inercia del tornillo se calcula mediante la ecuación 13, donde L es la longitud del tornillo, y r es su radio externo como se indica en la figura 17, estos valores se han obtenido midiendo directamente el tornillo al ser desmontado; ρ representa la densidad del tornillo, que de acuerdo con (Brown & Sharpe, 1944) es de acero, teniendo una densidad media de 7850 kg/m (Alacero, 2015).

Figura 17

Dimensiones referenciales para el cálculo de la inercia del tornillo de potencia



Seguidamente, la inercia de la carga se calcula mediante la ecuación 14, donde W es la carga, y P es el paso de la rosca, que son valores los cuales se determinaron previamente, mientras que e , representa la eficiencia que de acuerdo con (SureStep, 2005) para el caso de un tornillo con tuerca metálica es de 0.4.

$$J_{tornillo} \approx \pi \cdot L \cdot \rho \cdot r^4 \div 2 \quad (13)$$

$$J_{tornillo} \approx \pi \cdot (1.25m) \cdot \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot (0.025m)^4 \div 2$$

$$J_{tornillo} \approx 0.006kg \cdot m^2$$

$$J_{carga} = W \cdot 2\pi \cdot P^2 \div e \quad (14)$$

$$J_{carga} = (581.616kg) \cdot 2\pi \cdot \left(0.006 \frac{m}{rev}\right)^2 \div 0.4$$

$$J_{carga} = 0.32889 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Por lo tanto, retomando la ecuación 12, se obtiene la inercia total sin considerar la inercia del motor, por lo cual este parámetro se recalculará una vez seleccionado el motor.

$$J_{Ltotal\sin\text{motor}} \approx 0.006kg \cdot m^2 + 0.32889kg \cdot m^2 \approx 0.33489kg \cdot m^2$$

Variación de velocidad en el eje longitudinal (Eje X). Una vez calculadas las inercias en el sistema, se procede a determinar la variación de velocidad que requiere realizar el motor en una determinada variación de tiempo, para ello se parte de la velocidad de avance especificada en la hoja de datos del fresado, la cual es de 47 mm/min y teniendo en cuenta el paso de la rosca en el sistema, que es de 0.006m/rev, mediante la ecuación 15 se consigue determinar la velocidad que debe alcanzar el motor al mecanizar.

$$\Delta_{velocidad} = \frac{f}{p} \quad (15)$$

$$\Delta_{velocidad\text{mecanizado}} = \frac{47 \frac{mm}{min} \cdot \frac{m}{1000mm}}{0.006 \frac{m}{rev}} = 7.9rpm$$

Sin embargo, para el cálculo se debe emplear la velocidad más rápida, la cual se da cuando el eje longitudinal regresa a su posición inicial para que el cabezal realice la siguiente división, una máquina CNC maneja velocidades de posicionamiento máximas de 4 m/min (BKB, 2019). Sin embargo, los motores a pasos reducen su torque a velocidades elevadas, por lo que basándose en los proyectos analizados en el estado del arte en el capítulo dos se ha establecido una velocidad máxima de posicionamiento de 600 mm/min. Lo cual representa una velocidad de 100 rpm en el eje del motor de acuerdo con la ecuación 16. Finalmente, para la variación de tiempo Δ_{tiempo} presente en la ecuación 11, se considera que el motor alcance

estas 100 revoluciones por minuto en un tiempo de 0.8 segundos. Por lo que al retomar la ecuación 11 del torque de aceleración se tiene:

$$T_{Lacel} = (0.33489 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (100\text{RPM} \div 0.8\text{s}) \cdot 2 \cdot \pi \div 60$$

$$T_{Lacel} = 4.38\text{Nm}$$

Torque de movimiento en el eje longitudinal (Eje X)

Para obtener el torque necesario para mover el eje longitudinal se procede a sumar el torque resistivo y el torque de aceleración como se muestra a continuación en la ecuación 16.

$$T_{movimiento} = T_{resist} + T_{acel} \quad (16)$$

$$T_{Lmovimiento} = 1.876\text{Nm} + 4.38\text{Nm}$$

$$T_{Lmovimiento} = 6.256\text{Nm}$$

Este torque debe contener la inercia del motor, por lo que una vez seleccionado el motor se debe recalcular el torque de aceleración para sumarlo nuevamente al torque resistivo obteniendo el valor más aproximado.

Medición experimental del torque resistivo en el cabezal divisor (Eje A)

De igual manera que para el eje longitudinal se realiza una medición experimental con la ayuda del torquímetro de aguja y un acople en el cabezal divisor, obteniendo un valor de aproximadamente 2 Nm.

Como se evidenció en el cálculo del torque resistivo para el eje longitudinal, la medición de este valor permite ahorrar la teoría que implica este tipo de cálculo, por lo cual para determinar el torque de movimiento del cabezal divisor se parte de esta medida directamente, considerando además que las condiciones de ajuste y lubricación son menos complejas en comparación con el eje longitudinal.

Torque de movimiento en el cabezal divisor (Eje A)

El cálculo del torque necesario para proporcionar movimiento al cabezal divisor requiere calcular, al igual que en el eje longitudinal, la inercia total en el sistema. Para ello se emplea la ecuación 17.

$$J_{Dtotal} = J_{motor} + J_{acoplamiento} + J_{cabezal} + (J_{pieza} \div i^2) \quad (17)$$

Donde i representa la relación de los divisores en el cabezal, siendo esta de 40 a 1. La inercia del cabezal al poseer un mecanismo de tornillo sin fin se puede aproximar mediante la ecuación 18, donde la longitud L y el radio r del tornillo fueron medidos en su desmontaje previo a su mantenimiento, ρ es la densidad media del acero de 7850 kg/m^3 empleada previamente; y la inercia de la pieza a mecanizar, es decir del eje estriado, se calcula mediante la ecuación 19, donde W representa la masa del eje y r su radio.

$$J_{cabezal} \approx \pi \cdot L \cdot \rho \cdot r^4 \div 2 \quad (18)$$

$$J_{cabezal} \approx \pi \cdot (0.12m) \cdot \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot (0.015m)^4 \div 2 \approx 7.49 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

$$J_{pieza} = W \cdot r^2 \div 2 \quad (19)$$

$$J_{pieza} = (21.616kg) \cdot (0.0381m)^2 \div 2 = 0.015689kg \cdot m^2$$

Por lo que retomando la ecuación 17, sin considerar la inercia del motor al igual como se realiza en el eje longitudinal se tiene que:

$$J_{Dtotsinmotor} \approx (7.348 \times 10^{-5} kg \cdot m^2) + (0.015689kg \cdot m^2 \div (40)^2)$$

$$J_{Dtotal} \approx 8.471 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

El torque de aceleración se calcula para el cabezal, de igual manera que para el eje longitudinal, mediante la ecuación 11. Donde se ha considerado una variación de velocidad máxima de 100rpm en un intervalo de tiempo de 0.5 segundos, esto para conseguir que el cabezal realice movimientos rápidos sin tener una pérdida de pasos. El torque de movimiento

igualmente debe considerar el torque resistivo necesario para vencer la inercia, este torque se ha aproximado al torque medido experimentalmente.

$$T_{D_{acel}} = (8.471 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (100\text{RPM} \div 0.5\text{s}) \cdot 2 \cdot \pi \div 60$$

$$T_{D_{acel}} = 0.001774\text{Nm}$$

$$T_{D_{movimiento}} = 0.001774\text{Nm} + 2.0\text{Nm} = 2.0017\text{Nm}$$

Al igual que para el eje longitudinal, se deberá recalcular el torque al incluir la inercia del motor, necesaria para determinar el torque de aceleración.

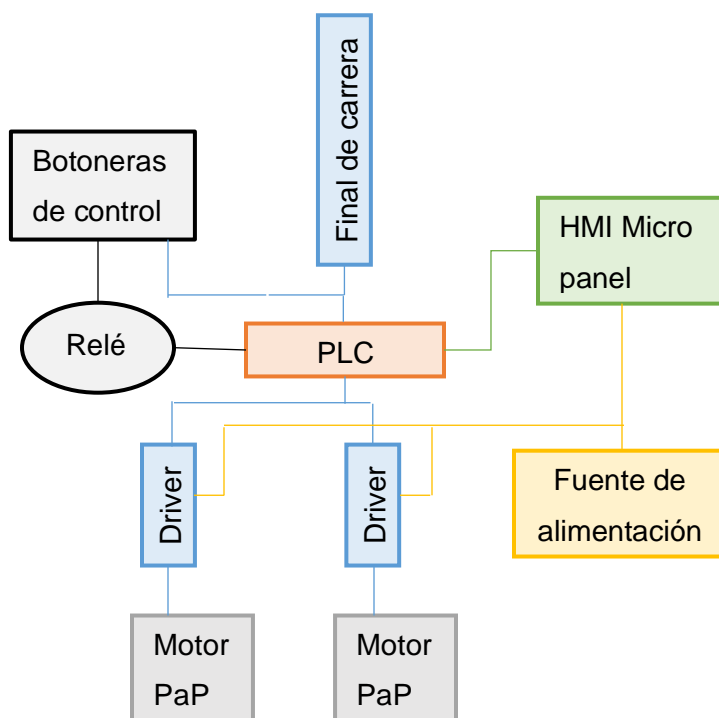
Control del sistema electromecánico

Para el control del sistema electromecánico se consideran todos los componentes que se emplearán en el mismo, como se había determinado en las alternativas de solución. En la figura 18 se presenta un esquema de conexión de los componentes electrónicos y electromecánicos necesarios.

Como se puede observar en la figura 18, la implementación del proyecto requerirá que sus componentes sean conectados mediante un diagrama de control y un diagrama de potencia, estos pueden revisarse en el Anexo 3.

Figura 18

Esquema de conexión de los componentes del sistema electromecánico



Nota. Las líneas de color azul representan señales de entrada y salida del PLC, la línea verde representa una señal de comunicación, las líneas amarillas representan la alimentación DC y las líneas negras la alimentación AC.

El PLC requiere de dos salidas de transistor debido a que, al trabajar con motores a pasos es fundamental una conmutación inmediata para los pulsos, adicionalmente necesita de otras cuatro salidas para las señales requeridas por los drivers, las cuales pueden ser de relé. En cuanto a las entradas, el PLC deberá poseer al menos 3 entradas para recibir las señales, se empleará un final de carrera que se accionará mecánicamente en ambos sentidos y el debido paro de emergencia presente en las botoneras de control de la máquina. Para la comunicación con la pantalla HMI Micro panel se requiere de un puerto de comunicación

RS232 debido a su compatibilidad con la mayoría de los dispositivos, su bajo costo y que no se requiere de una larga distancia para la transmisión de datos.

Estos componentes deben poseer una fuente de alimentación que abastezca la potencia que requieran para el correcto funcionamiento de los motores, por lo que una vez seleccionados se determinarán estas especificaciones.

Selección del sistema de control

Como se evidenció en el análisis del juego en los ejes de desplazamiento de la máquina, existe un gran juego en el eje longitudinal, de aproximadamente $\pm 1.38\text{mm}$, esta medida es tolerable para el mecanizado que realiza la empresa puesto que se mecaniza el largo en su totalidad. Por lo que para el proyecto se emplea un sistema de control de lazo abierto, lo cual es posible empleando motores a pasos que, como se evidenció en las alternativas de solución, son lo que mejor se acopla a las necesidades de la empresa, teniendo como ventaja poseer una precisión tolerable sin necesidad de emplear encoders en un control de lazo cerrado.

El juego en el eje longitudinal de la máquina resulta no ser un problema puesto que las longitudes de los ejes deben ser ingresadas solamente en centímetros y éstos son mecanizados a cabalidad en su diámetro externo. Sin embargo, el cabezal divisor requiere realizar divisiones precisas por lo que se realizará un análisis de la precisión conseguida mediante este tipo de control posteriormente en el capítulo cuatro, determinando si los rangos de tolerancia son admisibles para la empresa.

Selección y especificación de componentes

Motores con sus componentes de control

Eje longitudinal (Eje X). Entre los motores paso a paso se han considerado modelos de tres marcas de éstos como alternativas, los cuales cumplen con los requerimientos de

velocidad y torque determinados en el diseño del sistema mecánico, sus especificaciones se presentan a continuación en la tabla 28.

Tabla 28

Especificaciones de las alternativas de motores paso a paso en eje X

Característica/ Alternativa	Kinco	Stepperonline	Sumtor
Modelo	2S86Q-85B8	34HP44-6004S	86HS11860A4
Torque de movimiento (Nm)	6 (-)	6.8 (✓)	6 (-)
Velocidad máxima (rpm)	100 (✓)	480 (✓)	80 (X)
Voltaje nominal (VDC)	24-48-60 (✓)	48-60 (✓)	24-80-110 (✓)
Precio aprox. (\$)	66 (✓)	69 (✓)	40 (✓)

Como se puede observar en la tabla 28 el motor con las mejores prestaciones para el proyecto es el de la marca Stepperonline. Sin embargo, se ha seleccionado el motor a pasos de la marca Kinco modelo 2S86Q-85B8, debido a que a pesar de que el torque sea ligeramente inferior al calculado, permite trabajar a un voltaje de 24 V lo cual facilita la implementación, además de que se tiene la ventaja de contar con un proveedor directo lo cual reduce su costo de adquisición.

Como se había mencionado en el diseño del sistema mecánico específicamente en el cálculo del torque de movimiento, una vez seleccionado el motor se considera su inercia en el cálculo del torque de aceleración. Obteniendo de esta manera que las ecuaciones 11 y 17 modifiquen ligeramente sus valores como se muestra a continuación:

$$T_{acel} = (0.33523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (100\text{RPM} \div 0.8\text{s}) \cdot 2 \cdot \pi \div 60$$

$$T_{acel} = 4.388Nm$$

	$T_{movimiento} = T_{resist} + T_{acel}$	
	$T_{movimiento} = 1.876Nm + 4.388Nm$	
	$T_{movimiento} = 6.264Nm$	

Este es el torque considerando la inercia del motor en el cálculo, siendo que aumenta en 0.008 Nm lo cual no representa un gran cambio.

Cabezal divisor (Eje A). Al emplear un motor a pasos, en el caso del cabezal divisor debe tomarse en cuenta el ángulo de paso que posea puesto que este dato condicionará la variedad de divisiones con las que se pueda trabajar.

Un ángulo de 1.8° es apropiado ya que al configurar el controlador para cuatro subdivisiones se logran las divisiones necesarias para el mecanizado de ejes estriados en la empresa, como se muestra en la tabla 29.

Tabla 29

Numero de pulsos enviados por el controlador para que el motor realice las divisiones necesarias en el mecanizado

Divisiones necesarias en el mecanizado	32	25	20	16	10
Número de pulsos por división	25	32	40	50	80

Por lo cual entre las alternativas de motores para el cabezal divisor se consideran las presentadas en la tabla 30.

Tabla 30

Especificaciones de las alternativas de motores paso a paso en eje A

Característica/ Alternativa	Kinco	Stepperonline	Kinco
Modelo	2S86Q-85B8	24HS39-3008D	2S57Q-25B2
Torque a velocidad máxima (Nm)	2 (✓)	1.4 (X)	2 (✓)
Velocidad máxima (rpm)	100 (✓)	600 (✓)	75 (X)
Ángulo de paso	1.8° (✓)	1.8° (✓)	1.8° (✓)
Voltaje nominal (VDC)	24-48-60 (✓)	48-60 (✓)	24-48-60 (✓)
Precio aprox. (\$)	66 (✓)	40 (✓)	55 (✓)

Por lo que en el cabezal divisor se emplea el mismo motor, que a su vez contiene el rango de los valores de torque a la velocidad deseada, como se analizó previamente en el diseño mecánico.

De la misma manera que en el eje longitudinal se realiza nuevamente el cálculo del torque de aceleración y el torque de movimiento en el cabezal divisor, obteniendo las ecuaciones de torques con la siguiente modificación.

$$T_{Dacel} = (0.00042471 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (100\text{RPM} \div 0.5\text{s}) \cdot 2 \cdot \pi \div 60$$

$$T_{acel} = 0.008895\text{Nm}$$

$$T_{movimiento} = 0.008895\text{Nm} + 2.0\text{Nm}$$



$$T_{movimiento} = 2.0089\text{Nm}$$

Al existir un aumento en centésimas respecto al torque sin considerar la inercia del motor, se comprueba que el motor seleccionado cumple las condiciones de torque y velocidad analizadas.

Driver controlador de los motores. El driver seleccionado para controlar los motores a pasos deberá suplir la corriente necesaria para que el motor pueda trabajar en buenas condiciones, y deberá poseer un rango de voltaje de alimentación aproximado al requerido por el motor. Se han considerado como alternativas de driver para el control de los motores Kinco 2S86Q-85B8 las presentadas a continuación en la tabla 31.

Tabla 31

Especificaciones de las alternativas de drivers para los motores paso a paso

<i>Característica/ Alternativa</i>	Kinco	Xinje
		
Modelo	2CM880	DP-508
Alimentación (VDC)	24~70	20~80
Corriente de entrada lógica (mA)	8~12	4~16
Salida de corriente máxima (A)	7.2	5
Frecuencia máxima de salida de pulsos (KHz)	400	200
Temperatura ambiente (°C)	0~+40	0~+50
Humedad sin condensación (RH)	<85%	40%~90%
Precio aprox. (\$)	125	80

Se ha optado por emplear los drivers DP-508 de la marca Xinje debido a que se adapta a las condiciones de alimentación del motor a un menor costo.

Controlador del sistema

Para el control del sistema se han considerado las características analizadas previamente sobre el mismo. Teniendo como alternativas de PLCs para el control del sistema las presentadas a continuación en la tabla 32.

Tabla 32

Especificaciones de las alternativas de controlador del sistema

Característica/ Alternativa	Siemens	Xinje	Fatek
Modelo	S7-1200 1212C	XD3-16RT-E	FBs-14MCT
Alimentación	24V DC	220V AC	100~240VAC
Pines de E/S	14 pines: 8 entrada/ 6 salida	16 pines: 8 entrada/ 8 salida	14 pines: 8 entrada/ 6 salida
Tipos de pines de entrada	Tipo PNP	Tipo NPN	Tipo NPN
Tipos de pines de salida	6 transistor, 4 de ellas rápidas (100kHz)	2 transistor (200kHz) / 6 Relé	6 transistor, 2 de alta velocidad (200kHz)
Tensión de aislamiento	707V DC	Por encima de 500V DC 2MΩ	1500V AC
Anti-ruido	Ruido de rizado máx. (<10 MHz) <1 Vp-p	Tensión de ruido 1000 Vp-p 1μs pulso por 1 minuto	Tensión de ruido 1500 Vp-p ancho de 1μs



Característica/ Alternativa	Siemens	Xinje	Fatek
Atmósfera	Homologación Atex	Sin gas corrosivo ni inflamable	Sin humo de aceite, polvo conductor, gas corrosivo ni inflamable
Temperatura ambiente	-20°C~45°C	0°C~60°C	5°C~40°C
Humedad ambiente	95% (Sin condensación)	5%~95% (Sin condensación)	5%~95% (Sin condensación)
Puertos de comunicación	RJ45 (Ethernet) Protocolos: PROFINET IO- Controller, PROFINET IO- Device, Comunicación SIMATIC, Comunicación IE abierta, Servidores web	COM 1: RS-232, para conectar el ordenador, HMI para programación o depuración. COM 2: RS-485, para conectar instrumentos inteligentes o inversores.	COM 1: Puerto 0, USB o RS-232 Comunicación modo esclavo
Modo de ejecución de programa	Scan cycle	Modo Loop scan	Normal logic scan
Lenguajes de programación	KOP (esquema de contactos), FUP (diagrama de funciones) y SCL (Structured control language)	Instrucciones y Ladder	Ladder

<i>Característica/ Alternativa</i>	Siemens	Xinje	Fatek
Velocidad de procesamiento	0.085 μ s	0.05 μ s	0.33 μ s
Precio aprox. (\$)	395	83	75

Si bien el PLC de la marca Siemens presenta un precio significativamente mayor en comparación a las otras dos alternativas, esto se debe a sus protocolos de comunicación y lenguajes de programación lo cual lo hace indicado para proyectos con redes industriales, no siendo este el caso, se selecciona el PLC XD3-16RT-E de la marca Xinje debido a que posee una mayor frecuencia en sus salidas de transistor, así como una menor velocidad de procesamiento a un precio moderado.

Pantalla HMI

La pantalla HMI a utilizar debe ser compatible con el controlador seleccionado, por lo cual entre las alternativas se tienen dos modelos de pantallas HMI micro panel, los cuales se presentan a continuación en la tabla 33.

Tabla 33

Especificaciones de las alternativas de pantallas HMI micro panel

<i>Característica/ Alternativa</i>	<i>Xinje OP320-A-S</i>	<i>Xinje OP320-S</i>
Alimentación	DC20V~28V	DC20V~28V
Potencia	<4W	<4W
Temp. de operación	0~50°C sin condensación	0~50°C sin condensación
Humedad	20~85% sin condensación	20~85% sin condensación
Protección	IP65 cubierta frontal	IP65 cubierta frontal
Área de display	192*64	192*64
Botones	20	7
Memoria de Programa	64KB FlashROM	64KB FlashROM
Memoria de Datos	1KB SRAM	1KB SRAM
Comunicación	RS232/RS485	RS232/RS485
Precio aprox.	50\$	45\$




Como se había analizado, mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados sobre la interfaz de usuario, una pantalla HMI micro panel es la mejor opción para que la interfaz cumpla satisfactoriamente las necesidades de la empresa. Se selecciona la pantalla HMI micro panel modelo OP320-A-S debido a que cuenta con más botones, lo cual facilita el ingreso de datos.

Final de carrera

El final de carrera se encarga de detener la mesa cuando el eje longitudinal llega a alguno de sus extremos, se han considerado tres tipos de finales de carrera para ser acoplados a la mesa de la fresadora, éstos se presentan a continuación en la tabla 34.

Tabla 34

Alternativas de final de carrera


Característica/ Alternativa	Palanca vertical	Palanca horizontal	Émbolo
			
Contactos	1 NO / 1 NC	1 NO / 1 NC	2 NO / 2 NC
Índice de protección	IP65	IP44	IP67
Sujeción	2 a 4 pernos	2 pernos	2 a 4 pernos
Normativa	EN 60 947.5.1	EN 60 947.5.1	EN 60 947.5.1
Precio aprox.	8\$	8\$	28\$

Seleccionando un final de carrera con palanca horizontal puesto que existe una mayor facilidad de sujeción y adaptación mecánica, además de que sólo se requiere un contacto normalmente cerrado para que éste cumpla su función.

Botoneras de control

Las botoneras de control se encargarán de encender y apagar la máquina en su totalidad, por lo que en ellas se encontrará un botón de encendido y otro de apagado, además del paro de emergencia. Las alternativas de botoneras a emplear se presentan a continuación en la tabla 35.

Tabla 35*Alternativas de botoneras de control*

Característica/ Alternativa	Botones dobles y paro de emergencia	Botones planos y paro de emergencia
		
Agujero de montaje	22 mm (2 agujeros)	22 mm (3 agujeros)
Material	plástico	plástico
Corriente máx.	10A	5A
Precio aprox.	11\$	12\$




Los botones dobles son los más adecuados para la implementación del proyecto puesto que además de representar un menor costo, facilitan su montaje al requerir un menor número de agujeros en el tablero de control.

Relé

El relé es necesario para mantener encendido o alimentado el PLC, permitiendo además energizar la fuente de voltaje una vez es presionado el botón de encendido en el tablero de control. Debido a varios factores como su material resistente y durable, su separación galvánica, su adaptación a diferentes valores de tensión, su alta aplicación en el sector industrial y su facilidad de adquisición, se han tomado en cuenta relés de tipo electromagnético. Las alternativas de relé para emplear en el proyecto se presentan a continuación en la tabla 36.

Tabla 36

Alternativas de relé

	Con base de enchufe	Miniatura	De propósito general
Característica/ Alternativa			
Voltaje	12/24/110/220V AC	30V DC / 125V AC	30V DC / 125V AC
Pin	8 pines	8 pines	14 pines
Corriente	10A	5A	5A
Precio aprox.	13\$	7\$	10\$

Se selecciona el relé con base de enchufe puesto que tiene una mayor capacidad de corriente y cuenta con los pines necesarios ya que únicamente se requerirá un enclavamiento de la bobina para que se mantenga energizado el sistema.

Fuente de alimentación

Para determinar las especificaciones de la fuente de voltaje requerida, es necesario considerar los voltajes de funcionamiento para todos los elementos presentes en el sistema, al igual que la corriente requerida. Como se evidenció en el control del sistema electromecánico, la fuente de alimentación se encarga de energizar a los motores mediante los drivers y a la pantalla HMI, si se emplea una sola fuente los valores de voltaje deben condicionarse dentro de un rango común para estos componentes, mientras que la corriente de cada componente debe ser sumada. Por lo que en la tabla 37 se presentan los valores de voltaje y corriente requeridos por estos componentes, y lo que representa en las especificaciones de la fuente de alimentación.

Tabla 37*Elementos influyentes en la fuente de alimentación*

Elemento	Rgo. de V. de alimentación (DC V)	Corriente máxima de funcionamiento (A)
Driver DP508 Eje longitudinal	20~80	5
Driver DP508 Cabezal divisor	20~80	5
Pantalla HMI OP320-A-S	20~28	0.2
Especificaciones de la fuente de alimentación (Total)	20~28	10.2

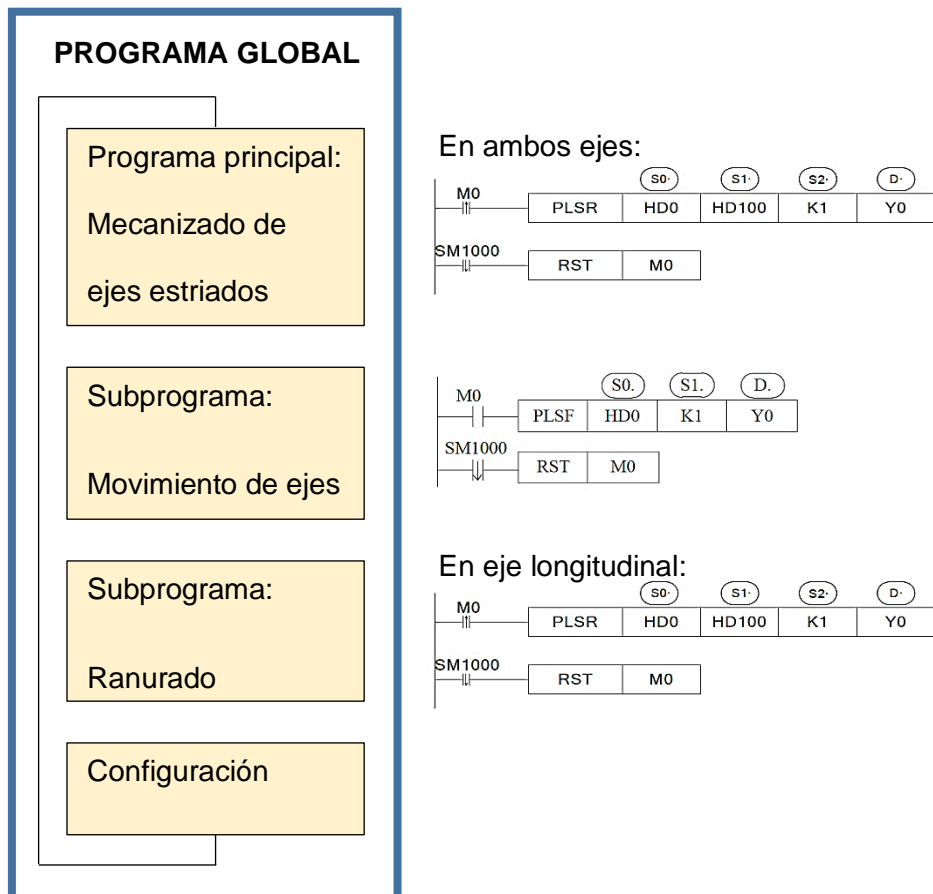
Considerando un factor de seguridad de 125% la corriente suministrada por la fuente deberá ser de 12.75 A. De esta manera se ha optado por emplear una fuente de alimentación de 24VDC 20A que se ha encontrado disponible en el mercado.

Programación de la máquina

El programa global de la máquina contiene el programa principal y 2 subprogramas. El programa principal se encarga de mecanizar los ejes estriados ingresando los parámetros necesarios; por otra parte, el primer subprograma permite mover los ejes automatizados, es decir el eje longitudinal y el cabezal divisor, en un determinado rango de velocidades; y el segundo subprograma permite realizar un solo ranurado con el propósito de verificar la profundidad de corte con la que se está trabajando. La programación es extensa, por lo cual se simplifica en la figura 19 mediante un diagrama donde se muestran las instrucciones esencialmente usadas. Para analizar a detalle toda la programación, revisar el Anexo 4.

Figura 19

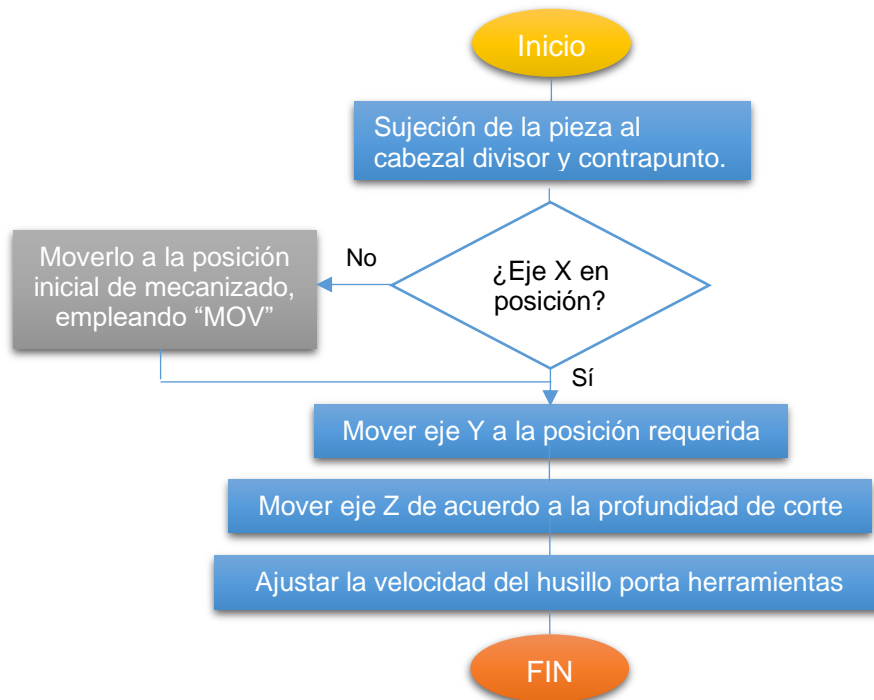
Diagrama de programación global



A continuación, se establece el procedimiento que realizaría el operario previo al inicio del programa, puesto que la máquina se encarga de realizar los desplazamientos únicamente en el eje longitudinal y cabezal divisor, este procedimiento se detalla en el diagrama de flujo de la figura 20. El operario deberá leer el manual de usuario antes de usar la máquina, este se encuentra en el Anexo 5.

Figura 20

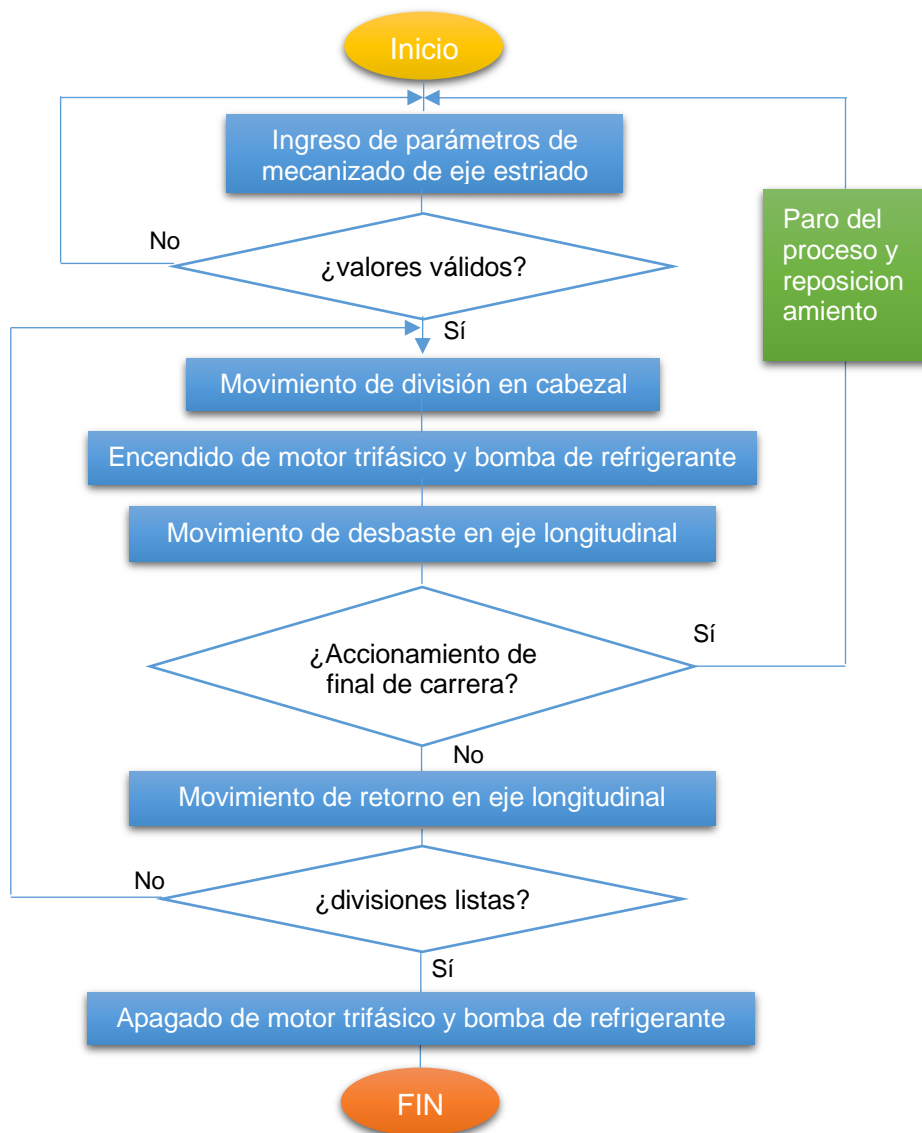
Procedimiento realizado por el operario previo al inicio del programa



Una vez realizado este procedimiento, el operario deberá ingresar, los parámetros que se considerarán en el mecanizado del eje estriado, los cuales deberán estar en un rango válido. En la figura 21, se aprecia el diagrama de flujo del programa una vez ejecutado.

Figura 21

Diagrama de flujo del programa para mecanizar ejes estriados



Capítulo IV:

Implementación y pruebas

Cambios o adaptaciones en la estructura mecánica de la máquina

Sistema de transmisión del motor trifásico a la caja de engranajes de la máquina

Como se evidenció en el diagnóstico de la máquina, en el capítulo dos, los engranajes de entrada a la caja de engranajes presentan un serio desgaste, por lo cual se ha reemplazado este sistema a una transmisión por poleas con bandas 1A, donde se han considerado los parámetros de corte analizados previamente en la hoja de datos del capítulo tres, empleando una velocidad de entrada de aproximadamente 440rpm, la cual se puede regular gracias a las palancas de cambios con las que cuenta la máquina. Al contar con un motor trifásico de 3HP y 1700 rpm de la empresa, las poleas realizan una reducción 9:35. En la figura 22 se puede apreciar la polea de 35cm acoplada en la entrada de la caja de engranajes de la máquina.

Figura 22

Acoplamiento de la polea de entrada a la caja de engranajes de la máquina

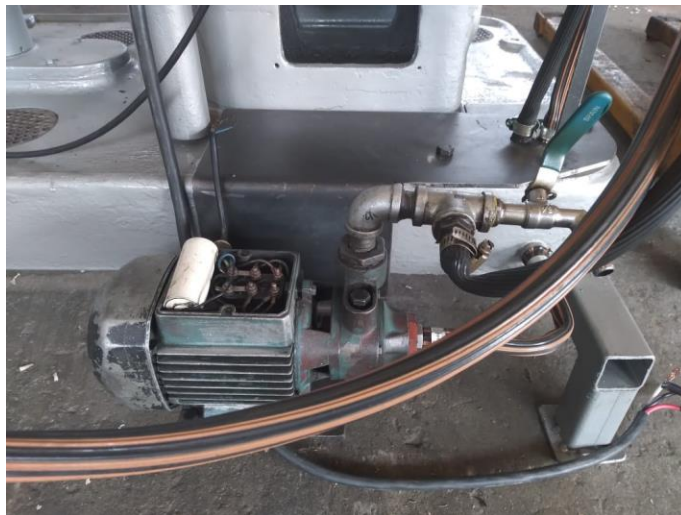


Bomba de refrigeración de la máquina

Se ha reposicionado la bomba de refrigeración de la máquina a su costado derecho mediante un soporte, mientras que el contenedor del refrigerante que poseía se ha sustituido por el contenedor presente en la base de la máquina. Para accionar la misma se incorporará un contactor en el tablero eléctrico permitiendo que pueda enviar una señal la pantalla HMI hacia el PLC, encendiéndola o apagándola. En la figura 23 se visualiza el reposicionamiento de la bomba conectada al contenedor de la base de la máquina.

Figura 23

Reposicionamiento de la bomba de refrigeración de la máquina



Nota. En la figura se aprecian unos tubos soldados a la base de la máquina, éstos han sido incorporados para que el montacarga pueda ingresar debajo de la máquina haciendo más fácil su movilización

Implementación de los ejes automatizados

Eje longitudinal (Eje X)

El motor del eje longitudinal ha sido acoplado mediante un matrimonio y un acople con tubos que lo sujetan con pernos firmemente a la mesa. En la figura 24 se aprecia esta incorporación del motor.

Figura 24

Acoplamiento del motor del eje longitudinal

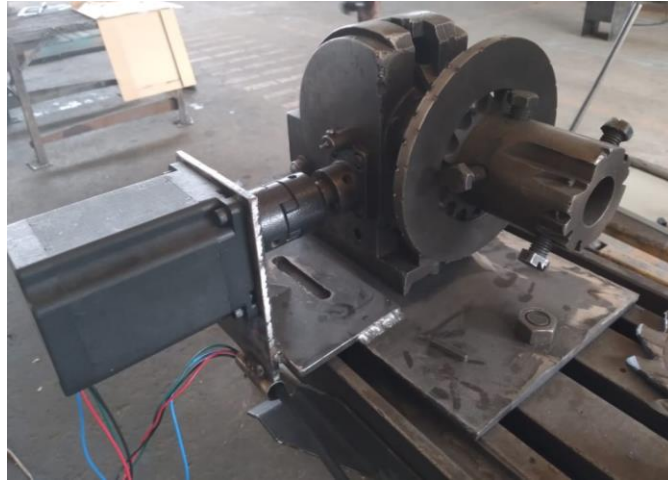


Cabezal divisor (Eje A)

Al cabezal divisor se le ha soldado una base que le permita fijar el motor, de igual manera que en el eje longitudinal se emplea el mismo matrimonio para sujetar los ejes de movimiento. En la figura 25 se puede apreciar este acoplamiento.

Figura 25

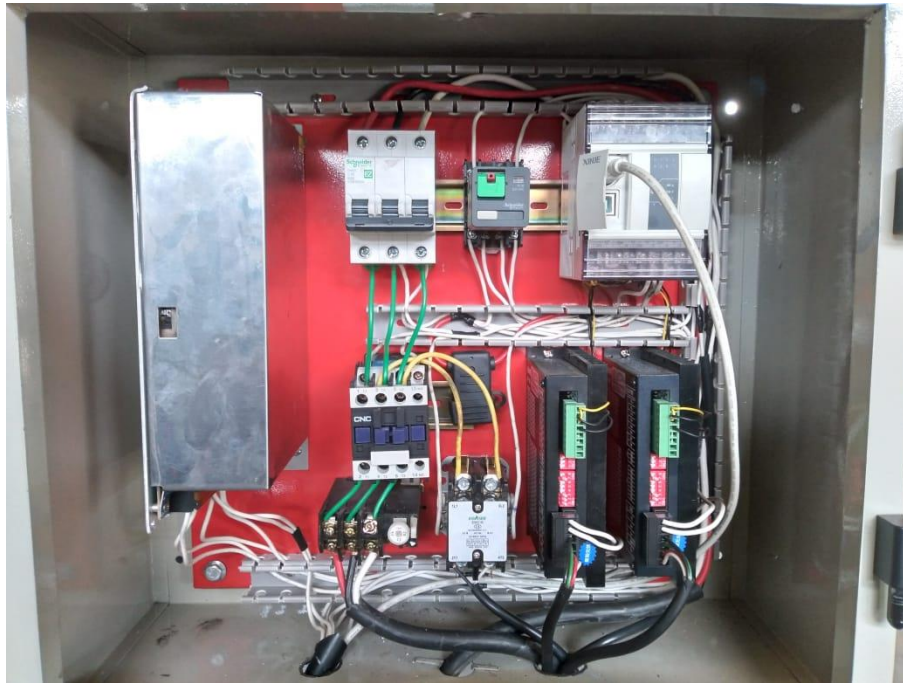
Acoplamiento del motor del cabezal divisor

**Incorporación del tablero eléctrico**

El tablero eléctrico de la máquina contiene todos los componentes que se mencionaron en el control del sistema electromecánico en el capítulo tres, a excepción de los motores que van acoplados en la mesa de la fresadora y el cabezal divisor; y de la pantalla HMI y botoneras que se sitúan en el tablero de control. Para dimensionar el tablero electrónico se toman con referencia algunas de las figuras de las dimensiones de los componentes. Una vez adquirida la fuente de alimentación y los contactores para el funcionamiento del motor trifásico y la bomba de refrigeración, estos se sitúan en el tablero eléctrico como se muestra en la figura 26. En la figura se pueden visualizar también los componentes del circuito de potencia, para mayor detalle revisar el plano eléctrico del proyecto en el Anexo 3.

Figura 26

Tablero eléctrico de la máquina



Incorporación del tablero de control

El tablero de control por su parte debe estar situado en la máquina de modo que le permita al operario ingresar los datos cómodamente y a la vez no se encuentre expuesto a viruta o refrigerante proveniente del proceso de mecanizado, por lo que se ha adaptado un soporte en la parte superior de la máquina que le permita al tablero de control desplazarse de manera angular desde el frente a un costado de la máquina. El tablero de control cuenta con la pantalla HMI, y botoneras de inicio y paro para encender y apagar la máquina, además de contar con el paro de emergencia, como se muestra en la figura 27.

Figura 27*Tablero de control de la máquina***Pruebas de funcionamiento de la máquina*****Instalación u operación***

Primordialmente se comprueba que las etiquetas de identificación de los cables de conexión de todos los componentes estén ubicadas de acuerdo con el diagrama de control y el diagrama de potencia, y con la ayuda de un multímetro se mide la continuidad de estos cables cerciorándose que la conexión esté implementada de manera correcta. Seguidamente, se verifica que no exista ningún error referente a la programación de la máquina y ninguna anomalía en el funcionamiento de algún componente, adicionalmente como se había observado en el diagnóstico de la máquina en el capítulo dos existía un problema de ruido el cual se ha verificado nuevamente mediante el estetoscopio industrial. Los resultados de estas pruebas se presentan en la tabla 38.

Tabla 38*Pruebas de instalación u operación del proyecto*

Prueba	Componente	Resultado
Conexión	Circuito de control	Funcional
	Circuito de potencia	Funcional
Programación	PLC	Funcional
	Pantalla HMI	Funcional
Operación	Ruido	Corregido
	Bomba del refrigerante	Funcional
	Motor trifásico	Funcional
	Motores a pasos	Verificar sobrecalentamiento

Temperatura de trabajo en los motores

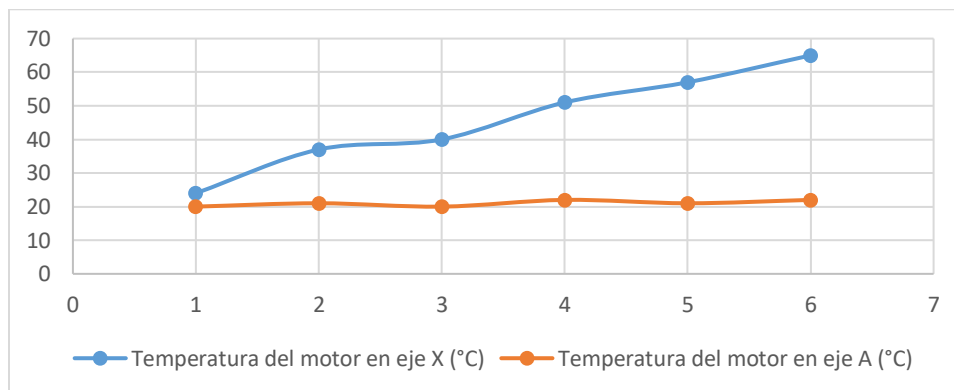
Para verificar que los motores no se sobrecalienten durante su jornada de trabajo, con el uso de una termocupla se ha medido la temperatura de éstos durante las 6 horas de trabajo. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 39. Seguidamente se representan estos datos en la figura 28.

Tabla 39*Temperatura de trabajo en los motores*

Horas de trabajo	Temperatura del motor en eje X (°C)	Temperatura del motor en eje A (°C)
1	24~28	20~22
2	32~37	20~22
3	40~45	20~22
4	50~52	20~22
5	57~60	20~22
6	62~65	20~22

Figura 28

Representación de la temperatura de trabajo en los motores



Corriente suministrada a los controladores y los motores

Debido al sobrecalentamiento en el motor del eje X, con el uso de un multímetro digital, se mide adicionalmente la corriente suministrada a los controladores y motores para verificar que sea la adecuada. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 40 y seguidamente se pueden analizar mediante las figuras 29, 30 y 31.

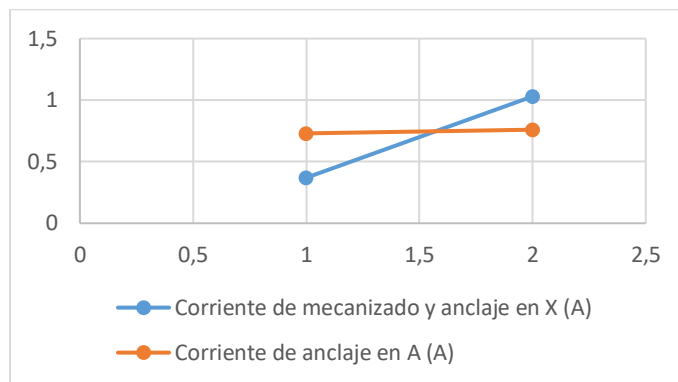
Tabla 40

Corriente suministrada a los controladores y motores

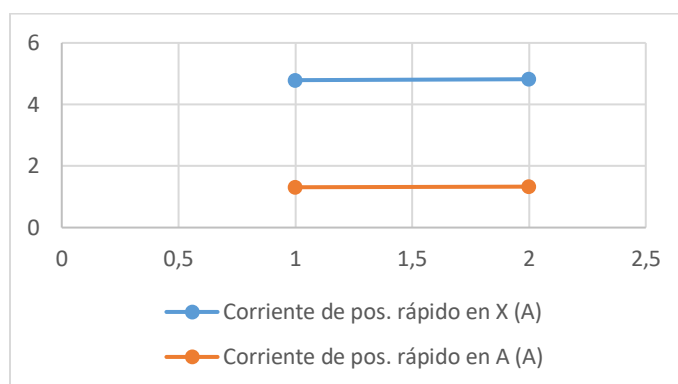
Condición	Corriente de componentes en eje X (A)	Corriente de componentes en eje A (A)
Mecanizado o anclaje	0,37~1,03	0,73~0,76
Posicionamiento rápido	4,79~4,82	1,31~1,33
Posicionamiento lento	1,16~1,18	2,87~2,89

Figura 29

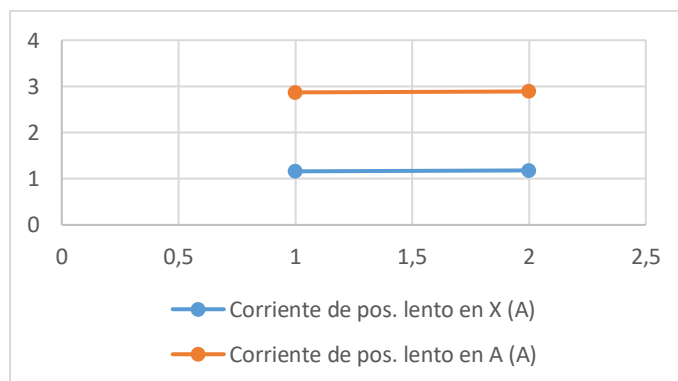
Representación gráfica de la corriente suministrada en mecanizado o anclaje

**Figura 30**

Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento rápido

**Figura 31**

Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento lento



Precisión en los ejes automatizados

Para el análisis de la precisión en el eje longitudinal se han tomado muestras de los desplazamientos que realiza la mesa a las distintas longitudes ingresadas en el programa, los resultados se presentan en la tabla 41. Seguidamente, se muestran estos datos representados en una gráfica de líneas en la figura 32.

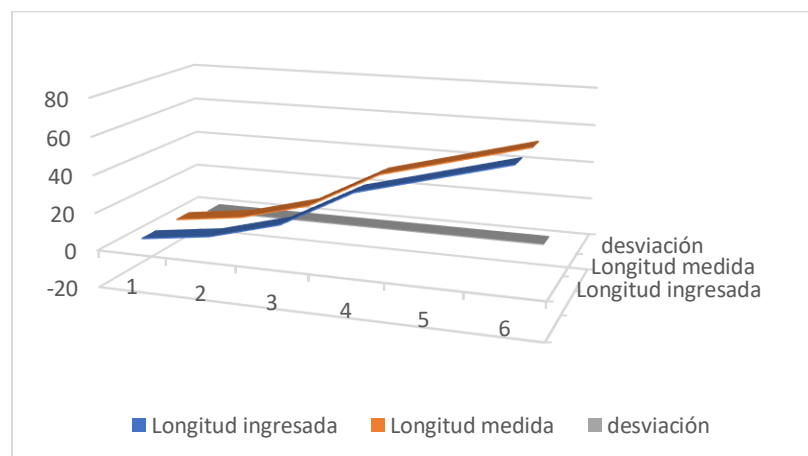
Tabla 41

Muestras de los desplazamientos del eje longitudinal

Longitud ingresada (mm)	Longitud medida (mm)	Desviación	Desviación cuadrática
50	50,8	-0,8	0,64
100	101,3	-1,3	1,69
200	201,2	-1,2	1,44
400	401	-1	1
500	501,2	-1,2	1,44
600	601,4	-1,4	1,96

Figura 32

Desplazamientos en el eje longitudinal después de la automatización



De la tabla 40, se puede calcular el error cuadrático como se vio en análisis del juego de la máquina en el capítulo dos. Obteniendo un valor de $\pm 1,33\text{mm}$.

Para el análisis de precisión en el cabezal divisor se han tomado las medidas de los ángulos en los que se encontraba el eje en cada una de las 32 divisiones, empleando un encoder rotativo absoluto EPM50. Estas medidas se presentan a continuación en la tabla 42. Seguidamente en la figura 33, se presenta la gráfica de la desviación entre el valor real y el valor medido.

Tabla 42

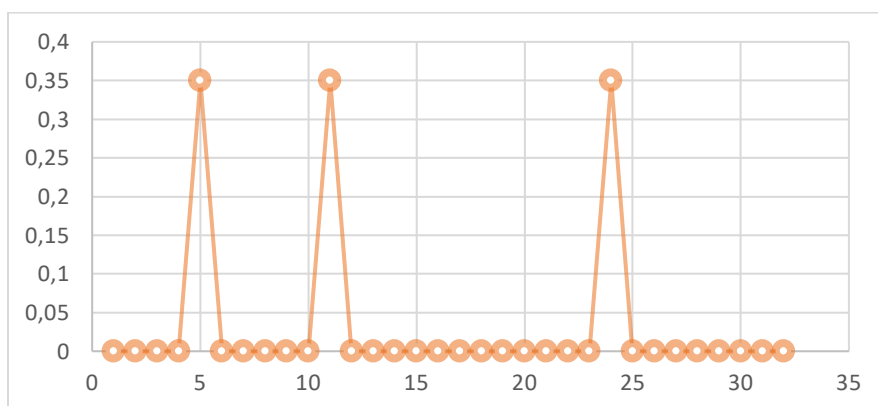
Distancia entre divisiones del mecanizado de eje estriado de 3 pulgadas con 32 divisiones

#División	Ángulo medido (°)	Desviación	desviación cuadrática
1	11,25	0	0
2	22,5	0	0
3	33,75	0	0
4	45	0	0
5	56,6	0,35	0,1225
6	67,5	0	0
7	78,75	0	0
8	90	0	0
9	101,25	0	0
10	112,5	0	0
11	124,1	0,35	0,1225
12	135	0	0
13	146,25	0	0
14	157,5	0	0
15	168,75	0	0
16	180	0	0
17	191,25	0	0

#División	Ángulo medido (°)	Desviación	desviación cuadrática
18	202,5	0	0
19	213,75	0	0
20	225	0	0
21	236,25	0	0
22	247,5	0	0
23	258,75	0	0
24	270,35	0,35	0,1225
25	281,25	0	0
26	292,5	0	0
27	303,75	0	0
28	315	0	0
29	326,25	0	0
30	337,5	0	0
31	348,75	0	0
32	360	0	0

Figura 33

Desviación entre el valor real y medido del ángulo en cada división



Producción conseguida después de la automatización

Para el análisis de la producción conseguida se emplean los datos antes analizados sobre la capacidad de producción de la empresa en el capítulo dos. Donde se presentaba el takt time de acuerdo con la demanda analizada. El tiempo de proceso se midió mediante un cronómetro iniciando desde la ejecución del programa. En la tabla 43 se realiza la comparación de los tiempos de producción después de la automatización.

Tabla 43

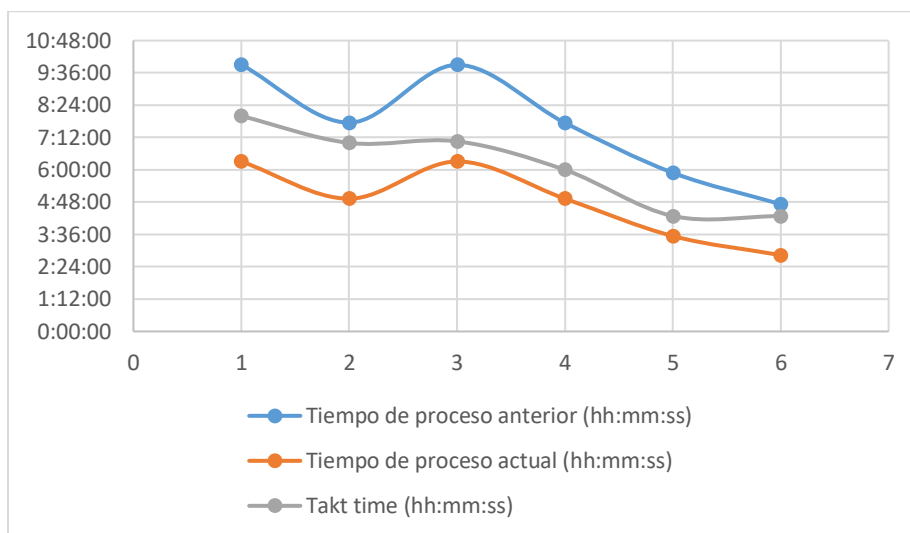
Tiempo del proceso de mecanizado después de la automatización

Ord.	Parámetros de eje estriado			Tiempo de proceso anterior	Tiempo de proceso actual	Takt time (hh:mm:ss)
	Diámetro (in)	Largo (cm)	# de estrías	(hh:mm:ss)	(hh:mm:ss)	
1	3	60	32	09:54:25	06:18:40	08:00:00
2			25	07:45:09	04:55:50	07:00:00
3	2.5	60	32	09:53:54	06:18:40	07:03:32
4			25	07:44:45	04:55:50	06:00:00
5	2	40	25	05:53:30	03:32:30	04:17:09
6			20	04:43:30	02:50:00	04:17:09

Estos valores se comparan a continuación en la figura 34, comprobando de esta manera como se consigue que la producción satisfaga la demanda al tener un tiempo de producción actual inferior al Takt time.

Figura 34

Comparación del tiempo del proceso antes y después de la automatización con el Takt time



La nueva capacidad de producción requiere considerar las horas diarias de trabajo que realizará la máquina, la cual ya depende menos de un operario es por ello por lo que en lugar de contemplar 6 horas, ahora se consideran 8 horas diarias de trabajo para la máquina. En la tabla 44 se contempla la nueva capacidad de producción de la empresa.

Tabla 44

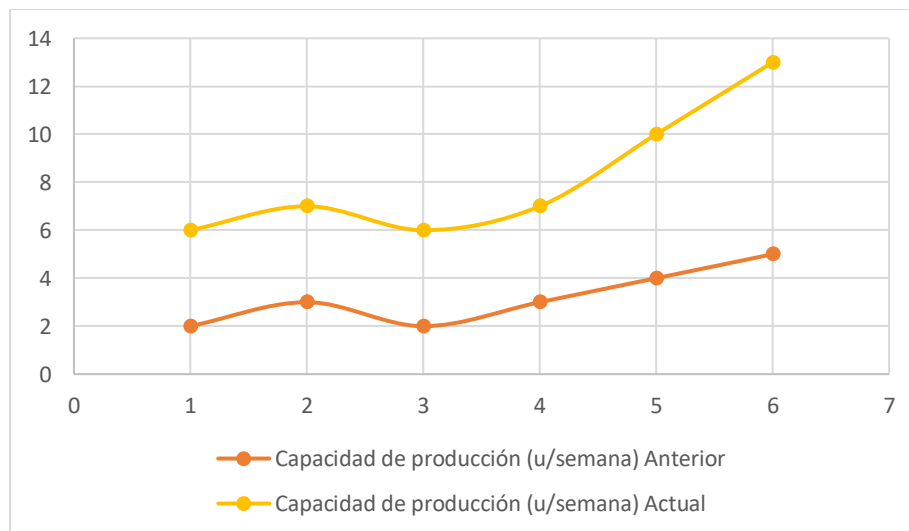
Capacidad de producción del mecanizado de ejes estriados en la fresadora

Ord.	Parámetros de eje estriado			Capacidad de producción (u/semana)	
	Diámetro (in)	Largo (cm)	# estrías	Anterior	Actual
1	3	60	32	2	6
2			25	3	7
3	2.5	60	32	2	6
4			25	3	7
5	2	40	25	4	10
6			20	5	13

A continuación, en la figura 35, se muestra la comparación sobre la capacidad de producción de ejes estriados en la empresa antes y después de la automatización de la fresadora Brown & Sharpe.

Figura 35

Comparación de la capacidad de producción actual respecto a la anterior



Capítulo V

Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

Análisis de instalación u operación

Dentro de las pruebas de funcionamiento realizadas en el capítulo cuatro, se evidenció que la máquina no presenta inconvenientes en cuanto a la conexión de sus componentes o a la programación del PLC. Verificando, además, mediante el uso del estetoscopio industrial que la presencia de ruidos intermitentes en la máquina señalados en el análisis de ruidos del capítulo dos, ha desaparecido gracias a los cambios realizados. Y determinando que se requieren las pruebas adicionales que se han realizado a los motores a pasos.

Análisis de temperatura y corrientes de trabajo en los motores a pasos

El motor a pasos en el cabezal divisor realiza los movimientos a las distintas velocidades programadas sin ningún tipo de inconveniente en cuanto a temperatura o pérdida de pasos. Sin embargo, el motor en el eje longitudinal al permanecer trabajando una jornada completa presenta una temperatura de aproximadamente 65°C como se evidenció en la prueba de temperatura de trabajo de los motores, lo cual no es recomendable ya que su hoja de datos establece una temperatura de funcionamiento de -20°C~+50°C, por lo que el motor estaría trabajando más allá de su temperatura máxima. Es mediante la prueba realizada midiendo las corrientes en diferentes condiciones de movimiento de los motores, que se determina que este problema de sobrecalentamiento se relaciona con la corriente de trabajo y específicamente con el torque requerido en el posicionamiento rápido. Por lo que reduciendo la corriente y por consiguiente la velocidad se podría solucionar este inconveniente de sobrecalentamiento, sin embargo, se debe considerar que reducir la corriente en el controlador reduce los torques de trabajo a su vez. Por lo cual se ha optado por solucionar esta situación mecánicamente, realizando una reducción del eje del motor al eje longitudinal de la fresadora. Puesto que la empresa cuenta con catalinas que se emplean para la fabricación de sus máquinas, se ha

hecho uso de éstas, realizando una reducción 2:1 considerando que inicialmente se proyectó un posicionamiento rápido de 600 mm/min basándose en los proyectos del estado del arte en el capítulo dos se ha procurado acercarse a esta velocidad considerando los límites de torque del motor a una determinada velocidad, el acoplamiento de éstas se presenta a continuación en la figura 36.

Figura 36

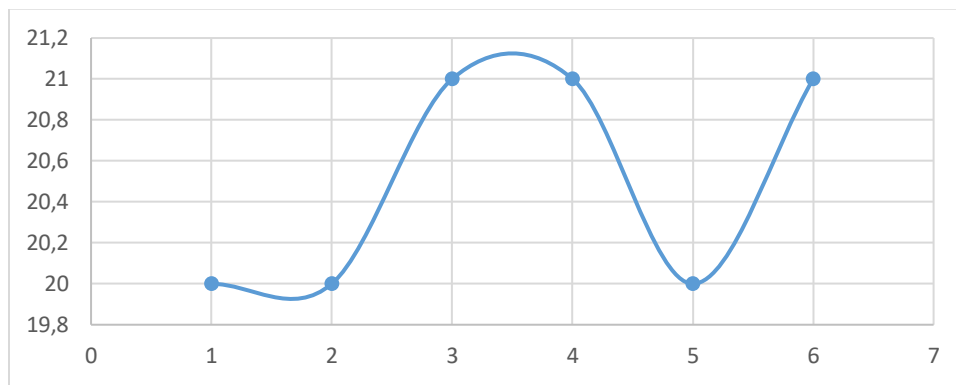
Reducción del eje del motor al eje longitudinal de la fresadora



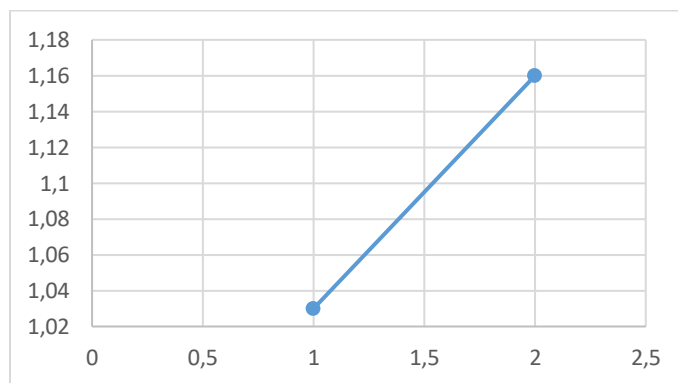
Una vez realizada esta reducción se considera nuevamente la velocidad y el desplazamiento en la programación, parámetros los cuales también se reducen de acuerdo a la relación 2:1. Y se comprueba cómo se soluciona el inconveniente de sobrecalentamiento, en las figuras 37 representando la temperatura después de la reducción y en la figura 38 representando la corriente en posicionamiento rápido después de la reducción.

Figura 37

Representación de la temperatura de trabajo en el motor del eje longitudinal después de la reducción

**Figura 38**

Representación gráfica de la corriente suministrada en posicionamiento rápido después de la reducción



Análisis de precisión conseguida después de la automatización

Como se pudo apreciar en las pruebas de precisión realizadas en el capítulo cuatro, existe un error de $\pm 1,33\text{mm}$ en el desplazamiento del eje longitudinal, lo cual es causado por el juego u holgura en el tornillo de potencia. Mientras que en el cabezal divisor la desviación del valor real al medido es de $0,35^\circ$ sólo en una minoría de las divisiones. Esta desviación indica que la capacidad de medición del encoder es un tanto menor a la resolución del motor a pasos.

Por lo cual, de la misma manera que para el eje longitudinal, se calcula el error cuadrático en el cabezal divisor obteniendo un valor de $\pm 0.1^\circ$. Estos valores resultan admisibles para la empresa puesto que en el eje longitudinal se mecanizan los ejes estriados a la totalidad de su longitud y en cuanto a las divisiones, la empresa admite una tolerancia $\pm 0.2^\circ$ en la producción de ejes estriados.

Validación de la hipótesis

La automatización del cabezal divisor y eje longitudinal de la fresadora horizontal Brown & Sharpe ha conseguido mejorar la producción de ejes estriados en la empresa Castro Maquinaria. Como pudo observarse en las pruebas de producción del capítulo cuatro, después de la automatización, el tiempo del proceso se ha reducido aproximadamente por lo menos un 40% y para cada una de las variaciones en la fabricación de ejes estriados, el tiempo de proceso es menor por al menos 44 minutos al takt time. Es decir, se tiene aproximadamente más del 17.5% de tiempo del takt time a favor de la empresa en la fabricación de cada eje estriado. Con lo cual, analizando la figura 35, se ha conseguido incrementar la capacidad de producción de los ejes estriados con longitudes de 60 cm y 32 divisiones (numerales 1 y 3) al triple; mientras que tanto los ejes estriados de 60 cm con 25 divisiones (numerales 2 y 4), como los de 40cm con 25 y 20 divisiones (numerales 5 y 6) tienen una capacidad de producción actual de más del doble que la anterior.

Conclusiones

- La automatización de la fresadora horizontal Brown & Sharpe ha sido efectuada satisfactoriamente para la empresa Castro Maquinaria, mejorando la producción de ejes estriados al reducir el tiempo del proceso por lo menos un 40% aproximadamente, consiguiendo a su vez más del 17.5% de tiempo del takt time a favor de la empresa en la fabricación de cada eje estriado y una capacidad de producción más allá del doble de la capacidad anterior.
- La fresadora Brown & Sharpe con la que cuenta la empresa Castro Maquinaria presentó desgaste en la transmisión de entrada a la caja de engranajes y ruido cercano a la zona del motor, para corregir este problema se requirió sustituir los piñones de entrada a la caja de engranajes por una transmisión mediante poleas asegurando el motor a la base de la máquina. En cuanto a la línea base de la empresa, los tiempos de producción de flujo en el mecanizado de ejes estriados antes de la automatización de la máquina sobrepasan en un 20% el Takt time, evidenciando efectivamente como se desaprovechaba la demanda.
- En el diseño mecánico ha sido fundamental establecer los parámetros de corte del proceso de mecanizado de ejes estriados mediante la hoja de procesos, la cual se ha especificado en base a la fresa de disco convencional usada por la empresa, gracias a la investigación se determinó una velocidad de corte de entre 18 a 25 m/min. Permitiendo calcular una potencia de corte de 0.1448 kW, con la cual se determinaron los parámetros de diseño adecuados.
- La selección de los motores a pasos parte del cálculo del torque resistivo y de aceleración requeridos para producir el movimiento de los ejes en la máquina, para el eje del cabezal divisor se ha calculado un torque necesario de 2.0017 Nm y para el eje longitudinal se ha calculado un torque necesario de 6.256 Nm.

- Para la implementación del proyecto resultó necesaria una reducción en el eje longitudinal debido a que el motor seleccionado presentaba un sobrecalentamiento al trabajar a una temperatura de 65°C después de una jornada completa, esto debido a que el motor trabajaba a sus valores límite de torque y velocidad en el posicionamiento rápido. Además, se han incorporado eficientemente un tablero eléctrico, el cual fue ubicado en el lateral derecho de la máquina, y un tablero de control, situado en el brazo de grúa para desplazarse del frente hacia un costado de la máquina facilitando el uso del operario.
- La fresadora horizontal Brown & Sharpe ha sido automatizada consiguiendo una precisión de 1.33 mm en el eje longitudinal debido al juego presente en el tornillo de potencia, y una precisión de $\pm 0.1^\circ$ en el cabezal divisor. No representando un inconveniente en cuanto a calidad para la empresa en la producción de ejes estriados.

Recomendaciones

- Emplear una herramienta de corte CNC permitiría trabajar a mayores velocidades de corte, mejorando a la par los tiempos de producción, pero se deben considerar los avances máximos con los respectivos torques a los que pueden operar este tipo de motores.
- Realizar una mayor cantidad de pruebas o ensayos no destructivos antes de automatizar este tipo de máquinas antiguas permitiría alcanzar un mejor diagnóstico y hasta una proyección sobre su tiempo de vida útil.
- Hacer uso de herramientas CNC puede facilitar el determinar los parámetros de diseño en la automatización de máquinas convencionales ya que estas herramientas cuentan con parámetros de corte establecidos.
- El cálculo del torque puede minimizarse empleando algún instrumento de medición más preciso, en este caso el torquímetro permitió determinar el torque resistivo en ambos ejes de manera experimental.
- El soporte del tablero de control podría poseer una articulación que le permita adicionalmente posicionarse de manera vertical, considerando facilitar el uso del operario sin que el desprendimiento de viruta o el flujo del refrigerante tengan acceso al mismo.
- Realizar el cambio a husillo de bolas en el aspecto mecánico y programar un lazo cerrado en el aspecto del sistema de control, permitirían incrementar significativamente la precisión en una máquina-herramienta convencional.

Bibliografía

Alacero. (12 de Mayo de 2015). Obtenido de Asociación Latinoamericana del Acero:

<https://www.alacero.org/es/page/el-acero/caracteristicas-del-acero>

Amor Alcón, G. (2018). *Evolución, análisis y estudio comparativo de las máquinas herramienta a lo largo de la historia*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

Automationdirect. (2007). *Sistema de motores paso a paso Manual No.: STP-SYS-MSP*. SureStep.

Bartsch, W. (2020). *Herramientas, máquinas, trabajo*. Reverte.

Bilbao. (29 de Noviembre de 2012). Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniería:

http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/723_ca.pdf

BKB. (Diciembre de 2019). *BKB*. Obtenido de Maquinaria Industrial:

https://bkbmaquinaria.com/wp-content/uploads/2019/12/Ficha-T%C3%A9cnica-Torno-CNC-CKE6136Z-DMTG_compressed.pdf

Brown, & Sharpe, M. C. (1944). *Repair parts for Brown & Sharpe No. 2 Universal, No. 2 Plain and No. 2 Vertical Milling Machines*. Providence.

Canal Mundo C.N.C con Arduino. (10 de Octubre de 2020). Obtenido de Plato divisor para fresadora (electrónica 1 de 2). Youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=HRN3SMXGH80>

Canal Mundo C.N.C. con Arduino. (3 de Octubre de 2020). Obtenido de Plato divisor con reducción. Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=bbivL2mhwII>

Canal Mundo C.N.C. con Arduino. (12 de Octubre de 2020). Obtenido de Plato divisor para fresadora (electrónica 2 de 2). YouTube:

https://www.youtube.com/watch?v=l6zEtHD_5Z4

- Cruz García, O. A., Guerra López, E. R., Herrera Castro, R. A., & Meza Orellana, N. O. (2014). *Diseño y construcción de una fresadora con control numérico por computadora para uso didáctico*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Darshan, T. S., Mohanambica, K. M., & Basavaraju, H. (2018). Diseño y Control de una máquina fresadora de 4 ejes con retrofit para aplicaciones industriales. *Revista Internacional de Ciencia Innovadora y Tecnología de la Investigación*, 668-673.
- Del Valle Zúñiga, J. A. (2003). *Estudio de factibilidad para la automatización de un torno y automatización de una fresadora*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Dharmawardhana, M., Ratnaweera, A., & Oancea, G. (2021). *Fresadora CNC inteligente compatible con STEP-NC con un controlador de arquitectura abierta*. Kandy: Universidad de Peradeniya.
- DP-504(-L)/DP-508(-L) Stepper Drive User Manual*. (2013). WUXI XINJE ELECTRIC CO., LTD.
- Espejo Mora, E., & Martínez, J. C. (Febrero de 2008). *mechanicmaster.mx*. Obtenido de <https://mechanicmaster.mx/tablas/Tabla-de-Fallas-en-Engran.es.pdf>
- Fallas, J. (2012). *Prueba de hipótesis Rechazar o no Ho: he ahí el dilema*.
- Freile Arauz, E. D. (2009). *Automatización de una máquina fresadora mediante control numérico computarizado*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- García Moreno, E. (1999). *Automatización de procesos industriales*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- González López, D. (2015). *Estudio experimental de fuerzas de corte en el fresado de un acero AISI 316L ASS*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

- González Rivadeneira, L. B., & Changoluisa Santacruz, C. J. (2016). *Diseño e implementación de un sistema CNC para la automatización de una fresadora Bridgeport perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Hernández Rodríguez, R., Cárdenas Arriaga, T. N., & Hernández Rodríguez, N. A. (2020). *Prueba de hipótesis estadística con Excel*. Guadalajara: amatEditorial.
- Juliá Lerma, J. M. (2019). *Estudio experimental de la vida a fatiga en uniones atornilladas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Kinco. (11 de Abril de 2019). *Kinco Automation*. Obtenido de Stepper System Catalog:
<http://www.kinco.cn>
- Koshkin, N. I., & Shirkévich, M. G. (1975). *Manual de Física elemental*. Moscú: Editorial MIR.
- Liming, G. (15 de Octubre de 2012). *Snailworks*. Obtenido de www.liming.org:
<http://www.liming.org/millindex/>
- Magnaflux. (8 de Marzo de 2017). *magnaflux.mx*. Obtenido de
<https://magnaflux.mx/Productos/Ensayos-por-Liquidos-Penetrantes/Consumibles.htm>
- Maquinaria Madrid S. A.* (15 de Febrero de 2002). Obtenido de Máquinas - herramienta nuevas y de segunda mano: <http://www.maquinariamadrid.com/docs/museo.pdf>
- Mitsubishi Materials*. (19 de Octubre de 2014). Obtenido de Metalworking solutions company:
https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s_n.pdf
- Motion & Control NSK*. (27 de Mayo de 2017). Obtenido de
<https://www.nskamericas.com/es/services/troubleshooting/ball-screws/wear-ball-screws.html#>

Murillo Sigero, A. (2010). *Análisis de defectos y como evitarlos en soldaduras de arco SMAW y SAW longitudinales y circunferenciales en ductos de transporte de hidrocarburos*. Villahermosa: Corporación Mexicana de investigación en materiales.

OP operate panel User manual. (2011). Xinje Electric Co., Ltd.

Orientalmotor. (2016). *orientalmotor.com*. Obtenido de https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2015-2016/H/Technical_Reference_Overview.pdf

Qin, W. (2013). *Diseño y análisis de una fresadora CNC rentable a pequeña escala*. Urbana: Universidad de Illinois.

Riba Romeva, C. (2002). *Diseño concurrente*. Barcelona: Edicions UPC.

Salazar, H., & Rossi, R. (2019). *Máquinas Fresadoras Taller de Mecánica I*. Universidad Nacional de Rosario.

Sánchez Robledo, C. A., & Cortés Rodríguez, J. H. (2011). *Diseño de la automatización para una fresadora convencional*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Sierra Ibáñez, F. (2006). *Sistematización de fresadora de piñón recto*. Medellín: Universidad EAFIT.

SureStep. (2005). *Manual del sistema SureStep*. 2b Ed. español.

Torrelavega. (2002). *FÍSICA I*. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.

Urrego Ospina, N. (17 de Abril de 2010). *Slideshare*. Obtenido de a Scribd company: <https://www.slideshare.net/nurrego/fresado>

Villacís Camacho, S. F., & León Guerrero, L. M. (2006). *Automatización de la fresadora Bridgeport serie I*. Latacunga: Escuela Politécnica de Ejército.

XD series PLC Manual de usuario [Hardware] (XD3/XD5/XDM). (2016). WUXI XINJE
ELECTRIC CO., LTD.

Anexos