



**Diseño y construcción de una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos para el laboratorio de
procesos de manufactura del DCEM**

Guayasamín Carrera, Esteban Santiago; Ramón Yanchatipán, Ángel Santiago y Taco Palomo,

Erick Jonathan

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Msc. Naranjo Guatemala, Carlos Rodrigo

02 de marzo del 2022



PROYECTO TITULACION - E.Guayasasamin - A. Ramon - E. Ta...

Scanned on: 15:28 March 3, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	65
Words with Minor Changes	16
Paraphrased Words	0
Omitted Words	0



Firmado digitalmente por:
CARLOS RODRIGO
NARANJO GUATEMALA

Firmado digitalmente por: CARLOS RODRIGO
NARANJO GUATEMALA
DN: cn=CARLOS RODRIGO NARANJO GUATEMALA
o=EC o=SECURITY DATA S.A. 2 ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION
Motivo: He revisado este documento
Ubicación:
Fecha: 2022-03-04 10:55:05:00

Ing. Carlos Naranjo MSc.
Tutor Proyecto



Website | Education | Businesses



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de integración curricular, “**Diseño y construcción de una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos para el laboratorio de procesos de manufactura del DCEM**” fue realizado por los señores **Guayasamín Carrera, Esteban Santiago ; Ramón Yanchatipán, Ángel Santiago; Taco Palomo, Erick Jonathan** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requerimientos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 02 de marzo del 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS RODRIGO
NARANJO GUATEMALA**

.....
Msc. Naranjo Guatemala, Carlos Rodrigo

Director

C.C.: 1707087084



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros **Guayasamín Carrera, Esteban Santiago ; Ramón Yanchatipán, Ángel Santiago; Taco Palomo, Erick Jonathan**, con cédulas de ciudadanía n° 172602643-6 ; n° 180458892-7 ; n° 1719838953 respectivamente, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Diseño y construcción de una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos para el laboratorio de procesos de manufactura del DCEM”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 02 de marzo del 2022

Firmas:

.....
Guayasamín Carrera, Esteban Santiago
C.C.: 1726026436

.....
Ramón Yanchatipán, Ángel Santiago
C.C.: 1804588927

.....
Taco Palomo, Erick Jonathan
C.C.: 1719838953



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros **Guayasamín Carrera, Esteban Santiago ; Ramón Yachatipán, Ángel Santiago; Taco Palomo, Erick Jonathan**, con cédulas de ciudadanía n° 172602643-6 ; n° 180458892-7 ; n° 1719838953 respectivamente, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: “**Diseño y construcción de una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos para el laboratorio de procesos de manufactura del DCEM**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 02 de marzo del 2022

Firmas:

.....
Guayasamín Carrera, Esteban Santiago
C.C.: 1726026436

.....
Ramón Yachatipán, Ángel Santiago
C.C.: 1804588927

.....
Taco Palomo, Erick Jonathan
C.C.: 1719838953

Dedicatoria

A mis Familiares, por su gran ejemplo y colaboración durante el transcurso de la carrera.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y amistad brindada a lo largo de mi formación
académica.

E. Santiago. Guayasamín C.

Dedicatoria

A mis padres Roció y Orlando, por su incansable paciencia me han enseñado a que los objetivos se logran con sacrificio y dedicación, como ejemplo de su esfuerzo y apoyo me han permitido llegar a culminar esta etapa académica.

A mi hermana Karen, por ser un pilar fundamental, un ejemplo de superación personal y crecimiento.

A mis abuelitos Hilda, Juana y Manuel quienes siempre me apoyaron con una voz de aliento y sabios consejos, me han guiado y ayudado a ser una persona ejemplar.

A mi novia Evelyn a quien agradezco por su infinita paciencia y apoyo incondicional en las adversidades.

A mi hija Iveth quien me enseñó que el amor tiene nombre y apellido, espero ser una persona de bien y ser un ejemplo de superación, Te amo.

A. Santiago. Ramon Y.

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres Isabel y César, siempre estaré eternamente agradecido sin escatimar esfuerzos se han sacrificado para educarme, me brindaron su amor y apoyo incondicional, y así me permitieron culminar con éxito esta nueva etapa en mi vida profesional. A mis hermanos por su apoyo constante a problemas personales y académicos, me han formado una persona de bien tanto profesional y como ser humano.

E. Jonathan Taco P.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de estudiar esta grandiosa carrera, en esta prestigiosa universidad.

A mis Familiares, por el cariño y amor brindado a lo largo de mi formación humana y profesional.

A mi tutor académico Ing. Carlos Naranjo MSc por habernos brindado su tiempo y compartido su experiencia y conocimiento los cuales nos han guiado de manera satisfactoria para poder concluir el presente trabajo.

Al jefe de laboratorio del proceso de manufactura del DCEM, Ing. Santiago Castellanos por habernos brindado su tiempo, acceso al laboratorio y compartido su experiencia y conocimiento los cuales nos han guiado de manera satisfactoria para poder concluir el presente trabajo.

A mis compañeros Santiago Ramón y Jonathan Taco, con quienes a lo largo de la carrera hemos tenido una buena convivencia y esos lazos han permitido tener la afinidad para poder culminar este proyecto.

E. Santiago. Guayasamín C.

Agradecimiento

Agradezco a dios que me guiado en todo momento de mi vida hasta llegar a culminar con éxito el presente proyecto.

A mis padres Roció y Orlando quienes me han apoyado de una manera incondicional, siempre han estado presente con su cariño y gran corazón hacia mí que me ha motivado a siempre alcanzar mis sueños.

A mi hermana Karen quien siempre ha estado presente en mis fracasos y victorias, motivándome a cumplir mis objetivos, te agradezco por tantas alegrías compartidas.

A mis abuelitos quienes siempre me han inculcado el esfuerzo para alcanzar mis objetivos.

A mi novia Evelyn quien es mi compañera y pilar fundamental de mi familia para crecer y seguir cumpliendo mis sueños.

A mi hija Iveth quien desde el primer día me ha brindado una sonrisa incondicional y el amor más puro, me ha permitido cumplir mis objetivos.

A toda mi familia y amigos que han sido parte de esta etapa universitaria, gracias por su cariño y apoyo en todo momento.

A mi tutor académico Ing. Carlos Naranjo MSc por habernos brindado su tiempo y compartido su experiencia y conocimiento los cuales nos han guiado de manera satisfactoria para poder concluir el presente trabajo.

A mis compañeros Santiago Guayasamín y Jonathan Taco, con quienes a lo largo de la carrera hemos tenido una buena convivencia y esos lasos han permitido tener la afinidad para poder culminar este proyecto.

A. Santiago. Ramon Y.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por darme el valor y perseverancia en no flaquear en los momentos más difíciles que se han presentado hasta llegar a culminar con éxito este proyecto.

A mis padres Isabel y César, por su constante apoyo, su amor infinito, su paciencia y tiempo que me brindaron, me permitieron afrontar los problemas y salir adelante esforzándome sabiendo que hay personas que creen en mí, y yo, cumpliré sus expectativas.

A mi familia, en especial a mis hermanos Patricia, Lourdes y Michael, por siempre estar presentes con sus consejos, cariño y apoyo.

A mis compañeros, Santiago R. por incluirme al desarrollo del proyecto y Esteban G., ambos demostraron ser excelentes personas y con su esfuerzo puesto cumplimos el objetivo.

A mi tutor, el ingeniero Carlos Naranjo, por darme la oportunidad y su confianza en desarrollar el presente proyecto, en conjunto de sus valiosos aportes y guías.

E. Jonathan Taco P.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo I: Generalidades	23
Introducción.....	23
Antecedentes.....	23
Justificación e importancia.....	24
Objetivos.....	25
Objetivo general.	25
Objetivos específicos.	25
Área de influencia	25
Alcance del proyecto.....	26
Módulo de transmisión de potencia y movimiento	27
Módulo de curvado.....	27
Módulo de control y soporte	28
Tiempo.....	28
Económico	28
Capítulo II: Marco Teórico	29
Definición.....	29
Doblado	29
Curvado.....	30
Parámetros de curvado	31
Fuerza de doblado	32

Tipos de curvadora	34
Por la disposición de rodillos	34
Curvadora asimétrica.....	34
Curvadora simétrica	34
Por el desplazamiento del rodillo	35
Desplazamiento vertical	35
Desplazamiento angular	36
Bastidor.....	39
Sistema de control	40
Tablero de control	40
Elementos eléctricos.....	41
Modularidad	42
Capítulo III: Diseño modular.....	44
Estudio de alternativas	47
Sistema de curvado	47
Alternativa 1 – Sistema de curvado de control electrónico	47
Alternativa 2 – Sistema de curvado de control manual	48
Sistema de transmisión.....	50
Estudio de alternativas	51
Transmisión de alta velocidad (motor – caja reductora).....	52

Alternativa 1: Sistema de transmisión Cadena – Catarina	52
Alternativa 2: Sistema de transmisión Bandas – Poleas.....	53
Sistema de acople (Caja reductora – Dados de curvado).....	55
Alternativa 1: Construcción de un acople rígido tipo brida.....	56
Alternativa 2: Acople rígido Love – joy.....	57
Sistema estructural de Soporte.....	58
Alternativa 1 – Sistema estructural de soporte con tres elementos.	59
Alternativa 2 – Sistema estructural de soporte con dos elementos.	60
Diseño modular	63
Módulo de curvado.....	63
Parámetros de diseño.....	63
Cálculo fuerza de doblado	65
Módulo transmisión.....	80
Cálculo de parámetros para el sistema de transmisión	81
Módulo estructural de soporte.....	104
Diseño Bastidor.....	105
Diseño estructura de soporte auxiliar.....	108
Análisis por elementos finitos módulo estructural de soporte	112
Diseño módulo de control	114
Circuito de control	114

Circuito de potencia.....	115
Capítulo IV: Construcción y Pruebas	117
Construcción módulo de curvado	117
Construcción módulo de transmisión	120
Construcción módulo estructural de soporte	121
Construcción tablero de control	122
Pruebas y resultados.....	125
Pruebas de funcionamiento.....	125
Pruebas de operación	129
Defectos en el proceso de curvado.....	131
Resultados pruebas de operación.....	133
Capítulo V: Análisis Económico y Financiero	136
Costos directos	136
Costos indirectos	141
Inversión total.....	142
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones	143
Conclusiones.....	143
Recomendaciones.....	143
Trabajos futuros.....	144
Bibliografía.....	145

Anexos.....	149
-------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Componentes disponibles en el laboratorio de procesos de manufactura</i>	26
Tabla 2. <i>Especificaciones iniciales</i>	46
Tabla 3. <i>Evaluación de las condiciones de diseño</i>	50
Tabla 4. <i>Resultado de parámetros evaluados</i>	50
Tabla 5. <i>Evaluación de parámetros de diseño</i>	55
Tabla 6. <i>Resultados de la evaluación</i>	55
Tabla 7. <i>Evaluación de alternativas</i>	58
Tabla 8. <i>Resultados de la evaluación</i>	58
Tabla 9. <i>Evaluación de las condiciones de diseño</i>	62
Tabla 10. <i>Resultado parámetros evaluados</i>	62
Tabla 11. <i>Parámetros de diseño</i>	63
Tabla 12. <i>Subsistemas e interfaces del sistema de curvado</i>	64
Tabla 13. <i>Selección de perfiles metálicos comerciales</i>	65
Tabla 14. <i>Fuerza de doblado</i>	66
Tabla 15. <i>Resultados obtenidos flecha C</i>	68
Tabla 16. <i>Resultados obtenidos flecha A</i>	69
Tabla 17. <i>Resultados obtenidos subsistema Ss1</i>	73
Tabla 18. <i>Selección del material de fabricación, base interna</i>	74
Tabla 19. <i>Condiciones de diseño mecanismo tornillo-tuerca</i>	75
Tabla 20. <i>Resultados obtenidos tornillo de potencia</i>	77
Tabla 21. <i>Accesorios mecánicos</i>	78

Tabla 22. <i>Características de la cadena de rodillos</i>	82
Tabla 23. <i>Características catarina conductora</i>	83
Tabla 24. <i>Características catarina conducida</i>	83
Tabla 25. <i>Parámetros de contacto</i>	85
Tabla 26. <i>Factores de Diseño</i>	89
Tabla 27. <i>Características de la caja reductora de velocidad</i>	91
Tabla 28. <i>Potencia necesaria vs Potencia suministrada</i>	92
Tabla 29. <i>Características de la cadena de rodillos</i>	93
Tabla 30. <i>Características catarina - flechas de curvado</i>	93
Tabla 31. <i>Parámetros de la flecha E</i>	95
Tabla 32. <i>Características geométricas de las chavetas</i>	97
Tabla 33. <i>Características Pernos Allen cabeza redonda</i>	100
Tabla 34. <i>Parámetros del acople rígido tipo brida.</i>	100
Tabla 35. <i>Parámetros de soldadura sobre las bridas</i>	104
Tabla 36. <i>Características bastidor máquina balanceadora</i>	105
Tabla 37. <i>Aplicación de cargas en el bastidor</i>	106
Tabla 38. <i>Características Angulo estructural</i>	109
Tabla 39. <i>Aplicación de cargas estructura de soporte</i>	110
Tabla 40. <i>Propiedades sección transversal columna (McCorman, 2012)</i>	111
Tabla 41. <i>Componentes circuito de control</i>	115
Tabla 42. <i>Componentes circuito de potencia</i>	116
Tabla 43. <i>Actividades realizadas en la construcción del módulo de curvado</i>	117
Tabla 44. <i>Actividades realizadas en la construcción del módulo de transmisión</i>	120
Tabla 45. <i>Actividades realizadas en la construcción de módulo estructural de soporte</i>	121

Tabla 46. Componentes módulo de Control	123
Tabla 47. <i>Check list prueba de funcionamiento</i>	128
Tabla 48. <i>Perfiles idóneos pruebas de operación</i>	129
Tabla 49. <i>Perfiles metálicos curvados</i>	130
Tabla 50. <i>Defectos en el proceso de curvado de perfiles metálicos</i>	131
Tabla 51. <i>Defecto por sobrecarga de operación</i>	132
Tabla 52. <i>Resultados obtenidos de operación, fase de sobrecarga</i>	134
Tabla 53. <i>Error Potencia teórica vs. Potencia experimental</i>	134
Tabla 54. <i>Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de curvado</i>	136
Tabla 55. <i>Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de transmisión</i> ..	138
Tabla 56. <i>Costos materiales empleados en la fabricación del módulo estructural de soporte</i>	139
Tabla 57. <i>Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de control</i>	139
Tabla 58. <i>Costos mano de obra para la fabricación de la máquina prototipo</i>	141
Tabla 59. <i>Costos indirectos del proyecto</i>	141
Tabla 60. <i>Inversión total realizada por los proyectistas</i>	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Proceso de doblado</i>	29
Figura 2. <i>Flexión plástica</i>	30
Figura 3. <i>Parámetros de curvado</i>	31
Figura 4. <i>Ángulo de curvado a) elemento en reposo, b) elemento conformado.</i>	32
Figura 5. <i>Fuerzas generadas al curvado del elemento estructural</i>	33
Figura 6. <i>Disposición de rodillos asimétricos</i>	34

Figura 7. <i>Disposición de rodillos simétricos</i>	35
Figura 8. <i>Desplazamiento vertical del rodillo</i>	36
Figura 9. <i>Desplazamiento angular de rodillos</i>	36
Figura 10. <i>Sistemas de transmisión</i>	37
Figura 11. <i>Transmisión por cadena de rodillos</i>	38
Figura 12. <i>Acople rígido tipo Brida</i>	39
Figura 13: <i>Tablero de control eléctrico</i>	41
Figura 14. <i>Metodología de diseño</i>	44
Figura 15. <i>Proceso general de trabajo</i>	45
Figura 16. <i>Diseño modular</i>	46
Figura 17. <i>Desplazamiento electrónico de los rodillos de rolado</i>	48
Figura 18. <i>Desplazamiento manual del rodillo de rolado</i>	49
Figura 19. <i>Generalidades del sistema de transmisión</i>	51
Figura 20: <i>Estudio de alternativas</i>	52
Figura 21. <i>Transmisión por Cadena- Catrina</i>	52
Figura 22. <i>Transmisión por bandas</i>	53
Figura 23. <i>Acople rígido tipo brida</i>	56
Figura 24. <i>Acople flexible Love - Joy</i>	57
Figura 25. <i>Sistema de soporte 1</i>	59
Figura 26. <i>Sistema de soporte 2</i>	60
Figura 27. <i>Esquema modular de curvado</i>	64
Figura 28. <i>Fuerzas generadas en el proceso de curvado</i>	67
Figura 29. <i>Sección crítica árbol C</i>	67
Figura 30. <i>Flecha A; a) Diagrama de fuerzas, b) Sección crítica</i>	68

Figura 31. <i>Modelo CAD a) Flecha superior, b) Flecha inferior</i>	70
Figura 32. <i>Modelo CAD a) chumacera de pared, b) Ensamble árbol inferior de rolado</i> ...	71
Figura 33. <i>Plancha de rolado; a) Eje simétrico, b) Profundidad especificada</i>	71
Figura 34. <i>Plancha de rolado; a) Transformación base, b) Esquema de fuerzas</i>	72
Figura 35. <i>Plancha superior; a) Transformación base, b) Esquema de fuerzas</i>	73
Figura 36. <i>Ensamble CAD estructura de rolado</i>	74
Figura 37. <i>Modelado CAD base interna</i>	75
Figura 38. <i>Modelo CAD; a) Collarín, b) Mecanismo de desplazamiento</i>	76
Figura 39. <i>Modelo CAD matrices de curvado</i>	78
Figura 40. <i>Modelado CAD accesorios mecánicos.</i>	79
Figura 41. <i>Componentes módulo de transmisión</i>	80
Figura 42. <i>Disposición general de los elementos</i>	81
Figura 43. <i>Esquema módulo de transmisión</i>	81
Figura 44. <i>Conjunto motor caja reductora</i>	84
Figura 45. <i>Flecha D</i>	86
Figura 46. <i>Diagrama de cuerpo libre flecha D</i>	87
Figura 47. <i>Diagrama Fuerza cortante</i>	87
Figura 48. <i>Momento flector</i>	88
Figura 49. <i>Factor de seguridad Flecha D (Simulación ANSYS)</i>	90
Figura 50. <i>Transmisión de potencia y movimiento</i>	91
Figura 51. <i>Flecha E</i>	94
Figura 52. <i>Diagrama de cuerpo libre Flecha E</i>	95
Figura 53. <i>Chavetas caras planas</i>	96
Figura 54. <i>Acople rígido tipo brida</i>	98

Figura 55. <i>Dimensionamiento del acople rígido</i>	99
Figura 56. <i>Comportamiento del acople tipo brida (Simulación ANSYS)</i>	101
Figura 57. <i>Deformación total del acople (Simulación ANSYS)</i>	102
Figura 58. <i>Factor de seguridad sobre los pernos (Simulación ANSYS)</i>	102
Figura 59. <i>Soldadura acople rígido</i>	103
Figura 60. <i>Bastidor máquina balanceadora</i>	105
Figura 61. <i>Cargas de trabajo en el bastidor</i>	106
Figura 62. <i>Estudio por elementos finitos del batidor, Deformación</i>	107
Figura 63. <i>Deformación bastidor</i>	108
Figura 64. <i>Diseño alámbrico estructura de soporte</i>	109
Figura 65. <i>Diagrama alámbrico método viga colaborante</i>	110
Figura 66. <i>Aplicación de cargas conjunto (bastidor - estructura auxiliar)</i>	113
Figura 67. <i>Estudio por elementos finitos modulo estructural de soporte, Deformación</i>	113
Figura 68. <i>Circuito de control</i>	115
Figura 69. <i>Circuito de potencia</i>	116
Figura 70. <i>Construcción del módulo de curvado</i>	119
Figura 71. <i>Construcción del módulo de transmisión</i>	121
Figura 72. <i>Construcción módulo estructural de soporte</i>	122
Figura 73. <i>Módulo de control máquina curvadora de tubos</i>	124
Figura 74. <i>Máquina Prototipo curvadora de tubos y perfiles metálicos</i>	125
Figura 75: <i>Diagrama previo al arranque y en su funcionamiento</i>	126
Figura 76. <i>Diagrama pruebas de operación</i>	127
Figura 77. <i>Precurvado perfil metálico</i>	129

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolló con el objetivo de diseñar y construir una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos semiautomática con el fin de mostrar el proceso de conformado en frío por deformación plástica en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la máquina cuenta con un avance semiautomático entregado por el motor eléctrico, reductor de velocidad y la palanca de fuerza, su diseño modular hace que pertenezca al grupo de máquina herramienta reconfigurable (MHR), sus principales módulos seleccionados son; módulo de curvado, módulo de transmisión, módulo de soporte y el módulo de control.

La materia prima para su conformado son perfiles metálicos comerciales entre ellos tenemos los perfiles cuadrados, perfil redondo, ángulo, platina, varilla maciza cuadrada, redonda y T, para ellos se dispondrá de un juego de matrices especiales que facilitaran por medio de diversas configuraciones a obtener el curvado deseado de perfiles metálicos de dimensiones no mayor a $1[\text{in}] \approx 25[\text{mm}]$.

La máquina dispone de una velocidad en las matrices de curvado de $20[\text{rpm}]$, velocidad máxima obtenida mediante la distribución de cadenas aprovechando la potencia entregada por el motor eléctrico.

PALABRAS CLAVE

- **CURVADO**
- **MODULAR**
- **MAQUINA HERRAMIENTA**

ABSTRACT

The present project was developed with the objective of designing and building a semi-automatic metal tube and profile bending machine in order to show the cold forming process by plastic deformation in the manufacturing process laboratory of the University of the Armed Forces. ESPE, the machine has a semi-automatic advance delivered by the electric motor, speed reducer and force lever, its modular design makes it belong to the group of reconfigurable machine tools (MHR), its main selected modules are; bending module, transmission module, support module and control module.

The raw material for its shaping are commercial metal profiles, among them we have square profiles, round profiles, angles, plates, solid square, round and T rods, for which a set of special dies will be available that will facilitate, through various configurations, obtain the desired bending of metal profiles with dimensions no greater than 25[mm].

The machine has a speed in the bending dies of 20[rpm], the maximum speed to be obtained through the distribution of chains taking advantage of the power delivered by the electric motor.

KEYWORDS

- **BENDING**
- **MODULAR**
- **MACHINE TOOL**

Capítulo I: Generalidades

Introducción

Estudiantes pertenecientes a la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, aprenden sobre los procesos de conformado de metales en frío, de forma práctica y teórica, entre ellos se encuentra el curvado de perfiles metálicos, el cual tiene una importante participación en la industria nacional.

El laboratorio de procesos de Manufactura del DCEM, no posee una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos dentro de sus instalaciones, por tal motivo es necesario diseñar y construir una máquina prototipo que permita curvar tubería y perfiles metálicos, la misma será semiautomática y modular. Al concluir la construcción, se podrá efectuar prácticas de curvado variando las geometrías de los perfiles.

Antecedentes

La carrera de ingeniería mecánica tiene como objetivo formar profesionales con excelencia humana y académica, competitivos y capaces de resolver problemas de la sociedad y de la industria en general, mediante el uso de herramientas tecnológicas. Los estudiantes en su formación realizan prácticas en los laboratorios de procesos de manufactura, con el fin de adquirir destrezas y de esta manera relacionar la teoría con la práctica.

Actualmente en Ecuador no existe una empresa que se dedique al diseño y construcción de máquinas curvadoras de perfiles metálicos formalmente, las máquinas que se utilizan y distribuyen en nuestro país generalmente son importaciones de países europeos.

A nivel nacional se han desarrollado investigaciones sobre el diseño y construcción de máquinas que permiten realizar un proceso de conformado en frío (Curvado), se mencionan a continuación:

(LLive & Klever, 2020) en su proyecto de tesis encuentran velocidades de trabajo para la curvadora desarrollada en la metalmecánica de San Bartolo, rango de velocidades óptimas para evitar discontinuidades como achataduras, las pruebas que se realizaron en el laboratorio determinaron que los rangos de trabajo para la maquina se encuentran dentro de los parámetros permitidos para evitar algún tipo de mal formaciones o discontinuidades dentro del proceso de curvado.

(Chávez, 2016) en su proyecto de tesis realiza un aporte importante en los rangos de fuerzas de curvado sobre perfiles metálicos, al igual que los ángulos y recomendaciones para una correcta ejecución del procedimiento

Una vez finalizado el proyecto el laboratorio dispondrá de una maquina curvadora de perfiles metálicos funcional, la cual aportará en la formación de los estudiantes del departamento

Justificación e importancia.

Actualmente el laboratorio de procesos de manufactura no cuenta con un equipo de curvado de perfiles metálicos que permitan estudiar el proceso de conformado en frio, lo que ha motivado a la ejecución del presente trabajo. En tal virtud, se proyecta diseñar y construir una maquina curvadora de perfiles metálicos (cuadrados, rectangular, redondo, barras sólidas, tipo L, tipo T y platinas) la misma contara con un sistema de matrices intercambiables, permitiéndole una versatilidad en el tipo de perfiles a curvar, semejantes a las maquinas industriales presentes en el campo laboral.

Se tiene como base teórica máquinas y diseños disponibles en el mercado europeo, como la curvadora semiautomática de NARGESA, la cual realiza curvados de tubos de diferentes diámetros y ciertos perfiles estructurales.

Además, se contempla el uso de componentes fuera de servicio, disponibles en el laboratorio de procesos de manufactura, los mismos luego de un proceso de verificación y reacondicionamiento se plantea una manera efectiva de aprovechar los componentes de máquinas no operativas, mejorando la infraestructura de este.

Con el desarrollo del proyecto se pretende fomentar el interés para la ejecución de nuevos trabajos dentro del laboratorio procesos de manufactura, los cuales generen interés en las empresas públicas y privadas, dando como resultado un progreso en las instalaciones.

Objetivos.

Objetivo general.

Diseñar y construir una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos, modular, semiautomática, para el laboratorio de procesos de manufactura del DCEM.

Objetivos específicos.

- Establecer las especificaciones de la máquina y sus sistemas modulares.
- Diseñar y construir el sistema motriz de la máquina curvadora de tubos con los elementos disponibles del laboratorio.
- Diseñar y construir el sistema de curvado para conformar los perfiles de acuerdo a los parámetros establecidos.
- Diseñar y construir la estructura de soporte y el sistema de control de la máquina.
- Realizar el montaje y pruebas de operación de la máquina

Área de influencia

La Carrera de ingeniería mecánica de la Universidad de las Fuerza Armadas ESPE, se beneficia con la ejecución del proyecto que impulsa las prácticas de laboratorio en el área de Procesos de manufactura.

La información que se obtenga del presente trabajo, será para beneficio institucional, tanto para los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica o afines, así como también para las personas externas que lo requieran. Esta máquina estará disponible para su uso en el laboratorio.

Alcance del proyecto.

El presente trabajo plantea diseñar y construir una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos para elaboración de prácticas de laboratorio en el área de conformado plástico de materiales dúctiles con un enfoque modular, dentro de sus módulos utilizará los componentes presentes en el laboratorio de manufactura los cuales se listan en la tabla 1.

Tabla 1.

Componentes disponibles en el laboratorio de procesos de manufactura

Componente	Marca	Características	Observaciones
Motor Eléctrico	Siemens	<ul style="list-style-type: none"> • Trifásico • 220 [V] • 3,0/3,6 [Kw] • 11,4/15,5 [A] • 60[Hz] • Diámetro del eje: 28[mm] 	Se realizaron pruebas de funcionamiento, las mismas arrojaron como resultados: Velocidad de giro del eje del motor: 1700[rpm]
Caja reductora de velocidad	Pujol Muntala	<ul style="list-style-type: none"> • Relación de transmisión 20:1 	Se comprobó la relación de transmisión y cambio de aceite de

		transmisión
Bastidor	Dimensiones:	El bastidor se
	<ul style="list-style-type: none"> • Largo: 700 mm • Ancho: 550 mm • Altura: 670 mm • Espesor paredes: 15, 20 y 25 [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> compone por planchas unidas mediante soldadura. Material: acero de bajo carbono.

La máquina curvadora para su diseño y construcción consta de los siguientes módulos: módulo de transmisión de potencia y movimiento; módulo de curvado o de trabajo; módulo de control y soporte, al finalizar su construcción por cada módulo se entregará:

Módulo de transmisión de potencia y movimiento

- Sistema de transmisión de potencia, el cual tendrá como componentes un motor eléctrico y una caja reductora de velocidad.
- Planos de diseño.
- Memoria de cálculo.

Para la selección de los componentes del sistema se analizarán las alternativas y posibles soluciones óptimas, que se ajusten a las necesidades tanto de diseño como de requerimientos de trabajo de la máquina curvadora.

Módulo de curvado

- Sistema para el curvado de tubos y perfiles.
- Juego de dados, para curvar una variedad de tubos y perfiles metálicos.
- Planos de diseño.
- Memoria de cálculo.

Módulo de control y soporte

- Bastidor principal de la máquina.
- Estructura de soporte.
- Tablero de control.
- Mando de operación a distancia.
- Planos de diseño.
- Memoria de cálculo.

Tiempo

El trabajo de diseño y construcción de la máquina se proyecta en un período no mayor a 5 meses.

Económico

La inversión del proyecto en su totalidad no pretende ser mayor a \$2000

Como producto final se entrega una máquina prototipo semiautomática capaz de curvar perfiles; cuadrado de 1 [in]= 25.4[mm], redondo 1 [in]= 25.4[mm] de espesor de pared menores a 2[mm] y platinas de 25.4[mm] X 2[mm]. La misma constará de un manual de usuario que contempla requerimientos de funcionamiento y mantenimiento preventivo para la correcta operación de sus módulos, las disposiciones de los diferentes componentes (Datos de curvado), recomendaciones y buenas prácticas de uso. Con la finalidad de precautelar la funcionalidad por un largo periodo de tiempo.

Capítulo II: Marco Teórico

Definición

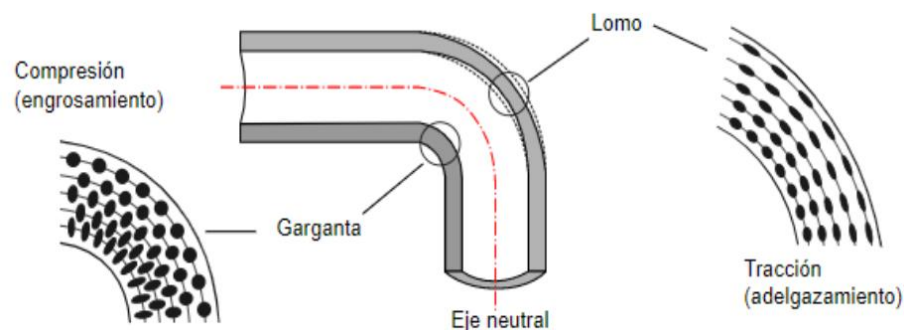
El conformado de perfiles metálicos utilizados en obras civiles, parque automotriz, partes de maquinaria, entre otros, pueden ser obtenidos por diferentes procesos, el más conocido por su facilidad y bajo costo es el conformado mecánico por deformación plástica, proceso de especial atención al desarrollo del proyecto.

Doblado

Este proceso consiste en aplicar una deformación al material en una sección determinada, si el doblado se lo propaga en toda la geometría del elemento estructural por medio de rodillos ubicados estratégicamente toma el nombre de proceso de curvado. La fuerza inicial se debe tener en cuenta: debido a que afecta directamente la calidad del producto terminado, una de las características principales del proceso de doblado es, al aplicar la presión, las fibras que están en contacto directo al dado, están sometidas a compresión disminuyendo su sección pero aumentando su espesor de pared, caso contrario sucede con las fibras alejadas al dado sometidas a tracción las fibras se extienden aumentando su área de contacto pero disminuyendo su espesor de pared (Garcés, 2019), ver Figura 1.

Figura 1.

Proceso de doblado



Nota. Recuperado de MIPSAs procesos de conformado de tubería,2022.

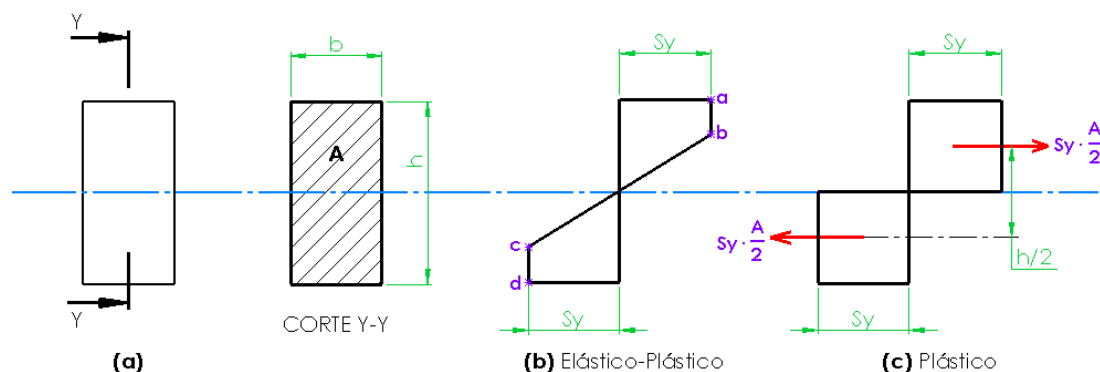
Curvado

Se lo reconoce de diferentes formas, entre ellas rolado y barolado, el barolado es utilizado para curvar netamente planchas metálicas aplicados en la fabricación de tanques atmosféricos, silos, recipientes de presión, etc, y el rolado proceso de curvado parcial o total del perfil metálico. Tanto el rolado como el barolado permite controlar el radio de curvatura cumpliendo las necesidades del cliente.

El curvado de materiales dúctiles tiende a recuperarse elásticamente, cuando el elemento no regresa a su geometría inicial, se afirma que el material ha obtenido un comportamiento plástico debido a las cargas aplicadas, ver Figura 2-c, este fenómeno se le conoce como deformación irreversible o permanente, se caracteriza porque el espesor del material es constante durante o después del proceso, la matriz de curvado superior ejerce presión al elemento y las matrices inferiores son de apoyo, la fricción que se genera entre las matrices y el elemento favorece el desplazamiento bidireccional en su plano horizontal (Garcés, 2019).

Figura 2.

Flexión plástica



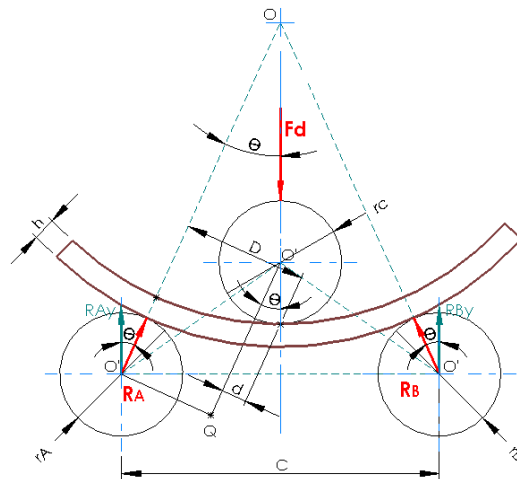
Nota: Comportamiento plástico en materiales dúctiles, Desarrollado por el autor.

Parámetros de curvado

Los parámetros de curvado determinan la fuerza de deformación plástica para cada elemento metálico, ver Figura 3, información relevante al diseño de los componentes mecánicos que están sometido a cargas estáticas durante su operación.

Figura 3.

Parámetros de curvado



Nota. Desarrollado por el autor.

Donde:

F_d : fuerza de doblado.

R_A y R_B : fuerza en los rodillos al contacto del elemento metálico.

r_A , r_B y r_C : radio de las matrices.

m : distancia desde el origen de la matriz hasta el contacto del elemento metálico.

D : distancia del elemento entre el eje simétrico del rodillo superior y el contacto de la matriz inferior.

d : sección del perfil a ser deformado desde su eje simétrico del rodillo superior.

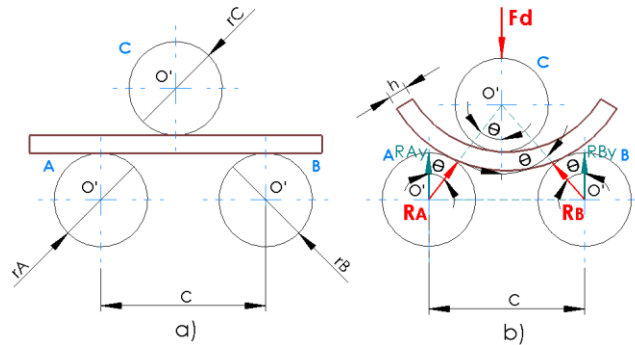
θ : ángulo de curvado.

El ángulo de curvado Θ , toma un valor mínimo y un máximo como se muestra en la

Figura 4.

Figura 4.

Ángulo de curvado a) elemento en reposo, b) elemento conformado.



Nota. Desarrollado por el autor.

De la Figura 3 se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{C}{2 * (r_C + r_A + e)} \right) \quad (\text{Ec. 2.1.})$$

$$m = r * \sin(\theta) \quad (\text{Ec. 2.2.})$$

$$D = \frac{\left(\frac{C}{2} - m \right)}{\cos(\theta)} \quad (\text{Ec. 2.3.})$$

$$d = r * \tan(\theta) \quad (\text{Ec. 2.4.})$$

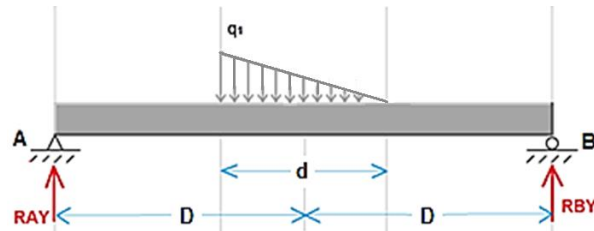
Fuerza de doblado

Para determinar la fuerza de doblado se inicia con un ángulo Θ mínimo, ver Figura 4-a, por estudios realizados en construcción de máquinas similares concluyen una carga triangular distribuida, ver Figura 5, que varía de acuerdo a las características del espesor del material en función del ángulo de rolado Θ . La fuerza transmitida es mayor al inicio de contacto y es

constante mientras alcanza el plano simétrico del rodillo superior (Imbaquingo & Llive, 2020), se obtiene las siguientes ecuaciones.

Figura 5.

Fuerzas generadas al curvado del elemento estructural



Nota: Desarrollado por el autor

$$Fd = \frac{q1 * d}{2} \quad (\text{Ec. 2.5.})$$

Donde $q1$ es la carga triangular distribuida, sobre la distancia (d) que recorre la superficie del rodillo superior al inicio del proceso de curvado del elemento estructural.

$$R_{AY} = \frac{q1 * d * (3D + 2d)}{12D} \quad (\text{Ec. 2.6.})$$

$$R_{BY} = \frac{q1 * d * (3D - 2d)}{12D} \quad (\text{Ec. 2.7.})$$

Fuerzas resultantes, ver Figura 3.

$$R_A = \frac{R_{AY}}{\cos(\theta)} \quad y \quad R_B = \frac{R_{BY}}{\cos(\theta)} \quad (\text{Ec. 2.8.})$$

Cálculo fuerza de doblado.

$$Fd = \frac{6D * \cos(\theta) * Mp}{(3D - 2d) * \left(D + \frac{2d}{3} * \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{d}{3D}} \right)} \quad (\text{Ec. 2.9.})$$

$$Mp = S_y * Z$$

Toda máquina herramienta de conformado por deformación plástica genera fuerzas de rozamiento entre elemento metálico y matriz en su proceso de curvado, para cuantificar su valor se utiliza la ecuación definida por (Imbaquingo & Llive, 2020).

$$Fr = 0,7 * \left(\frac{R^3}{2 * r} \right) * \left(\frac{1}{Sy^{\frac{1}{2}}} \right) * n \quad (\text{Ec. 2.10.})$$

El diseño de los componentes mecánicos del módulo de curvado se inicia con la fuerza de doblado.

Tipos de curvadora

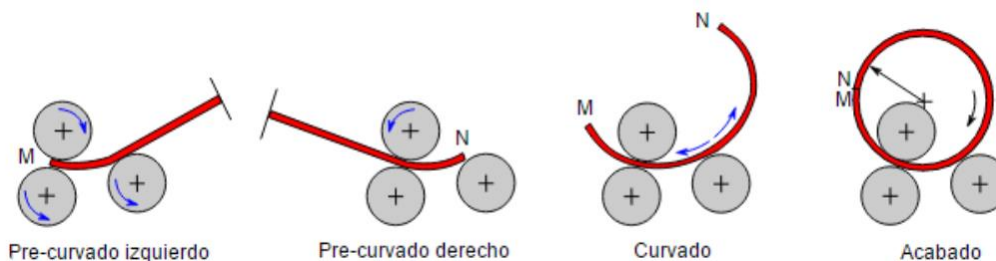
Por la disposición de rodillos

Curvadora asimétrica

Máquina herramienta al curvado de planchas y perfiles metálicos se caracteriza en tener un rodillo en cada plano; superior, inferior y lateral, su disposición de rodillos favorece el curvado de los bordes facilitando el recorrido del elemento metálico obteniendo acabados sin pérdida de material en la Figura 6, se observa el precurvado y curvado del elemento (García, 2019).

Figura 6.

Disposición de rodillos asimétricos



Nota. Imagen recuperada de MIPSAs procesos de conformado de tubería,2022.

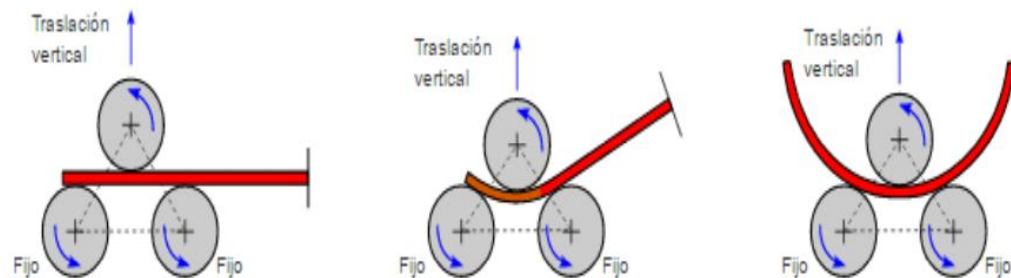
Curvadora simétrica

Máquina herramienta de configuración de tres rodillos en posición triangular donde sus rodillos inferiores están fijos y el rodillo superior móvil, los tres rodillos son del mismo diámetro. Para obtener una forma adecuada del elemento metálico es necesario un precurvado, ver Figura 7, las curvadoras se usan en la mayoría de talleres que prestan el servicio de curvado de perfiles

y tuberías, para cada elemento metálico en dar la curvatura deseada se dispone de su respectiva matriz de rolado (García, 2019).

Figura 7.

Disposición de rodillos simétricos



Nota. Imagen recuperada de MIPSAs procesos de conformado de tubería, 2022.

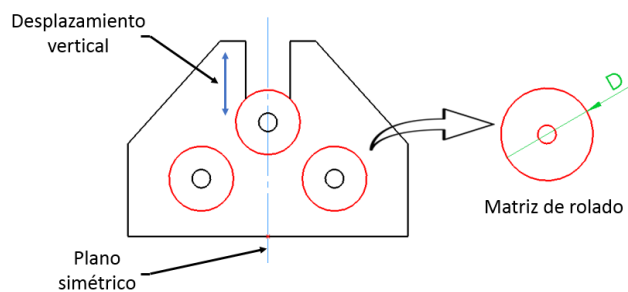
Para obtener buenos resultados se requiere aceros con propiedades convenientes, bajo punto de fluencia y alta ductilidad propiedades que son afectadas directamente por la temperatura de trabajo. (UMSS, 2015)

Por el desplazamiento del rodillo

Para el proceso de curvado, los rodillos inferiores en máquinas convencionales permanecen fijos con movimiento rotatorio en su eje de simetría, cumplen la función de paralelismo horizontal entre los rodillos y perfil metálico. A media del crecimiento industrial surgieron necesidades en donde los rodillos inferiores no necesariamente deben estar fijos, actualmente se encuentran dos tipos de desplazamiento.

Desplazamiento vertical

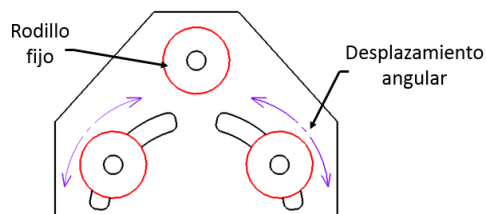
Diseño convencional de tres rodillos, ver Figura 8, dos inferiores permanecen fijos y el tercero ejerce la carga estática a medida que se desplaza verticalmente en su plano de simetría, su diseño es pensado para perfiles estructurales de dimensiones que no sobrepasen al radio de las matrices de rolado.

Figura 8.***Desplazamiento vertical del rodillo***

Nota: Desarrollado por el autor

Desplazamiento angular

Diseño de tres rodillos donde el superior es fijo y los rodillos inferiores son accionados por medio de cilindros oleohidráulicos que ejerce mayor presión de curvado, ver Figura 9, pensado para perfiles metálicos usados comúnmente en estructuras de acero.

Figura 9.***Desplazamiento angular de rodillos***

Nota: Desarrollado por el autor

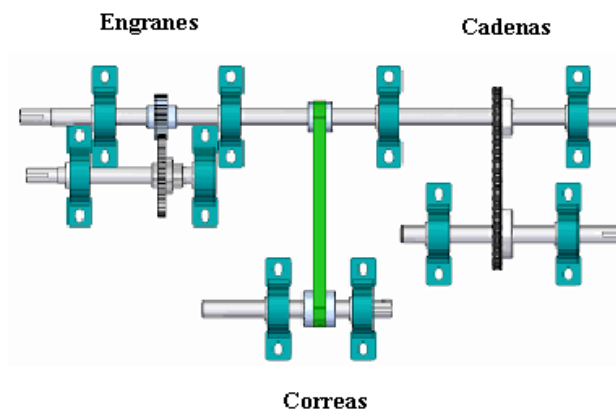
Sistemas de transmisión y potencia

El objetivo principal de los sistemas de transmisión es llevar la potencia mecánica y el movimiento generado hacia los componentes de una máquina, los componentes de arranque permiten vencer la inercia de los elementos para que la máquina pueda funcionar y cumplir con la finalidad para la cual fue diseñada.

Uno de los mejores sistemas de transmisión de potencia mecánica es por medio del movimiento giratorio de una flecha, el cual puede estar soportado por cojinetes, dicho movimiento se transmite a los componentes de la máquina, para este fin se pueden utilizar engranes, bandas o cadena de distribución, tomando en cuenta las necesidades de funcionamiento, y la disposición de estos permiten aumentar o disminuir la velocidad entre los ejes y con ello modificar el par de torsión de estos.

Figura 10.

Sistemas de transmisión



Nota. Sistemas de transmisión utilizados en la industria; Recuperado de (Lara, 2017)

Transmisión por cadena

Los sistemas de transmisión por cadenas se utilizan para transmitir potencia mecánica y movimiento circular entre dos flechas que se encuentran alejados entre sí.

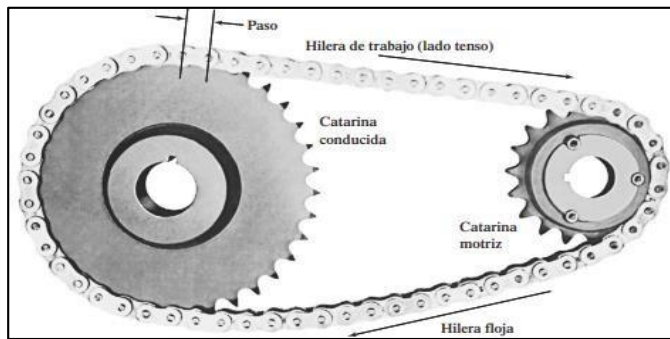
La transferencia de dicho movimiento entre dos ejes se logra mediante la interacción de una cadena y catarinas la cual se monta sobre ambos ejes que transmiten su movimiento hacia las catarinas que se mueven juntamente.

Sistema reductor Piñón Cadena

Los sistemas mediante cadenas proporcionan una relación de transmisión constante debido a que por la geometría y las fuerzas que se ponen en contacto, no se

consideran pérdidas por deslizamiento o arrastre, los elementos del sistema proveen una larga vida y una alta capacidad para transmitir potencia a varios ejes partiendo de una sola fuente. (Budynas & Nisbett, 2012)

Figura 11.



Transmisión por cadena de rodillos

Nota. Recuperado de (Mott, 2006)

La cadena de rodillos es una de las más utilizadas en la industria, esta configuración permite transmitir potencia con una fricción excepcionalmente baja entre la cadena y las ruedas dentadas llamadas catarinas ver figura 11. Para transmitir potencia es necesario determinar las capacidades de trabajo y el tamaño de la cadena en función de las velocidades de rotación y la potencia que se desea transmitir. (Mott, 2006)

Reductor de velocidad

El reductor de velocidad para un motor eléctrico modifica la velocidad de giro en el eje de entrada, hasta obtener los parámetros deseados en la salida según las necesidades de funcionamiento de la máquina.

Acoplamientos

Se trata de un dispositivo de conexión que conecta dos ejes en movimiento, el mismo permite transmitir potencia y momento torsor.

Acoplamientos rígidos

Un acoplamiento rígido es un dispositivo de acoplamiento que se utiliza para

conectar dos ejes que se encuentran alineados, y no presentan desalineación en ninguna dirección de los ejes.

Acoplamiento rígido tipo brida

Es un dispositivo que se utiliza para transmitir potencia y torque mecánico a los ejes de conexión de una máquina. Esta configuración se utiliza generalmente cuando se dispone de acceso a los dos ejes.

Su estructura consta de dos platos (bridas), fijadas a los ejes por medio de chavetas, se utilizan en ejes de igual o diferentes diámetros, y el acoplamiento de las bridas se realiza por medio de tornillos y tuercas.

Figura 12.

Acople rígido tipo Brida



Nota. Recuperado de (Infomecanica, 2020)

Bastidor

Un bastidor es una estructura rígida, y su función es dar un soporte a todos los componentes la máquina. Esta debe garantizar el enlace entre todos estos elementos, los cuales generan cargas en el proceso en el cual se utiliza la máquina, así como también su peso muerto.

A continuación, se nombran algunos elementos que se debe considerar para el diseño de un bastidor:

- Peso

- Tamaño
- Rigidez
- Resistencia
- Costo de fabricación
- Material

Entre los materiales que se utilizan para la construcción de bastidores están: acero, aluminio, entre otros materiales compuestos. Cuando queremos absorber vibraciones, el material más aconsejable es el hierro fundido, ya que posee partículas de carbono, las cuales ayudan a tener una mejor dispersión de las mismas y cabe señalar que su costo es bajo.

En cuanto a la estructura de un batidor, está conformada por travesaños y largueros, en los cuales son fijados los componentes de la máquina, a distancias determinadas para que haya una distribución adecuada de las cargas durante los procesos de trabajo (Garcés, 2019).

Sistema de control

La maquinaria industrial requiere de un funcionamiento controlado, el cual nos permite proteger sus componentes mecánicos y eléctricos.

Tablero de control

El tablero es un conjunto que integra elementos eléctricos y mecánicos, los cuales cumplen las funciones de separación, soporte, protección y defensa de los dispositivos electrónicos dentro del sistema eléctrico (Briceño, 2020).

Se encarga de realizar una distribución adecuada de los elementos mecánicos y eléctricos en su interior, estos elementos son distribuidos mediante parámetros los cuales se determinan dependiendo la aplicación. Ver figura 13

Figura 13:

Tablero de control eléctrico



Nota. Recuperado de (Ingmecafenix, 2016)

Existen varios elementos importantes en el entorno de un tablero de control, tales como:

- Temperatura
- Condiciones ambientales
- Vibraciones y causantes de la misma
- Fácil acceso a los elementos eléctricos
- Polvo
- En cuanto a los elementos que debemos proteger, se debe considerar:
Segregación interna; resistencia de arco interno; resistencia mecánica.

Elementos eléctricos

En la actualidad se cuenta con un amplio catálogo de componentes eléctricos y electrónicos, los cuales son utilizados en la construcción de tableros con el fin de crear circuitos para una gran variedad de aplicaciones industriales, a continuación, se detallan funciones y aplicaciones de los componentes electrónicos utilizados en el proyecto.

- Breaker trifásico: Su función es proteger las instalaciones eléctricas de corto circuitos y sobre corrientes.
- Interruptor eléctrico: Su función es interrumpir o desviar el paso de la corriente eléctrica en el circuito.
- Bobina relé: Su función es abrir o cerrar circuitos eléctricos independientes.
- Relé térmico: Su función es proteger a los motores eléctricos contra el exceso de corriente, cuando este supera sus valores normales.
- Contactores: es un interruptor accionado a distancia por medio de la electricidad, se los encuentra en circuitos de potencia con una carga alta de corriente.
- Paro de emergencia: Su función es interrumpir el paso de corriente en el circuito.
- Pulsadores: Su función es activar o desactivar actuadores entre ellos tenemos motores, válvulas, bombas, partes de procesos, entre otros (Ingmecafenix, 2016).

Modularidad

En los últimos años la evolución industrial no se ha detenido, más sectores requieren de productos con tiempos de producción y costos reducidos, por ello se ha creado el modularidad de maquinaria, su principal ventaja es el mejoramiento continuo en los procesos de producción del producto y en la prolongación de su ciclo de vida, la modularidad ha sido estudiada en términos de funcionalidad y constructivo (Rodríguez, 2005).

Los métodos conocidos para el diseño de un sistema modular son:

- Diseño modular de Erixon
- Diseño modular de productos

- Diseño modular de Reuso (Jimenez, 2012).

El diseño modular de Erixon (MFD) será tomado en cuenta en el desarrollo del presente proyecto, ya que el mismo se caracteriza por evaluar sistemas modulares priorizando su desarrollo, construcción, pruebas y reconfiguración para la optimización del diseño.

Criterios de diseño modular de Erixon (MFD):

- Requerimientos del cliente.
- Analizar y determinar soluciones a los requerimientos impuestos por el cliente, se lo realiza mediante un esquema funcional.
- Establecer los posibles módulos y su tipo de ensamble.
- Reconfiguración modular para mejorar el diseño.

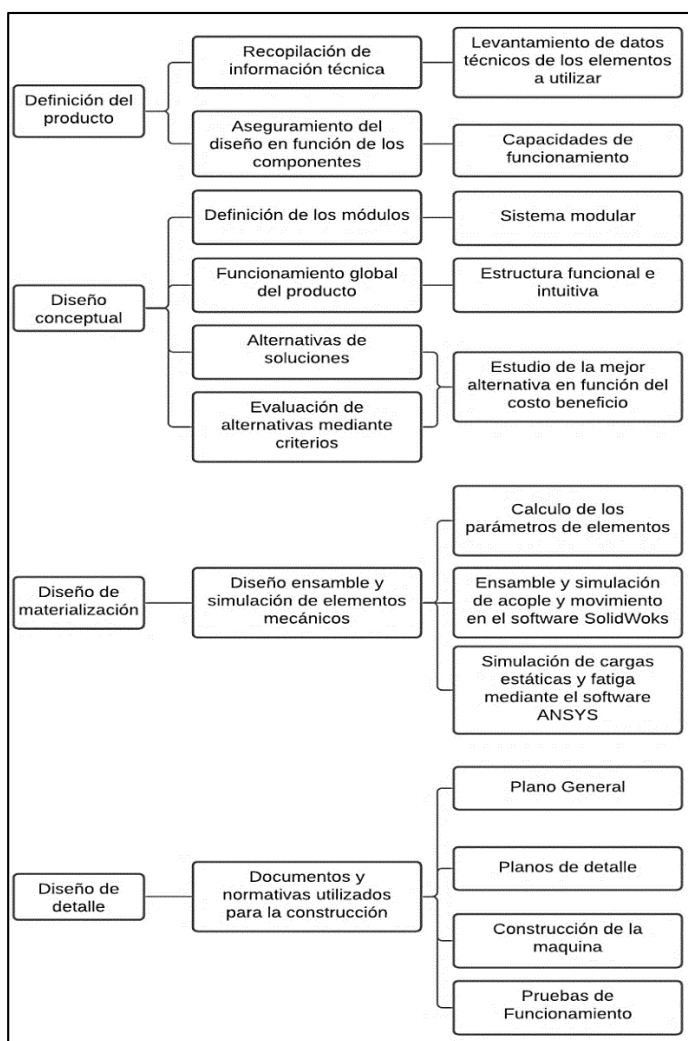
La presente metodología nos permite desarrollar módulos independientes entre sí, esto conlleva al mejoramiento de cada sistema modular, sin alterar las características de los otros módulos que conforman la máquina prototipo.

Capítulo III: Diseño modular

El capítulo desarrollará el diseño de los módulos de la curvadora de perfiles metálicos, consistirá en una serie de etapas de selección y diseño de los diferentes elementos mecánicos necesarios para la fabricación de la máquina. En la figura 14, se presenta en forma de diagrama la metodología que se utiliza para el diseño y construcción de la maquina curvadora de perfiles metálicos.

Figura 14.

Metodología de diseño



Nota: Desarrollado por el autor

Análisis de la estructura funcional

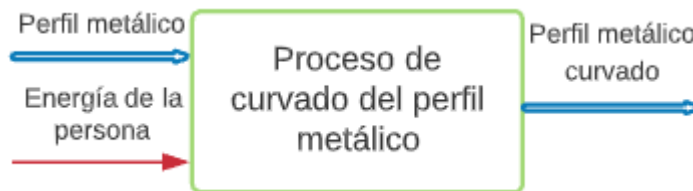
El análisis de estructura funcional permite conocer los procesos que realiza la máquina, los procedimientos para su desarrollo y el cumplimiento de los objetivos, estudiando las entradas que se tienen y las salidas que se espera al finalizar el proceso, se trata de la base fundamental para realizar un análisis de la estructura modular. (Barriga & Santillan, 2020)

Desarrollo de diagramas funcionales

En la figura 15, se puede apreciar de manera general los recursos el proceso y el resultado que se espera de la curvadora de perfiles, en la misma se detalla la relación entre los flujos de entrada y las salidas: Intervención del operario el material primario, con un flujo de salida que es el perfil doblado.

Figura 15.

Proceso general de trabajo



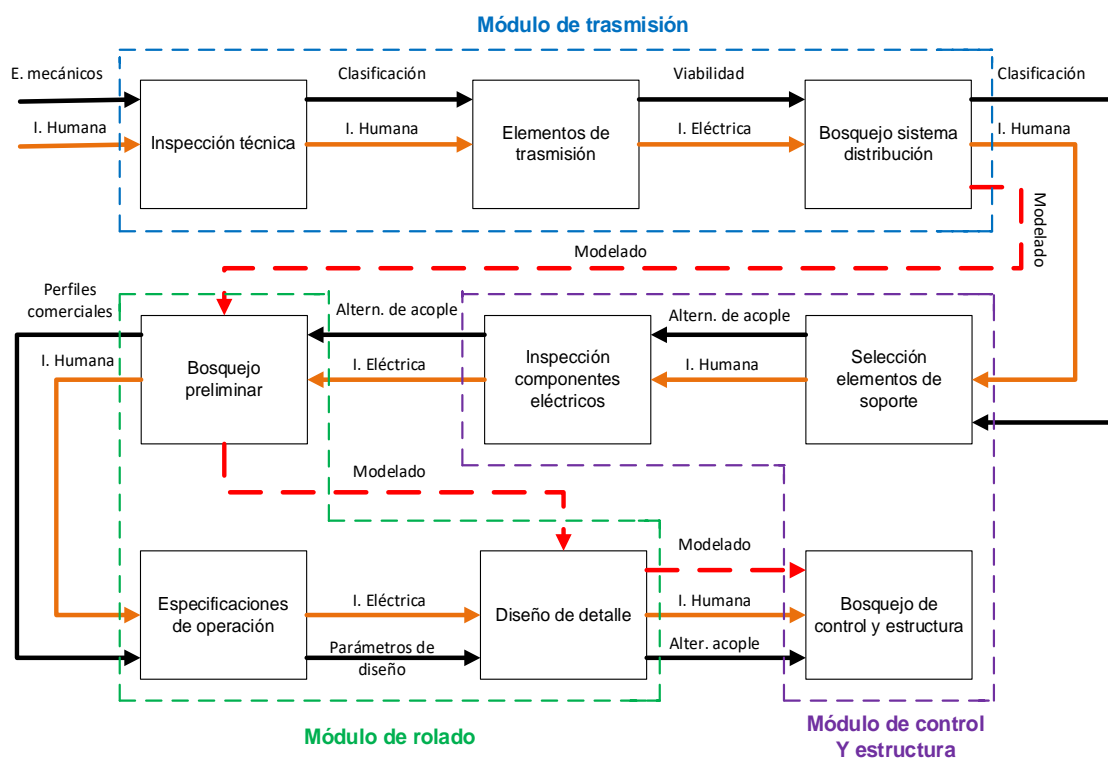
Nota: Desarrollado por el autor

Análisis de la estructura modular

El análisis modular permite conocer de una manera más detallada los procesos que existen en la máquina curvadora de perfiles metálicos dividiendo los mismos en módulos en la figura 16, se observa que el punto de partida son los tres módulos principales para el diseño y la construcción, módulo de rolado, modulo del sistema de transmisión, modulo estructural y control

Figura 16.

Diseño modular



Nota: Desarrollado por el autor

A continuación, se detalla las especificaciones iniciales (Tabla 2), subsecuente a su diseño y finalmente la construcción de la máquina herramienta.

Tabla 2.

Especificaciones iniciales

Voz del cliente

- La máquina debe ser de carácter didáctico.
 - La máquina debe rolar perfiles cuadrados, perfil redondo, ángulo, platina, varilla maciza cuadrada, redonda y T.
 - La máquina debe ser desmontable.
 - La máquina debe ser fácil de transportar.
-

-
- La máquina debe brindar seguridad al usuario.
 - La máquina debe ser de fácil operación.
 - La máquina no debería exceder el presupuesto de 2000 dólares.
-

Nota. Necesidades encargadas por el jefe de laboratorio.

Voz del ingeniero

- Manual de operación de la máquina curvadora.
- Motor eléctrico.
- Priorizar uniones no permanentes en su diseño.
- Facilidad de traslado.
- Cubiertas de seguridad.
- Baja complejidad de componentes mecánicos.
- Materiales disponibles dentro del mercado ecuatoriano.

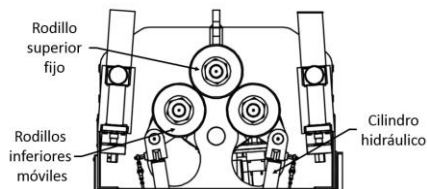
Estudio de alternativas

Sistema de curvado

Encargado en conformar perfiles estructurales de acero, ejerciendo una fuerza externa al elemento obteniendo el comportamiento plástico del material.

Alternativa 1 – Sistema de curvado de control electrónico

Se caracteriza por la distribución asimétrica en sus rodillos, los rodillos inferiores son controlados electrónicamente entregando una capacidad máxima de curvado para tubo redondo de 4[in], su avance de 5[rpm] en sus tres rodillos y la regulación de curvado independiente de sus rodillos inferiores permite un radio mínimo de 200[mm] para perfil macizo cuadrado de $\frac{1}{2}$ [in].

Figura 17.*Desplazamiento electrónico de los rodillos de rolado*

Nota. Imagen adaptada de Nargesa curvadora MC650, 2021.

Ventajas

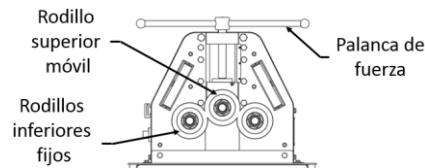
- Límite de curvado programables.
- Mayor rapidez de operación.
- Menor pérdida de material.
- Tablero de control y accionamiento de la máquina.

Desventajas

- Componentes mecánicos, hidráulicos y eléctricos demandan más espacio de ensamble.
- Fugas de aceite por presiones de operación.
- Requiere de mayor cuidado en su mantenimiento.
- Mayor costo de fabricación.

Alternativa 2 – Sistema de curvado de control manual

Distribución de rodillos simétricos con avance de 6[rpm] en sus rodillos inferiores, el desplazamiento del rodillo inferior es controlado por el operador entregando una capacidad máxima de curvado para tubo redondo de 2[in], radio mínimo de curvatura 200[mm] para varilla cuadrada maciza de ½[in].

Figura 18.*Desplazamiento manual del rodillo de rolado*

Nota: Imagen adaptada de Nargesa curvadora MC150B, 2021.

Ventajas

- Facilidad de operación.
- Simplicidad en sus componentes mecánicos.
- Menor costo de fabricación.
- Mantenimiento requiere menos recursos.

Desventajas

- Menor precisión en cada ciclo de curvado.
- Producción limitada.
- Requiere de mayor tiempo de producción.
- Control visual del elemento en cada ciclo de rolado.

Evaluación de alternativas sistema de curvado

Para el desarrollo del sistema de curvado se propuso las siguientes condiciones más relevantes.

- Dimensiones moderadas al espacio disponible.
- Bajo costo de fabricación.
- Su tiempo de producción constante.
- Facilidad de mantenimiento.

Para evaluar las condiciones se utiliza la matriz de priorización de Holmes en la cual (0) representa una prioridad baja, (1) una prioridad alta.

Tabla 3.

Evaluación de las condiciones de diseño

Bajo costo=Mantenimiento> Tamaño > Tiempo						
Condición	Dimensión	Bajo costo	Tiempo	Mantenimiento	Σ+1	Puntaje
Dimensión		0,5	1	0	2,5	0,25
Bajo costo	0,5		1	0,5	3	0,30
Tiempo	0	0		0,5	1,5	0,15
Mantenimiento	1	0,5	0,5		3	0,30
SUMA					10	1,00

Alternativas a evaluar del módulo de rolado.

Alternativa 1.- sistema de curvado de control electrónico.

Alternativa 2.- sistema de curvado de control manual.

En la Tabla 4, se identifica la alternativa de mayor prioridad que se ajusta a las necesidades del cliente, el procedimiento de las evaluaciones se lo detalla en el Anexo A-1.

Tabla 4.

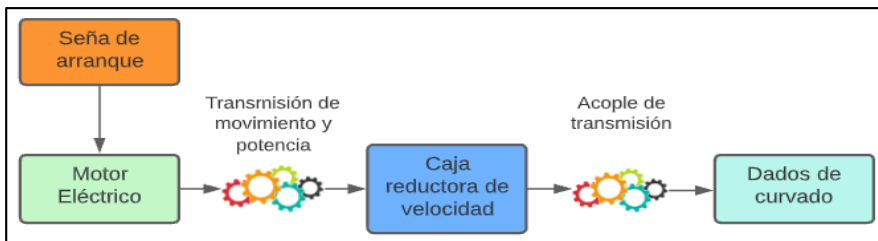
Resultado de parámetros evaluados

Parámetro	Dimensión	Bajo costo	Tiempo	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	(0,25) (0,33)	(0,30)(0,33)	(0,15)(0,67)	(0,30)(0,33)	0,38	2
Alternativa 2	(0,25) (0,67)	(0,30)(0,67)	(0,15)(0,33)	(0,30) (0,67)	0,62	1

Nota: Prioridad de relevancia al diseño del módulo de rolado.

Sistema de transmisión

El sistema de transmisión cumple la función de transmitir el movimiento y potencia mecánica hacia los dados de curvado. El motor eléctrico transmite movimiento y potencia hacia la caja reductora, la misma que a su salida debe ser capaz de entregar la velocidad de trabajo de la máquina curvadora.

Figura 19.*Generalidades del sistema de transmisión*

Nota: Desarrollado por el autor

Requerimiento del sistema de transmisión

El módulo de transmisión debe ser capaz de brindar los siguientes requerimientos para el correcto funcionamiento de la máquina curvadora:

- La velocidad de giro de los dados de curvado: [20] rpm
- Capacidad necesaria para curvar perfiles metálicos requeridos (Tubo rectangular 40 x 20 x 2 [mm])

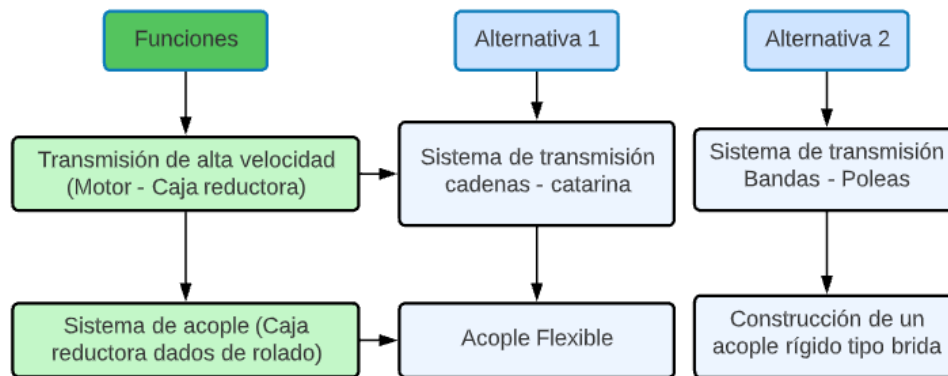
Limitaciones del sistema

El Módulo debe ser capaz de interactuar y ajustarse a las condiciones iniciales mencionadas en el capítulo anterior, tales como:

- Espacio y disposición de los elementos sobre el bastidor
- Disponibilidad en la adquisición de los elementos seleccionados

Estudio de alternativas

La potencia mecánica y el movimiento que proporciona el motor eléctrico requiere de operaciones las cuales permitan vencer la inercia de los elementos mecánicos presentes en la máquina, en la figura 20, se presentan las funciones y alternativas dentro del sistema de transmisión.

Figura 20:*Estudio de alternativas*

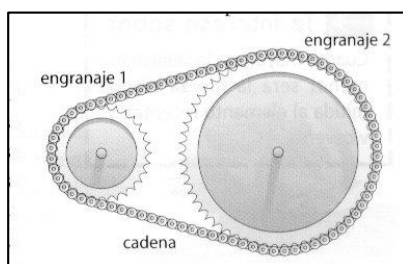
Nota: Desarrollado por el autor

Transmisión de alta velocidad (motor – caja reductora)

La función principal del sistema es vencer las fuerzas de inercia de los componentes de la máquina curvadora, igualmente transmitir la potencia y movimiento para el funcionamiento dentro de los parámetros deseados.

Alternativa 1: Sistema de transmisión Cadena – Catarina

Permite transmitir la potencia y movimiento con una gran eficiencia, ya que es un sistema en el cual las pérdidas por deslizamiento son mínimas.

Figura 21.*Transmisión por Cadena- Catrina*

Nota: recuperado de (Ferregon, 2021)

Ventajas:

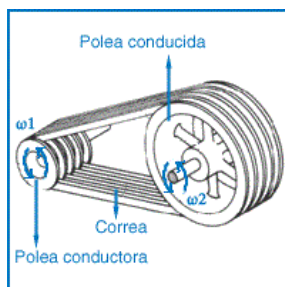
- Este sistema es muy eficiente en transmitir potencia mecánica
- No existe deslizamientos ya que los eslabones de la cadena encajan en cada diente de la Catarina.
- Sistema compacto
- La longitud en la cadena puede ser fácilmente variable, con el aumento o disminución de eslabones.
- Mantenimiento correctivo rápido (Reemplazar eslabones en la zona que sea necesario)

Desventajas:

- Es un sistema el cual necesita de una lubricación periódica para evitar rozamientos y desgastes excesivos entre sus componentes.
- El costo de sus componentes es moderado.

Alternativa 2: Sistema de transmisión Bandas – Poleas

Las bandas del sistema permiten transmitir potencia y movimiento a grandes velocidades. Este sistema se compone de poleas que se ubican a cierta distancia para transitar el movimiento. Las bandas más utilizadas son de tipo V estas debido a su geometría transversal evitan la inestabilidad. (LLive & Klever, 2020)

Figura 22.*Transmisión por bandas*

Nota: Fuente recuperado de (Collado, 2021)

Ventajas:

- Es un mecanismo sencillo, poco mantenimiento
- Componentes de bajo costo
- No es necesaria lubricación
- Capacidad media al transmitir potencia mecánica

Desventajas:

- La longitud de la correa puede variar por acción de la temperatura.
- Transmisión de potencia mecánica limitado
- Sistema robusto (Para transmitir altas potencias)

Evaluación de alternativas transmisión de alta velocidad (motor – caja reductora)

Para el desarrollo del sistema de transmisión se propuso las siguientes condiciones más relevantes.

- Rendimiento del sistema.
- Costo de fabricación.
- Seguridad
- Tamaño
- Fabricación

Para evaluar las condiciones se utiliza la matriz de priorización de Holmes en la cual (0) representa una prioridad baja, (1) una prioridad alta.

Tabla 5.*Evaluación de parámetros de diseño*

Costo >Tamaño>Rendimiento =Seguridad=Fabricación							
Condición	Rendimiento	Seguridad	Costo	tamaño	Fabricación	$\Sigma+1$	Puntaje
Rendimiento		0,5	0	0,5	0,5	2,5	0,17
Seguridad	0,5		0,5	0,5	0	2,5	0,17
Costo	1	0,5		0,5	1	4	0,28
Tamaño	1	0,5	0		0,5	3	0,21
Fabricación	0,5	0,5	0	0,5		2,5	0,17
SUMA						14,5	1

En la Tabla 6, se identifica la alternativa de mayor prioridad que se ajusta a las necesidades del cliente, el procedimiento de las evaluaciones se lo detalla en el Anexo B 13.

Resultados de la evaluación**Tabla 6.***Resultados de la evaluación*

Parámetro	Rendimiento	Seguridad	Costo	Tamaño	fabricación	Σ	Prioridad
Alternativa 1	(0,17)(0,5)	(0,17)(0,5)	(0,28)(0,67)	(0,21)(0,66)	(0,17)(0,43)	0,57	1
Alternativa 2	(0,17)(0,5)	(0,17)(0,5)	(0,28)(0,33)	(0,21)(0,33)	(0,17)(,057)	0,43	2

La tabla 6 muestra que la alternativa 1 correspondiente a un sistema de transmisión tipo cadena – catarina tiene mayor prioridad frente a un sistema de bandas y polea, en los criterios de tamaño (compacto) y bajo costo, parámetros esenciales en el diseño y construcción de la máquina curvadora

Sistema de acople (Caja reductora – Datos de curvado)

Las alternativas evaluadas para la transmisión desde la caja reductora hacia los dados de rolado deben ser capaces de transmitir potencia, torque y movimiento entre dos flechas que se encuentran alineadas:

Alternativa 1: Construcción de un acople rígido tipo brida

Figura 23.

Acople rígido tipo brida



Nota: Desarrollado por el autor.

Ventajas

- Mecanismo sencillo y de rápida construcción

Recambio rápido y sencillo

Componente de bajo costo

Permite transmisión de potencia y torque

Desventajas

- Proceso de construcción

Alternativa 2: Acople rígido Love – joy

Figura 24.

Acople flexible Love - Joy



Nota: Recuperado de (Ferregon, 2021)

Ventajas

- Mecanismo sencillo
- Instalación rápida
- Recambio rápido y sencillo
- Permite transmisión de potencia y toque
- Sistema compacto

Desventajas

- Componente de elevado costo
- Disponibilidad en el mercado local

Evaluación de alternativas sistema transmisión (Caja reductora – Dados de curvado)

Para el desarrollo del sistema de transmisión se propuso las siguientes condiciones más relevantes.

- Rendimiento del sistema.
- Costo de fabricación.
- Seguridad

- Disponibilidad
- Fabricación

Tabla 7.*Evaluación de alternativas*

Costo > Rendimiento = Seguridad= Disponibilidad > Fabricación							
Condición	Rendimiento	Seguridad	Costo	Fabricación	Disponible	$\Sigma+1$	Puntaje
Rendimiento		0,5	0,5	0,5	0,5	3	0,19
Seguridad	0,5		0,5	0,5	0,5	3	0,19
Costo	1	0,5		1	0,5	4	0,26
Fabricación	0,5	0,5	0		0,5	2,5	0,16
Disponibilidad	1	0,5	0	0,5		3	0,19
SUMA						15,5	1

Resultados de la evaluación

Las matrices correspondientes al análisis de cada condición se detallan en el Anexo B

Tabla 8.*Resultados de la evaluación*

Parámetro	Rendimiento	Seguridad	Costo	Fabricación	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	(0,19)(0,5)	(0,19)(0,5)	(0,26)(0,67)	(0,16)(0,43)	(0,19)(0,67)	0,56	1
Alternativa 2	(0,19)(0,5)	(0,19)(0,5)	(0,26)(0,33)	(0,16)(0,57)	(0,19)(0,33)	0,44	2

La tabla 8 muestra que construir un sistema de acople rígido tipo brida tiene una mayor prioridad sobre adquirir acople flexible Love - Joy , la condición relevante para realizar la selección es el costo y disponibilidad.

Sistema estructural de Soporte

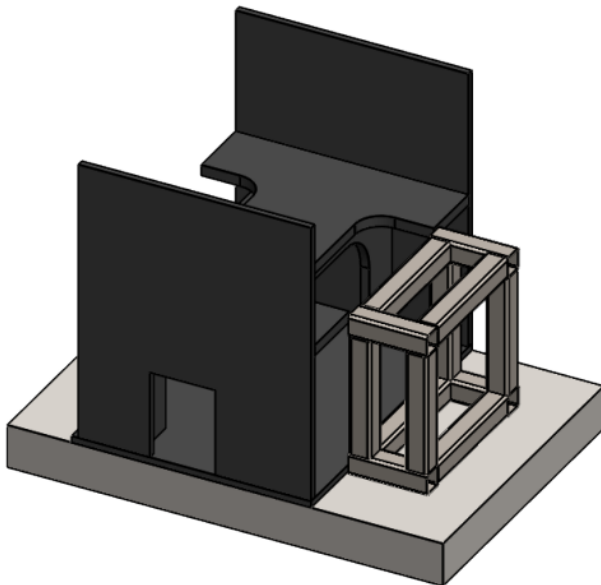
El sistema estructural de soporte cumple la función de sostener todos los sistemas y subsistemas de la máquina, debe garantizar la conexión entre los elementos y soportar las cargas que genera la máquina durante su funcionamiento.

Alternativa 1 – Sistema estructural de soporte con tres elementos.

Esta alternativa propone una estructura de soporte rígida en forma de mesa, la cual se fabricará con tubo estructural cuadrado de acero ASTM A-36, una vez construida será atornillada a una base de acero, sobre la cual descansaran junto con el bastidor, como se observa en la figura 25, los componentes de este sistema son: bastidor; estructura de soporte auxiliar tipo mesa, base la máquina.

Figura 25.

Sistema de soporte 1



Nota: Desarrollado por el autor.

Ventajas:

- Menor tiempo de construcción del soporte auxiliar
- Al ser independiente del bastidor la estructura de soporte facilita la alineación con el eje de salida de la caja reductora de velocidad.

Desventajas:

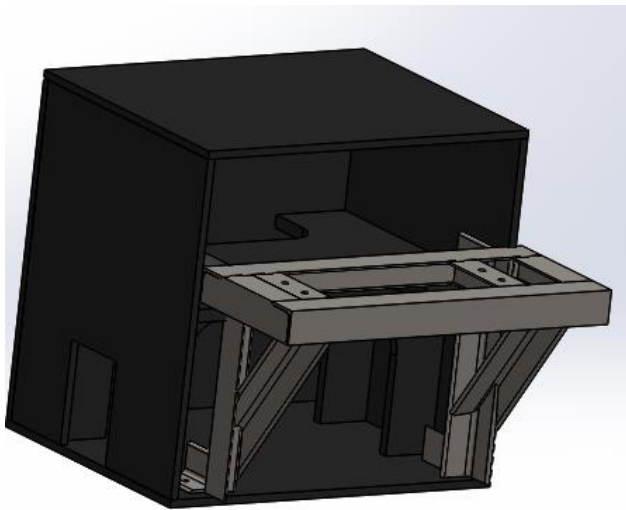
- Se pueden ocasionar vibraciones al momento de operar la máquina.
- Posee mayor peso combinado de acero y accesorios.
- La base debe ser fabricada con exactitud para evitar conflictos en el ensamble de la máquina.
- El soporte de la maquina ocupara mayor área superficial debido a su tamaño.
- Requiere de mantenimiento para poder asegurar la correcta alineación con el mecanismo de potencia y doblado.

Alternativa 2 – Sistema estructural de soporte con dos elementos.

Esta alternativa propone una estructura de soporte rígida en forma de repisa, la cual se fabricará con ángulo estructural de acero ASTM A-36, una vez construida será atornillada al bastidor de la máquina, como se observa en la figura 26, los componentes de este sistema son: bastidor; estructura de soporte auxiliar tipo repisa.

Figura 26.

Sistema de soporte 2



Nota: Desarrollado por el autor.

Ventajas:

- Al ser incorporada la estructura de soporte con el bastidor, la maquina será más compacta.
- La máquina ocupara menos espacio por lo cual facilitara su instalación y transporte.
- Se reducirá peso en la estructura lo cual reduce costos de construcción.

Desventajas:

- Se debe ensamblar con precisión para evitar descentramientos entre el módulo de rolado y la caja reductora de velocidades.
- Requiere de mantenimiento para poder asegurar la correcta alineación con el mecanismo de potencia y doblado.

Evaluación de alternativas sistema estructural de soporte.

En la evaluación de alternativas, pondremos en consideración índices que nos permitan un correcto análisis de las alternativas presentes y escoger de este modo la idónea para nuestro diseño, los índices a considerar son:

- **Costo:** Importante en todo proceso de diseño y construcción, se debe elegir entre las alternativas la más económica sin sacrificar eficiencia.
- **Rigidez:** Se debe seleccionar una estructura que cumpla con los requerimientos de rigidez para ser el bastidor idóneo de una máquina herramienta.
- **Fabricación:** Se debe considerar entre las alternativas aquella que dentro del proceso constructivo optimice tiempos y recursos.
- **Mantenibilidad:** Nos permite alargar la vida útil de la estructura, con el fin de generar condiciones seguras de operación.

Tabla 9.*Evaluación de las condiciones de diseño*

Costo > Rigidez > Fabricación > Mantenibilidad						
Condición	Rigidez	Mantenibilidad	Costo	Fabricación	$\Sigma+1$	Puntaje
Rigidez		0,5	1	0,5	3	0,27
Mantenibilidad	0,5		0,5	0	2	0,18
Costo	1	0,5		1	3,5	0,32
Fabricación	0,5	0	1		2,5	0,23
SUMA					11	1,00

Alternativas a evaluar, sistema de soporte.

Alternativa 1.- Sistema de soporte con tres elementos.

Alternativa 2.- Sistema de soporte con dos elementos

Para evaluar las condiciones se utiliza la matriz de priorización de Holmes en la cual (0) representa una prioridad baja, (1) una prioridad alta.

En la Tabla 10, se identifica la alternativa de mayor prioridad que se ajusta a las necesidades del cliente, el procedimiento de las evaluaciones se detalla en el Anexo C - 1.

Tabla 10.*Resultado parámetros evaluados*

Parámetro	Rigidez	Mantenibilidad	Costo	Fabricación	Σ	Prioridad
Alternativa 1	(0,27)(0,57)	(0,18)(0,50)	(0,32)(0,33)	(0,23)(0,43)	0,45	2
Alternativa 2	(0,27)(0,42)	(0,18)(0,50)	(0,32)(0,67)	(0,23)(0,57)	0,55	1

Teniendo en cuenta los parámetros de decisión, la alternativa 2 se eligió para el diseño del soporte.

Diseño modular

La máquina prototipo curvadora de tubos y perfiles de acero, será diseñada por diferentes módulos de ensamble tipo ranura, donde sus interfases son únicas evitando la interacción entre sus subsistemas (Ulrich & Eppinger, 2013), por ello se considera sus módulos de mayor relevancia.

- Módulo de curvado.
- Módulo de transmisión.
- Módulo de control
- Módulo estructural

Módulo de curvado

Parámetros de diseño

Se establece los parámetros de diseño ajustando las necesidades del cliente y posterior su construcción, ver Tabla 11.

Tabla 11.

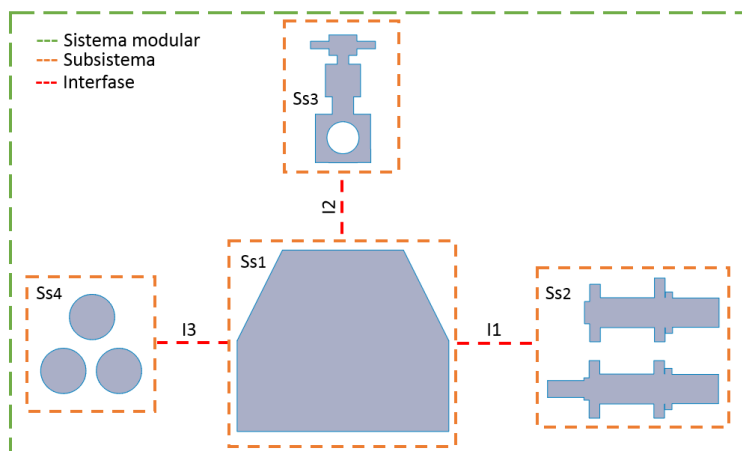
Parámetros de diseño

Requerimiento	Parámetros
Dimensión estructura de rolado	Largo ≤ 400 [mm]
	Alto ≤ 300 [mm]
	Profundidad ≤ 150 [mm]
Materiales de menor resistencia	Componentes mecánicos rígidos
Tipo de estructura	Rígida
Disposición de rodillos/matrices	Simétricos/Piramidal
Desplazamiento de rodillo/matriz	Control manual
Tipo de ensamble	Priorizar uniones no permanentes/empernado

Con los parámetros establecidos se inicia la tarea de diseño modular, ver Figura 27, favoreciendo el acople a cualquier fuente motriz.

Figura 27.

Esquema modular de curvado



Nota: Desarrollado por el autor.

En la Tabla 12, se especifica los subsistemas que conformará el módulo de curvado, los códigos se enlazan a la Figura 27.

Tabla 12.

Subsistemas e interfaces del sistema de curvado

Código	Descripción
Ss1	Estructura de rolado
Ss2	Árbol de rolado
Ss3	Mecanismo de desplazamiento
Ss4	Matrices de curvado
I1	Conexión Ss2 – Ss1
I2	Conexión Ss3 – Ss1
I3	Acople Ss4 – Ss2

Cálculo fuerza de doblado

Con las especificaciones iniciales, ver Tabla 2, se procede en la búsqueda de perfiles comerciales que estén dentro del rango requerido por el cliente, ver Tabla 13, el material de fabricación de los perfiles se define el acero ASTM A36 por las siguientes cuestiones; facilidad de compra dentro del mercado ecuatoriano, propiedades mecánicas definidas, ver Anexo A-2.

Tabla 13.

Selección de perfiles metálicos comerciales

Designación del perfil	Código	Designación comercial			
		D[mm]	b[mm]	h[mm]	t[mm]
Tubo estructural cuadrado	TC1	-	20	-	2
	TC2	-	40	-	2
Tubo estructural rectangular	TRec	-	40	20	2
Tubo estructural redondo	TRed1	25	-	-	2
	TRed2	50	-	-	2
Perfil estructural tipo L	L1	-	20	20	3
	L2	-	40	40	3
Platina	PL	-	50	-	3
Varilla maciza cuadrada lisa	VCL	-	25	-	-
Varilla maciza redonda lisa	VRL	25	-	-	-
Tee	T	-	20	20	3

Nota. Perfiles estructurales, recuperado de DIPAC productos de acero, 2021.

Empleando las ecuaciones (Ec.2.1 – Ec.2.10) descritas dentro del capítulo 2, se inicia el desarrollo de las fuerzas necesarias al curvado de los perfiles metálicos en la Tabla 14 se especifica el momento plástico (M_p) y la fuerza de doblado (F_d) para cada perfil metálico, el procedimiento de cálculo se lo detalla en el Anexo A-2.

Tabla 14.*Fuerza de doblado*

Código	Mpx [Nm]	Fd [N]
TC1	196,8	796,25
TC2	917,06	10431,61
TRec	402,66	1579,96
TRed1	192,56	1269,73
TRed2	870,09	13245,91
L1	96,06	376,92
L2	485,01	5517,02
PL	18,75	73,57
VCL	325,52	2146,47
VRL	383,49	2528,72
T	366,57	1438,35

Nota. El perfil (**TC2**) requiere mayor fuerza de doblado, para fines didácticos también se decide trabajar con la varilla maciza redonda (**VRL**).

Diseño árbol de rolado (Ss2)

Las flechas operan en dos sentidos, horario y antihorario, sometidas a un régimen de 20[rpm] en cada dirección, aportando el desplazamiento bidireccional del perfil metálico, este fenómeno produce que las flechas estén sometidas a esfuerzos completamente invertidos en flexión y torsión, punto inicial para el análisis de las fuerzas generadas en los árboles de rolado.

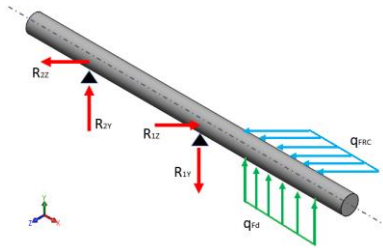
Con las dos fuerzas de doblado establecidas (**TC2**) y (**VRL**), las flechas inferiores (A y B) comparten características geométricas similares, caso contrario sucede con la flecha superior (C) sus características geométricas son distintas.

Fecha C

En la Figura 28, se identifica las fuerzas generadas durante el proceso de curvado.

Figura 28.

Fuerzas generadas en el proceso de curvado



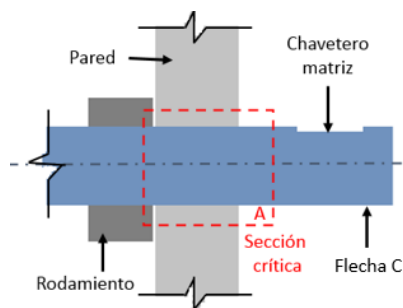
Nota: Desarrollado por el autor

La selección del material se basa en los siguientes criterios; disponibilidad de compra a nivel nacional, facilidad de mecanizado y bajo costo, para ello disponemos de los aceros SAE 1018, AISI 1045, AISI 4140, se realiza una matriz de decisión para elegir el material de acuerdo a los criterios mencionados.

A continuación, se determina la configuración geométrica de la flecha, esta tarea debe ser enfocada en el análisis de esfuerzos a fatiga para elementos mecánicos sometidos a cargas estáticas que es de nuestro interés, para ello se identifica una sección, ver Figura 29, de esta forma no se necesita establecer la geometría de toda la flecha.

Figura 29.

Sección crítica árbol C



Nota: Desarrollado por el autor

Ver procedimiento de cálculo Anexo A-3 flecha C, en la Tabla 15, se muestra los resultados relevantes obtenidos.

Tabla 15.

Resultados obtenidos flecha C

Resultados obtenidos perfil cuadrado TC2			
	Descripción	Valor	Observación
	Factor de seguridad	1,39	
Deflexión	Plano YX	0,16[mm]	Deflexión dentro del rango permitido $\delta_{m\acute{a}x} = 0,41[mm]$
	Plano XZ	0,02[mm]	
Resultados obtenidos varilla maciza redonda VRL			
	Descripción	Valor	Observación
	Factor de seguridad	5.8	Elemento r\acute{ı}gido
Deflexión	Plano YX	0,04[mm]	Deflexión dentro del rango permitido $\delta_{m\acute{a}x} = 0,41[mm]$
	Plano XZ	-	

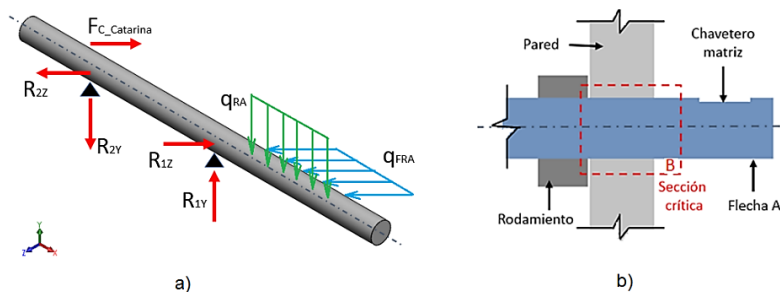
Nota. Ver Anexo D plano a detalle de la flecha C.

- **Flechas inferiores**

Las flechas A y B comparten la misma geometría de diseño por ende se analiza una de ellas reduciendo los cálculos de las flechas inferiores, se elige la flecha A, ver Figura 30, motivo de cumplir dos funciones; en soportar el torque generado por el módulo de transmisión y transmitir la fuerza de contacto hacia la flecha B.

Figura 30.

Flecha A; a) Diagrama de fuerzas, b) Sección crítica



Nota: Desarrollado por el autor.

Ver anexo A-2, torque necesario para su operación y Anexo A-3 el procedimiento de diseño de la flecha A, en la Tabla 16, se muestra los resultados relevantes obtenidos.

Tabla 16.

Resultados obtenidos flecha A

Resultados obtenidos perfil cuadrado TC2			
Descripción	Valor	Observación	
Torque	Flecha A	92,02[Nm]	484,16[Nm] torque de entrada para cada flecha inferior entregado por el módulo de transmisión.
	Flecha B	29,81[Nm]	
Potencia eléctrica	0,34[HP]	Potencia mínima para su operación	
Factor de seguridad	1,26		
Deflexión	Plano YX	0,21[mm]	Deflexión dentro del rango permitido $\delta_{m\acute{a}x} = 0,4[mm]$
	Plano XZ	0,02[mm]	
Resultados obtenidos varilla maciza redonda VRL			
Descripción	Valor	Observación	
Torque	Flecha A	20,83[Nm]	484,16[Nm] torque de entrada para cada flecha inferior entregado por el módulo de transmisión.
	Flecha B	5,21[Nm]	
Potencia eléctrica	0,07[HP]	Potencia mínima para su operación	
Factor de seguridad	3	Elemento rígido	
Deflexión	Plano YX	0,07[mm]	Deflexión dentro del rango permitido $\delta_{m\acute{a}x} = 0,4[mm]$
	Plano XZ	-	

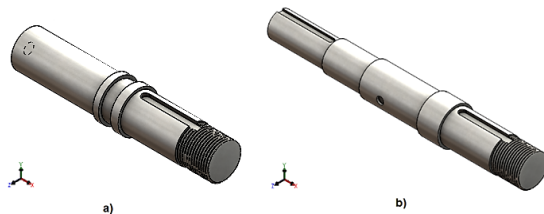
Nota. Ver anexo D plano a detalle de la flecha A y B.

Se observa que la flecha B requiere menos torque en comparación con la flecha A, esto se debe que el perfil metálico alcanza la deformación plástica al estar en su eje simétrico de la flecha C, la flecha B aporta el arrastre del material ya que la recuperación elástica del material es mínima, caso contrario sucede con la flecha A que debe iniciar con el arrastre o empuje del material y transmitir la fuerza de contacto hacia la flecha B. Por lo tanto, para fines de transformación de las flechas se aproxima un diámetro comercial de 50[mm] acero SAE 1045.

Definido el diámetro base de las flechas superior e inferior de rolado, se obtiene el modelo CAD como se observa en la Figura 31.

Figura 31.

Modelo CAD a) Flecha superior, b) Flecha inferior



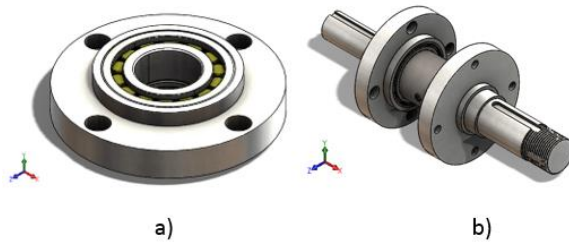
Nota: Desarrollador por el autor.

Establecido la geometría base de las flechas de rolado se continúa el dimensionamiento de las chumaceras, se aclara para el submódulo Ss2 se fabrica las chumaceras de pared que es la conexión de la interfaz I1, ver Figura 27, por dos razones; espacio limitado de trabajo, disminuir precio del producto por lo cual se elige el acero SAE 1018.

Considerando los esfuerzos fluctuantes combinados que actúan en las flechas de rolado se selecciona los rodamientos de rodillos, motivo de soportar torques elevados, ventaja por su línea de contacto (la superficie de contacto es rectangular cuando la carga es aplicada), ideal para el proceso de conformado de los perfiles metálicos, su selección se elige del catálogo de libre acceso (SKF, 2021), se procede con el modelado CAD, ver Figura 32, el desarrollo de la selección de los rodamientos se detalla en el Anexo A-4.

Figura 32.

Modelo CAD a) chumacera de pared, b) Ensamble árbol inferior de rolado



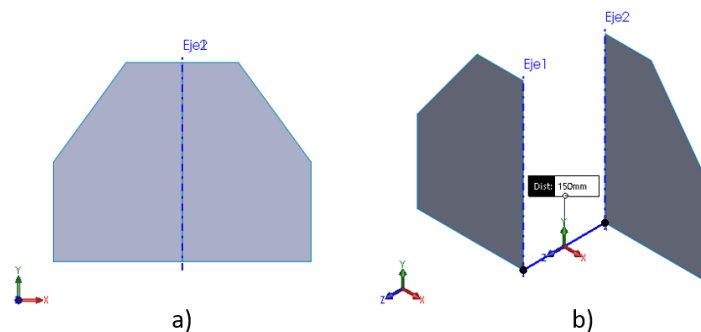
Nota: Desarrollado por el autor

Estructura de rolado (Ss1)

La plancha de rolado será dividida en su eje simétrico por su disposición de rodillos (la medida de una sección es equidistante a la otra), ver figura 33-a, el dimensionamiento de la plancha superior, la medida especificada por la Tabla 11 muestra un valor fijo de 150[mm] en su profundidad, ver Figura 33-b.

Figura 33.

Plancha de rolado; a) Eje simétrico, b) Profundidad especificada



Nota: Desarrollado por el autor

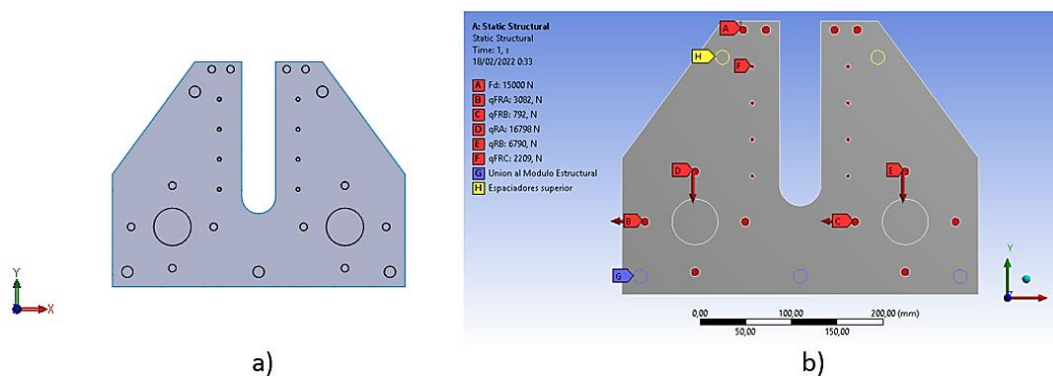
El material de fabricación de igual manera se utiliza el criterio de selección para los componentes anteriores, con una pequeña variación en sus propiedades mecánicas ya que debe aportar resistencia a factores ambientales y estabilidad a los subsistemas garantizando su protección.

El acero ASTM A36, material seleccionado por su variedad de productos de bajo costo y de amplia aplicación, una de ellas en la construcción de máquinas industriales que requieren salvaguardar sus componentes internos, nuestra interrogante es el espesor ideal de la plancha de acero, para obtener resultados aproximados a la realidad se utiliza el análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis) por sus siglas conocidas FEA/FEM/MEF.

Para el diseño de la plancha de rolado se realizó una serie de configuraciones ubicando cada subsistema en su lugar específico, obteniendo finalmente la transformación base de nuestra plancha de rolado, ver figura 34-a, finalmente se ingresa las variables necesarias para ejecutar el análisis por elementos finitos, ver figura 34-b.

Figura 34.

Plancha de rolado; a) Transformación base, b) Esquema de fuerzas

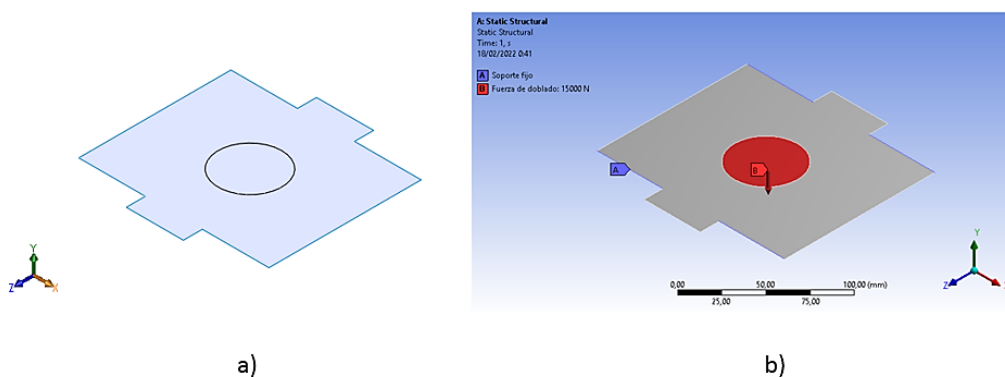


Nota: Desarrollado por el autor

Repetimos el procedimiento y seleccionamos el mismo material para la plancha superior, ver figura 35.

Figura 35.

Plancha superior; a) Transformación base, b) Esquema de fuerzas



Nota: Desarrollado por el autor

Se incluye el peso del subsistema Ss3 aproximando una fuerza de doblado de 15000[N].

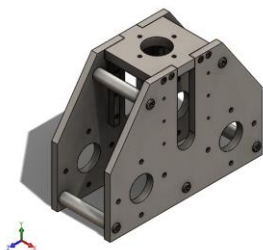
El procedimiento para obtener el espesor referencial de las planchas y la convergencia de los resultados se lo detalla en el anexo A-5, en la Tabla 17, se muestra los resultados relevantes obtenidos.

Tabla 17.

Resultados obtenidos subsistema Ss1

Estructura de rolado (Ss1)								
Descripción	N.	N.	Deflexión [mm]		Espesor	Masa	σ_{VM}	Fs
	nodos	elementos	Eje Y	Eje X	[mm]	[Kg]	[Mpa]	
Plancha de rolado	7717	7569	0,01	0,01	10	7,2	37,38	6,7
Plancha superior	2007	1940	0,03	-	15	2,28	68,41	3,65

Identificado el valor del factor de seguridad (Fs) de cada plancha por encima de 3 se afirma que la estructura cumple con la rigidez deseada, en la Figura 36, se observa el ensamble del subsistema Ss1.

Figura 36.*Ensamble CAD estructura de rolado*


Nota: Desarrollado por el autor

Mecanismo de desplazamiento (Ss3)

Se inicia el diseño de la base interna su principal función es transmitir la fuerza generada por el tornillo de potencia al árbol C, para la selección del material se establece los siguientes criterios; peso ligero puesto que será unido al tornillo de potencia, facilidad de mecanizado y de bajo costo.

Se realizó un estudio de formas de construcción de menor pérdida de material considerando su área transversal debe ser mayor que los rodamientos de rodillos, ver Anexo A-4, permitiendo que la flecha C obtenga rotación libre. Cumpliendo los criterios se obtiene la mejor solución detallada en la tabla 18.

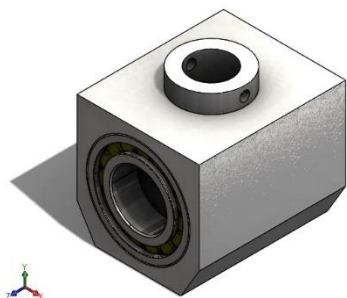
Tabla 18.*Selección del material de fabricación, base interna*

Descripción	Ventajas	Ilustración
Barra perforada ASTM A53	Disponibilidad dentro del mercado ecuatoriano. Mayor producción por ende bajo costo. Amplia gama de usos. Facilidad de mecanizado con menor pérdida de material. No requiere tratamientos térmicos adicionales.	

Cumpliendo los criterios se procede al modelado CAD de la base interna, ver Figura 37.

Figura 37.

Modelado CAD base interna



Nota: Desarrollado por el autor

Para el diseño del cuerpo central se elige el mecanismo tornillo-tuerca, con una pequeña variación en donde la tuerca entrega el desplazamiento generando la fuerza requerida al curvado de los perfiles metálicos.

El acero SAE 1018 material seleccionado por su facilidad de mecanizado al roscado interno, la longitud de la rosca (l_r) se referencia de la norma tornillería y requisitos dimensionales (INEN 579, 2013), se determina el intervalo del roscado para un tornillo de potencia rosca cuadrada ya manufacturado sus dimensiones se especifica, en la Tabla 19.

Tabla 19.

Condiciones de diseño mecanismo tornillo-tuerca

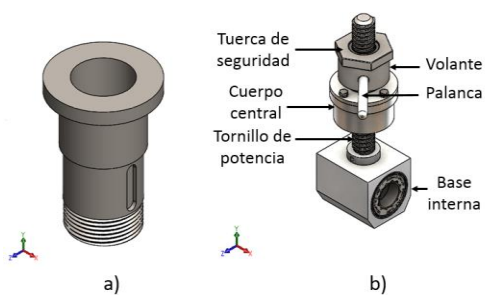
Tornillo de potencia rosca cuadrada	
Propiedades mecánicas	Material: acero AISI 1045
	$S_{ut} = 630[\text{MPa}]$, $S_y = 530[\text{MPa}]$
Características geométricas	Diámetro externo = 40[mm]
	Diámetro medio = 36,5[mm]
	Diámetro de raíz = 33[mm]
	Paso = 7[mm]
	Ángulo de avance (λ) = 3,5°

Longitud de agarre efectivo (l_r)		
Descripción	Requisito	l_r
Rosca cuadrada interna	Desplazamiento axial de tornillo.	$35 \leq l_r \leq 60$
Rosca externa	Establecer su ubicación.	$15 \leq l_r \leq 30$

El proceso de modelado CAD para el mecanismo tornillo-tuerca se realizó varias transformaciones hasta obtener la adecuada, el componente toma el nombre de collarín por su diseño en aportar estabilidad al tornillo pasante considerando la facilidad de mecanizado, ver Figura 38-a, el modelado del cuerpo central encargado de la conexión de la interfase I2 su diseño se facilita por la geometría del collarín establecida, su función es brindar la protección a los elementos internos y facilitar el movimiento lineal de la flecha superior C, por ello se dispondrá de rodamientos de bolas ya que el torque a ser transmitido es menor, aumentado sus características acústicas del rodamiento, favoreciendo su movimiento angular al avance de la matriz superior C, ver Anexo A-4 la selección del rodamiento, finalmente se estable el volante y su palanca de fuerza que es el encargado de transmitir el movimiento angular al collarín roscado, el material seleccionado para estos componentes es el acero SAE 1018, terminado la tarea del modelado se ensambla los componentes del subsistema Ss3, Ver Figura 38-b.

Figura 38.

Modelo CAD; a) Collarín, b) Mecanismo de desplazamiento



Nota. Desarrollado por el autor, ver Anexo D plano a detalle del subsistema Ss3.

El desarrollo de los cálculos del par torsor generado por el tornillo de potencia y esfuerzos que actúan sobre él, se lo detalla en el Anexo A-6, en la Tabla 20, se muestra el resumen de resultados.

Tabla 20.

Resultados obtenidos tornillo de potencia

Descripción	Valor
Torque para descender la carga	52,46[Nm]
Torque para elevar la carga	36,53[Nm]
Presencia de autobloqueo	
f: factor de rozamiento	0,25 > 0,06
$f > \tan(\lambda)$	
Esfuerzo por flexión en la raíz, donde el primer hilo soporta 38% de la fuerza de doblado.	1er hilo $\rightarrow 0,38Fd$ $\sigma_b = \sigma_x = 32,77[MPa]$ $\sigma_z = -12,19[MPa]$
Esfuerzo por cortante en la raíz	$\tau_{xy} = 1,13[MPa]$
Esfuerzo de Von Mises	$\sigma' = 40,32[MPa]$
Factor de seguridad	13,14

Nota. Se garantiza que el tornillo de potencia soporta los esfuerzos de carga al conformado de perfiles metálicos.

Matrices de curvado (Ss4)

Para el diseño de las matrices se toma de referencia los rodillos de máquinas curvadoras industriales (Nargesa, 2021), haciendo una variación en sus medidas para perfiles de 1[in] hacer curvados, por dos cuestiones; el diámetro de las matrices aumenta dependiendo el perfil hacer rolado, por ejemplo, la matriz para tubería de 2[in] debe ser mayor su diámetro y espesor en comparación con la matriz de 1[in] que conlleva un aumento de costo de fabricación de las matrices, la máquina se estableció de carácter didáctico está disponible para trabajos futuros donde uno de ellos es el estudio que engloba las matrices de curvado.

Los aceros seleccionados para la fabricación de las matrices optamos por el SAE 1018 y el AISI 8620 ambos aceros de fácil mecanizado y por tener bajo contenido de carbono ventaja al aumento en su dureza por cementación, la variable a tomar en cuenta es el costo, se sabe que el acero SAE 1018 tiene mayor disponibilidad en el mercado nacional que el acero AISI 8620, su compra es bajo pedido y el costo aumenta, por ello seguimos trabajando con el acero SAE 1018.

En la Figura 39 se muestra el modelo CAD de las matrices de curvado.

Figura 39.

Modelo CAD matrices de curvado



Nota: Desarrollado por el autor

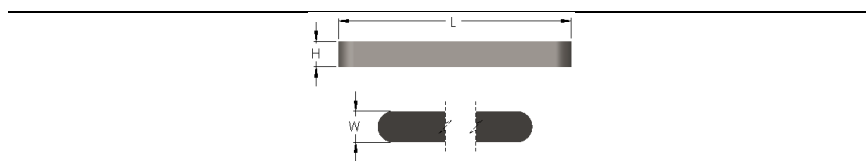
Accesorios mecánicos

(Budynas & Nisbett, 2008) propone “El diámetro del eje determina el tamaño estándar de la cuña, el diseñador elije la longitud de la cuña apropiada para soportar la carga de torsión, caso similar para pasadores, el material de fabricación es acero de bajo carbono” (p.379). el procedimiento de cálculo se detalla en el Anexo A-7, ver Tabla 21, sus valores y la selección del material.

Tabla 21.

Accesorios mecánicos

Descripción	Valor
Propiedades mecánicas	Material: acero ASTM A36 Sut = 400[MPa], Sy = 250[MPa]
Cuña DIN 6885 A	



Flechas de rolado

Características geométricas	$W = 10[\text{mm}]; H = 8[\text{mm}]; L \geq 40[\text{mm}]$
Fs a cortante	5,36
Fs a compresión	3,71

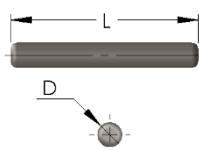
Mecanismo de desplazamiento

Características geométricas	$W = 8[\text{mm}]; H = 6[\text{mm}]; L \geq 35[\text{mm}]$
Fs a cortante	8,47
Fs a compresión	13,56

Flecha A – Catarina N. 80

Características geométricas	$W = 8[\text{mm}]; H = 7[\text{mm}]; L \geq 40[\text{mm}]$
Fs a cortante	3,3
Fs a compresión	3,6

Pasador DIN 7



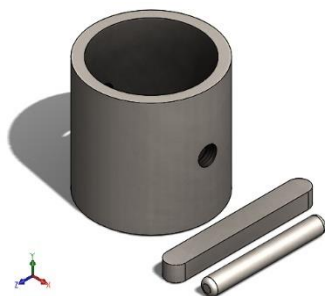
Características geométricas	$D = 8[\text{mm}]; L = 60[\text{mm}]$
-----------------------------	---------------------------------------

Nota. Se selecciona los elementos más críticos identificando que soportan las cargas durante el proceso de curvado.

Los bocines aportan protección y seguridad al desplazamiento axial de las flechas, para su fabricación se eligió el acero ASTM A53, ver Tabla 18, en la Figura 40 se indica el modelo CAD de los accesorios mecánicos.

Figura 40.

Modelado CAD accesorios mecánicos.



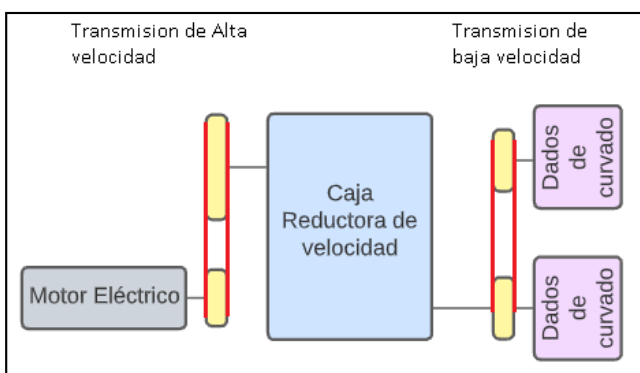
Nota. Desarrollado por el autor

Módulo transmisión

Luego de realizar el estudio de alternativas, seleccionamos las más adecuadas tanto en funcionalidad así también como en costos, para que el diseño de la máquina se ajuste al presupuesto planificado. A continuación, se presenta un diseño preliminar de los componentes del módulo de transmisión.

Figura 41.

Componentes módulo de transmisión

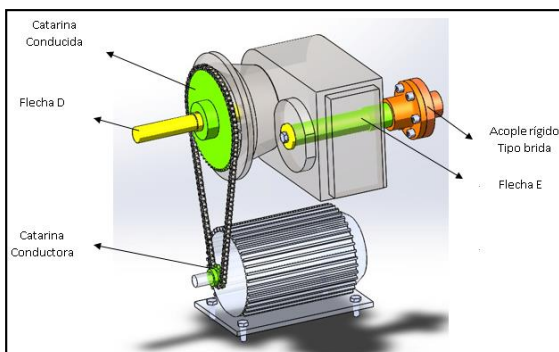


Nota: Desarrollado por el autor

EL módulo de transmisión en su fase inicial (Transmisión de Alta velocidad), transmite potencia y movimiento por medio de una cadena, hacia la flecha de entrada de la caja reductora de velocidad, posteriormente (Transmisión de baja velocidad), la flecha de salida de la caja se monta un sistema de acople rígido tipo brida, este último brinda al módulo la capacidad de realizar un montaje y desmontaje entre el módulo de transmisión y el módulo de curvado. La disposición general de los elementos del módulo de transmisión se presenta en la Figura 42.

Figura 42.

Disposición general de los elementos



Nota: Desarrollado por el autor.

Cálculo de parámetros para el sistema de transmisión

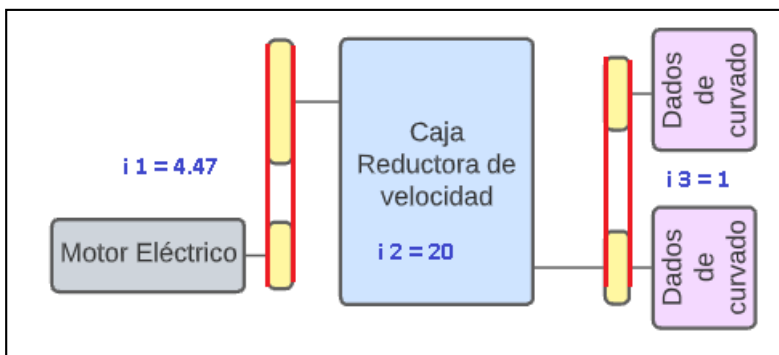
En este apartado se calculan los parámetros necesarios para realizar la transmisión de potencia y movimiento hasta los dados de rolado de la máquina.

Transmisión de Alta velocidad

Tomando en cuenta los requerimientos de trabajo de la máquina, las características iniciales del motor eléctrico deben ser modificadas hasta la salida de los dados de curvado, en la Figura 43, se muestra un esquema del módulo para su comprensión

Figura 43.

Esquema módulo de transmisión



Nota: Desarrollado por el autor

La catarina (conductora) acoplada a la flecha del motor y una conducida a la entrada de la caja, deben proporcionar una relación de transmisión $i_1 = 4.47$, en el interior de la caja reductora se produce una relación $i_2 = 20$, velocidad de salida que se encuentra dentro del rango de trabajo de la máquina curvadora, las flechas de curvado deben ser capaces de trabajar en el mismo sentido de giro y velocidad de rotación, esto se logra ya que los mismos entran en contacto por medio de un sistema de cadena - catarinas con una relación de transmisión de $i_3 = 1$

Selección de cadena

La cadena depende principalmente de la velocidad de salida en la flecha del motor eléctrico, así también de la potencia a transmitir, tomando en cuenta esto en la tabla 22 se establecen las características de la cadena seleccionada.

Tabla 22.

Características de la cadena de rodillos

Tipo de cadena	Numero de cadena	Paso (in)
Cadena de rodillos estándar, una hilera	40	1/2

Selección de catarinas

- **Catarina conductora**

Tomando en cuenta las características del eje del motor según el Anexo B- 4, se escoge una catarina conductora con un diámetro de manzana (Hub) >28mm.

Tabla 23.*Características catarina conductora*

Parámetros	Característica	Observación
Numero	Numero 40	Anexo B- 4
Tipo	Tipo-B estándar una hilera	Anexo B- 4
Numero de dientes	15	Anexo B- 4
Paso [mm]	12.7	Anexo B- 4
Diámetro primitivo [mm]	61.1	Anexo B- 4
Diámetro (Hub)[mm]	50	Anexo B- 4

- **Catarina conducida**

Tomando en cuenta la relación de transmisión $i_1 = 4.47$ y según el Anexo B- 4 se obtiene.

Tabla 24.*Características catarina conducida*

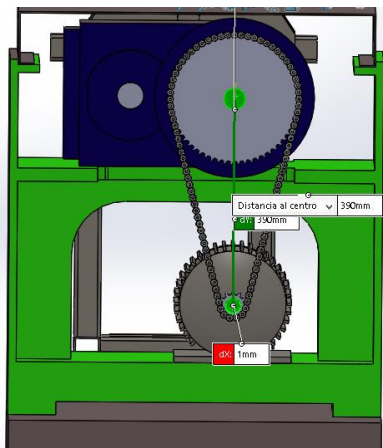
Parámetros	Característica	Observación
Numero	Numero 40	Anexo B- 4
Tipo	Tipo-B estándar una hilera	Anexo B- 4
Numero de dientes	67	Anexo B- 4
Paso [mm]	12.7	Anexo B- 4
Diámetro primitivo [mm]	270.95	Anexo B- 4
Diámetro (Hub)[mm]	70	Anexo B- 4

Longitud de la cadena

Para el cálculo de la longitud de la cadena se toma en cuenta la disposición del motor y la caja reductora de velocidad, ver Figura 44.

Figura 44.

Conjunto motor caja reductora



Nota: Desarrollado por el autor

$$L = 1.57(Dp + dp) + 2C + \frac{(Dp - dp)^2}{4C} \quad (\text{Ec.3.1})$$

Fuerza de contacto sobre la Catarina conductora

La fuerza de contacto (Fuerza tangencial), relaciona la fuerza centrífuga con la fuerza útil que se produce en su movimiento circular, la misma se calcula con la siguiente ecuación

$$F_o = F_u + F_c \quad (\text{Ec.3.2})$$

Fuerza útil de la cadena (Fu)

La fuerza útil hace referencia a la potencia del motor eléctrico (P) y la velocidad lineal de la catarina (v)

$$F_u = \frac{P}{v} \quad (\text{Ec.3.3})$$

Fuerza centrífuga de la cadena (Fc)

La fuerza centrífuga se encuentra en función del peso unitario por unidad de longitud de la cadena (M), se obtiene del Anexo B 5.

$$F_c = M * [v]^2 \quad (\text{Ec.3.4})$$

Torque de trabajo sobre el eje del motor

Para el cálculo del torque sobre el eje del motor utilizamos la siguiente ecuación.

$$T = F_o * r_i \quad (\text{Ec.3.5})$$

Donde:

r: radio primitivo de la catarina considerada.

El cálculo y desarrollo de las fórmulas para encontrar las fuerzas de contacto y las potencias sobre las catarinas se detallan en el anexo B 15, en la tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos.

Tabla 25.

Parámetros de contacto

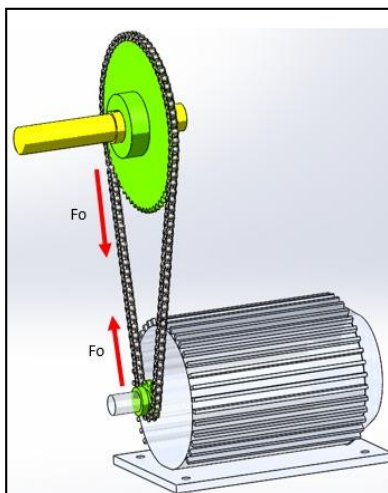
Parámetro	Valor
Longitud de la cadena	$L = 1.301[m]$
Fuerza de contacto sobre la Catarina conductora	$F_o = 570.63[N]$
Fuerza útil de la cadena (Fu)	$F_u = 552.37[N]$
Fuerza centrífuga de la cadena (Fc)	$F_c = 18.26[N]$
Torque de trabajo sobre el eje del motor	$T = 17.11[Nm]$
Potencia de entrada caja reductora	$P = 3065.22[W]$
Torque de trabajo sobre el eje de entrada a la caja reductora	$T = 77.035[N * m]$

Diseño Flecha D

La flecha D, se encuentra directamente en contacto con la parte tensa de la cadena, por ende, bajo la acción de una fuerza de contacto (F_o), la misma se encuentra bajo la acción de un movimiento giratorio, y bajo la primera relación de transmisión $i_1 = 4.47$

Figura 45.

Flecha D



Nota: Desarrollador por el autor

Componentes de fuerza sobre la flecha D

Tomando en cuenta los parámetros de trabajo de la máquina curvadora y siguiendo las recomendaciones de diseño (Budynas & Nisbett, 2008), se utilizó en el diseño de flechas acero con una elongación mayor a 12%, disponibilidad en el mercado se utiliza el acero SAE 1018. Así pues, las propiedades mecánicas del material seleccionado son:

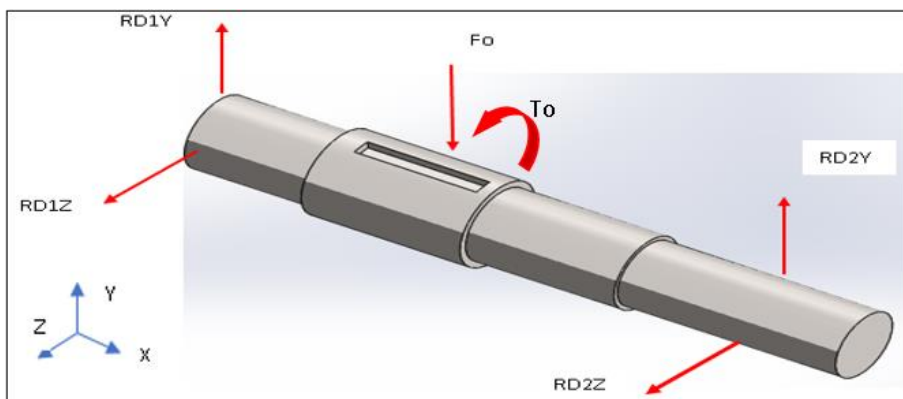
$$S_{ut} = 400[Mpa], S_y = 220[Mpa]$$

Las propiedades mecánicas se tomaron del Anexo B-10 del libro (Budynas & Nisbett, 2008)

Diagrama de cuerpo libre de la flecha D

Figura 46.

Diagrama de cuerpo libre flecha D



Nota: Desarrollado por el autor

Sobre la flecha D, actúan cargas tales como la fuerza de contacto, torque que se transmite directamente desde el motor eléctrico.

$$F_o = 570.63[N]$$

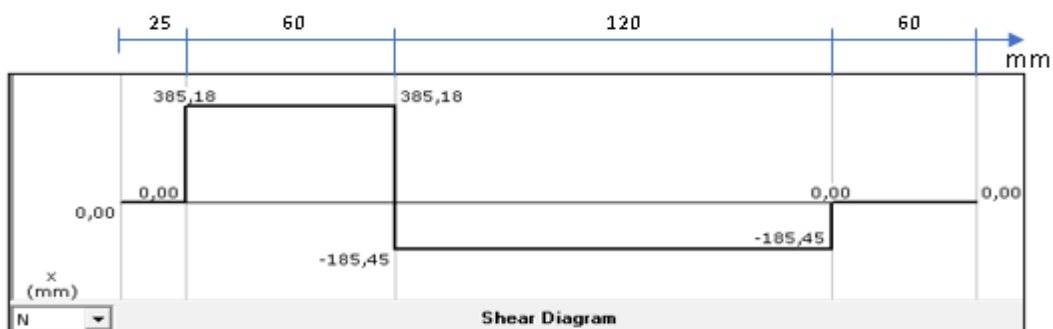
$$T_o = 77.04[N * m]$$

A continuación, se obtienen los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector que se generan sobre la flecha, los cálculos a detalle se especifican en el anexo B 15.

Plano Y – X

Figura 47.

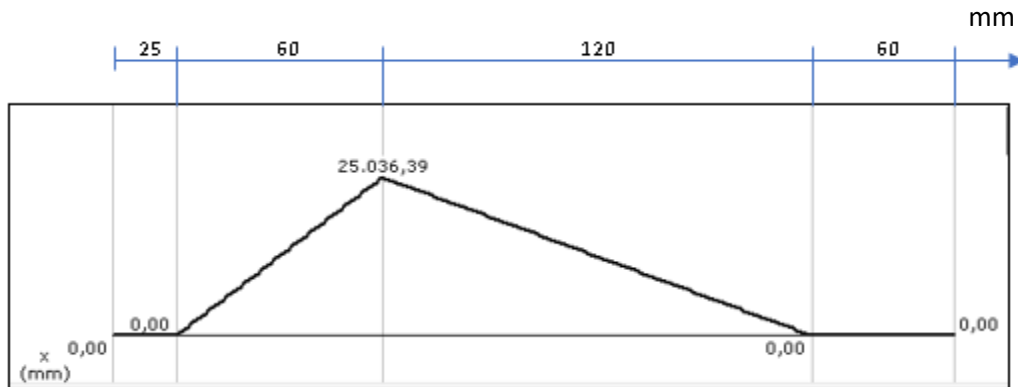
Diagrama Fuerza cortante



Nota: Desarrollado por el autor

Figura 48.

Momento flector



Nota:

Desarrollado por el autor

Como se puede apreciar en la figura 47 y 48, el punto más crítico se encuentra en la sección BC, en la misma está montada la catarina, la cual transmite directamente la fuerza de contacto (tangencial), que proviene desde el motor eléctrico a través de la cadena de rodillos. Ya que se trata de una flecha, la cual se encuentra en constante movimiento y tomando en cuenta las características de trabajo de la curvadora, se analiza para un trabajo por fatiga. Así pues, el límite de fatiga se expresa de la siguiente manera

$$Se' = 0.5 * Sut[Mpa]$$

$$Se' = 200 [Mpa]$$

Factores que modifican la fatiga

Debido a las diferentes condiciones de trabajo de las máquinas herramientas sobre los cuales trabajan sus componentes, se utilizan los coeficientes de Marín que se los detalla en el anexo B-8, los mismos recrean las condiciones de trabajo de la máquina.

Por lo tanto, se obtiene el esfuerzo a la fatiga de la siguiente manera

$$Se = Ka * Kb * Kc * Kd * Ke * Kf * Se'$$

$$S_e = 156,4 [Mpa]$$

Factores de concentración de esfuerzos

Debido a la configuración geométrica de los componentes (Flecha), sobre las mismas se generan concentradores de esfuerzos, los mismos deben ser cuantificados con el fin de obtener un diseño armónico y seguro a la vez.

El factor K_{ts} y K_t vienen tabulados en el anexo B9 B10 y depende de la relación entre las secciones transversales más críticas de la flecha $\frac{r}{d}$ y $\frac{D}{d}$.

$$K_{ts} = 1.5, K_t = 1.7$$

Esfuerzo alternante por torsión

Los esfuerzos fluctuantes presentes sobre la máquina pueden ser descrito mediante un patrón sinusoidal debido a que se trata de una máquina que realiza un trabajo rotatorio, se considera pues las condiciones más críticas para el diseño, esfuerzos fluctuantes totalmente reversibles (Pulsantes). En tal virtud se asumen las condiciones $\tau_m = 0$, $\sigma_m = 0$, para el diseño.

$$\tau_a = \frac{T * c}{J} \quad (\text{Ec.3.6})$$

$$\tau_a = 7.15 [Mpa]$$

Siguiendo el diseño para flechas sometidas a esfuerzos fluctuantes del libro de diseño mecánico (Budynas & Nisbett, 2008) se obtiene:

Tabla 26.

Factores de Diseño

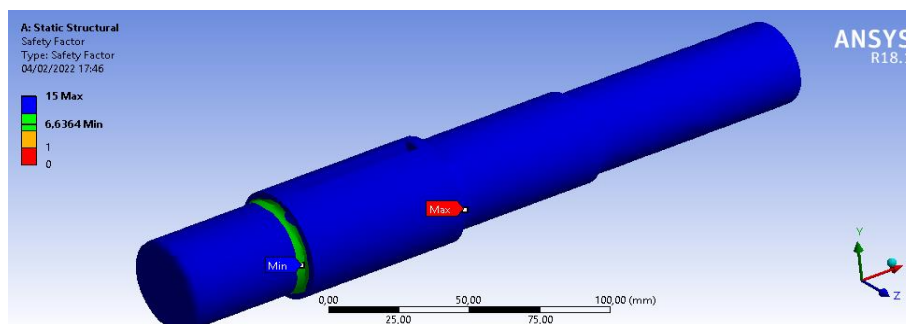
Factores de diseño	Valor	Observación
Esfuerzo alternante por flexión	$\sigma_a = \frac{M * c}{I}$	

	$\sigma_a = 4.64 [Mpa]$	Anexo B8
Factores de concentración de esfuerzos por fatiga	$q = 0,64$ y $q_c = 0,86$	
	$K_f = 1,51$ y $K_{fs} = 1,34$	
Componente de amplitud esfuerzo de Von Mises	$\sigma_a' = [[K_f(\sigma_a)]^2 + 3 * [K_{fs}(\tau_a)]^2]^{1/2}$	
	$\sigma_a' = 18.01[Mpa]$	
Factor de seguridad	$n_f = 8,68$	

Como una alternativa de diseño y comprobación se realizó un estudio por elementos finitos a la flecha D, tomando en cuenta sus condiciones de trabajo dentro de la máquina curvadora.

Figura 49.

Factor de seguridad Flecha D (Simulación ANSYS)



Nota: Desarrollador por el autor

En la Figura 49, se puede apreciar que el factor de seguridad es elevado, esto debido a la geometría de la flecha, tomando en consideración que debe ser capaz de acoplarse a la caja reductora de velocidad, en consecuencia, la flecha D no fallará cuando se encuentre operando la máquina curvadora.

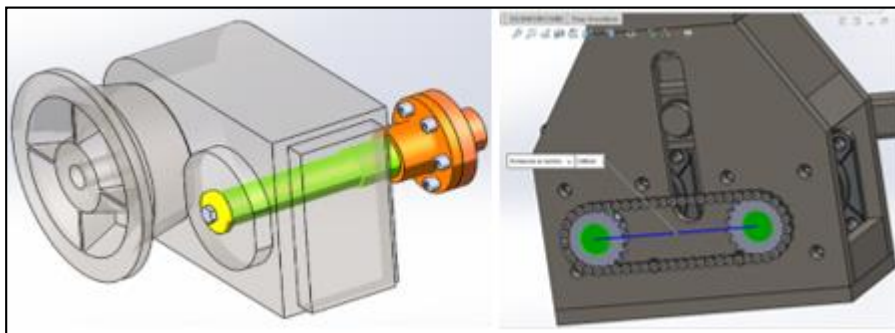
Transmisión de Baja velocidad

Toma lugar desde la salida de la caja reductora de velocidad hasta las flechas de curvado, la flecha E, correspondiente a la flecha de salida de la caja reductora, la misma trabaja

a bajas velocidades y altas capacidades de torque, condiciones necesarias para el correcto funcionamiento de la máquina.

Figura 50.

Transmisión de potencia y movimiento



Nota: Desarrollado por el autor

Cálculo de la potencia de salida de la caja reductora de velocidad

Para el cálculo de la potencia en la salida de la caja reductora se toma en cuenta sus características.

Tabla 27.

Características de la caja reductora de velocidad

Marca	Tipo de reductor	Torque máximo	Eficiencia (η)
Pujol	Reductor pendular	1630	0.92 – 0.96

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Ec.3.7})$$

Por tanto, se obtiene la potencia de salida sobre la flecha E, con una velocidad de salida de 20 [rpm]

$$P_2 = 2820.0024[W]$$

Selección de Cadena

En este apartado se va a tomar en cuenta los requerimientos de diseño para el perfil de mayor demanda, la potencia pico necesaria para el proceso de curvado, esta se logra

multiplicando la potencia requerida por un factor de servicio; para el caso en particular se trabaja con un motor eléctrico y la carga a transmitir debe ser suave por su baja velocidad por lo tanto $k = 1.5$

Velocidad de rotación del eje: 20 [rpm]

Potencia nominal (Pn): 0.9 [Hp]

Diámetro del eje: 35[mm]

Potencia de diseño (Pd)

Para calcular este parámetro se va a utilizar la siguiente formula

$$Pd = Pn * k \quad (\text{Ec.3.8})$$

Donde

k : factor de servicio se obtiene del Anexo B - 9

$$Pd = 0.9[\text{Hp}] * 1.5$$

$$Pd = 1006.7 [W]$$

Tabla 28.

Potencia necesaria vs Potencia suministrada

P2	Pd
2820.0024[W]	1006.7[W]
$P2 > Pd$ CUMPLE	

Se comprueba que la potencia que brinda el motor eléctrico es mayor a la potencia necesaria para las condiciones de trabajo más críticas.

Tomando en cuenta los parámetros de potencia y velocidad de giro del eje, la catarina que se adapta a las necesidades es:

Tabla 29.*Características de la cadena de rodillos*

Tipo de cadena	Numero de cadena	Paso (in)
Cadena de rodillos estándar, una hilera	80	1

Selección de catarina

Las catarinas para la transmisión de baja velocidad deben ser capaces de realizar un trabajo continuo y armónico para el correcto funcionamiento de la máquina curvadora, el sistema de transmisión debe ser capaz de transmitir el torque necesario en los dados de curvado.

- **Catarina conductora**

Tomando en cuenta los parámetros calculados y según el Anexo B 3 se obtiene

Tabla 30.*Características catarina - flechas de curvado*

Parámetros	Característica	Observación
Número	Numero 80	Anexo B 3
Tipo	Tipo-B estándar una hilera	Anexo B 3
Número de dientes	15	Anexo B 3
Paso [mm]	25.4	Anexo B 3
Diámetro primitivo [mm]	122.16	Anexo B 3
Diámetro (Hub)[mm]	70	Anexo B 3

Los requerimientos para la operación de la máquina dictan una relación de transmisión 1:1, para un trabajo uniforme y suave. Debido a esta condición se mantienen las características de la catarina conductora.

Fuerza de contacto en las catarinas

Según la ecuación 3.2 se tiene.

$$F_o = 7926.77[N]$$

Cálculo del torque sobre el eje de rolado

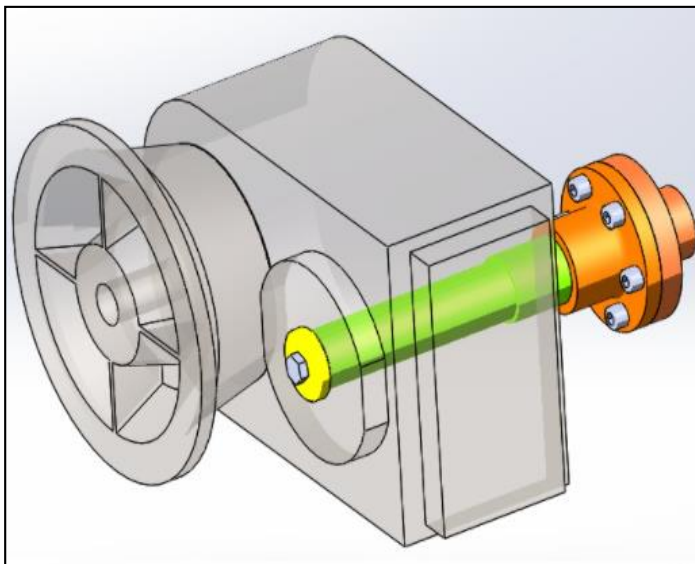
$$T = 483.53[N * m]$$

Diseño Flecha E

En la salida de la caja reductora, se obtiene la velocidad de trabajo de la flecha E, así como de los datos de curvado, y las características de torque necesario para el correcto funcionamiento de la máquina curvadora

Figura 51.

Flecha E



Nota: Desarrollado por el autor

El material para utilizar para el diseño de la flecha es el acero SAE 1018, por su disponibilidad en el mercado. Así pues, las propiedades mecánicas del material seleccionado son:

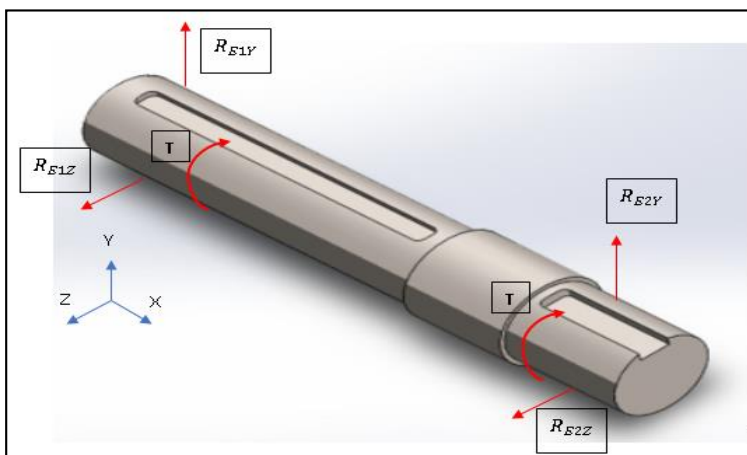
$$S_{ut} = 400[Mpa], S_y = 220[Mpa]$$

Las propiedades mecánicas se tomaron del Anexo B - 12 del libro (Budynas & Nisbett, 2008)

Diagrama de cuerpo libre de la flecha E

Figura 52.

Diagrama de cuerpo libre Flecha E



Nota: Desarrollado por el autor

En la tabla 31 se muestran los valores obtenidos, corresponden al diseño de flechas sometidas a esfuerzos fluctuantes, del libro de diseño mecánico (Budynas & Nisbett, 2008)

Tabla 31.

Parámetros de la flecha E

Parámetro	Especificación
Límite de fatiga	$Se' = 200 [Mpa]$
Factores que modifican la fatiga	$Ka = 0.92, Kb = 0.85, Kc = 1, Kd = 1$

$$K_e = 1, K_f = 1$$

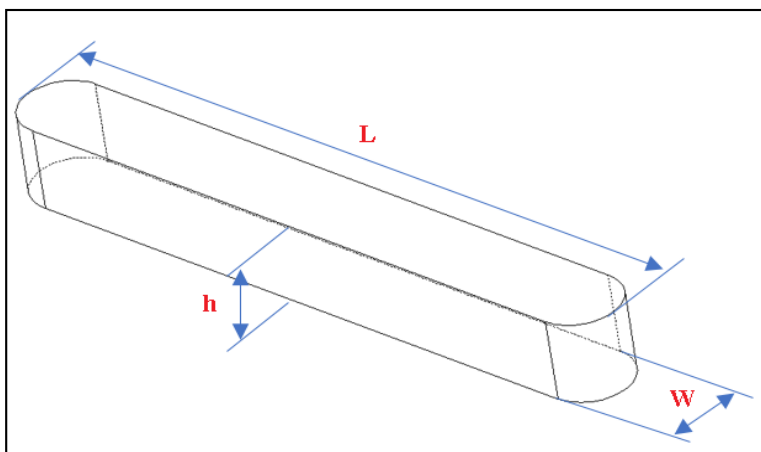
Esfuerzo de fatiga	$Se = 156.4 [Mpa]$
Factores de concentración de esfuerzos	$K_{ts} = 1.6$ $K_t = 1.8$
Esfuerzo alternante por torsión	$\tau_a = 19.7 [Mpa]$
Factores de concentración de esfuerzos por fatiga	$q = 0,64$ y $q_c = 0,86$ $K_f = 1,51$ y $K_{fs} = 1,34$
Componente de amplitud esfuerzo de Von Mises	$\sigma_a' = 47.8 [Mpa]$
Factor de seguridad	$n_f = 3.27$

Diseño de chavetas

El material de las chavetas AISI 1018 con esfuerzo a la fluencia $S_y = 220 [Mpa]$. En el Anexo B -1, se consideran las dimensiones de las mismas.

Figura 53.

Chavetas caras planas



Nota: Desarrollado por el autor

Chaveta eje motor electrico

Diametro del eje $d=28$ mm, se tiene $W= 8$ mm y $h=7$ mm.

El torque en el eje del motor es $T = 17.11 [N * m]$

Falla a corte

$$\frac{2 * T}{d * W * L} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (\text{Ec.3.9})$$

Donde:

T: Torque [N*mm]

W: ancho de la chaveta [mm]

h: Altura de la chaveta [mm]

L: Longitud de la chaveta [mm]

d: Diametro del eje [mm]

Ssy: Esfuerzo de fluencia medio [Mpa]

n: Coeficiente de seguridad

Falla por aplastamiento

$$\frac{4 * T}{d * L * h} = \frac{Sy}{n} \quad (\text{Ec.3.10})$$

En el Anexo B15, se muestran las características principales de cada chaveta y su

coeficiente de seguridad respectivo.

Tabla 32.

Características geométricas de las chavetas

Chaveta	W [mm]	L [mm]	H[mm]	Coeficiente de seguridad
Chaveta- Flecha motor	8	50	7	25.7
Chaveta – Flecha D (Catrina)	12	50	8	8.9
Chaveta – Flecha D (Caja reductora)	12	50	8	8.9
Chaveta - Flecha E (Caja reductora)	14	130	9	6.65

Chaveta – Flecha E (Acople rígido tipo brida)	14	50	9	2.1
--	----	----	---	-----

Las chavetas en el sistema de arranque poseen un coeficiente de seguridad elevado debido a que el motor eléctrico y la caja reductora, ya contaban con chaveteros, por ello se optó por utilizar estas características presentes en estos elementos.

Diseño acople rígido tipo brida

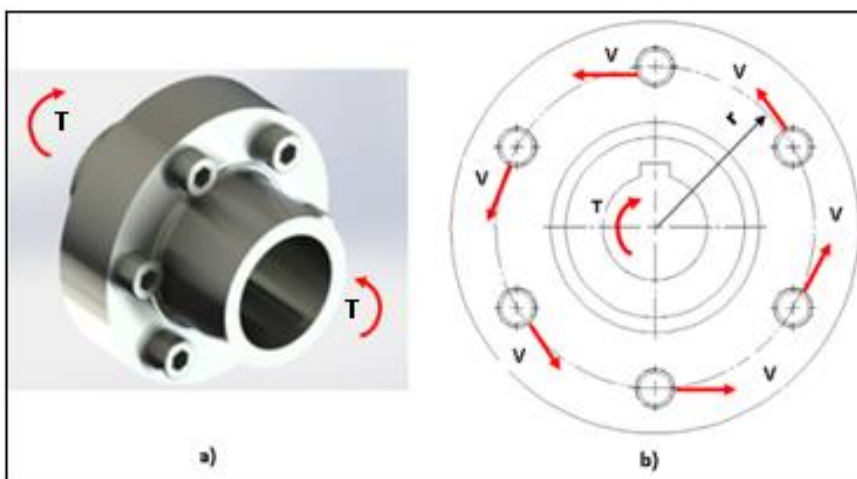
El diseño del acople rígido tipo brida ayuda a transmitir el torque, por medio de la resistencia al esfuerzo cortante de los pernos.

El material para la fabricación de las bridas es el acero de transmisión 1045, es un material de fácil adquisición en el mercado local. Las propiedades del acero son detalladas a continuación.

$$S_y = 310 [Mpa] \quad S_{ut} = 570 [Mpa] \quad \%elong = 20$$

Figura 54.

Acople rígido tipo brida



Nota: Desarrollado por el autor, a) Torque generado sobre el acople tipo brida b) Fuerzas cortantes sobre los pernos

En la figura 54, se observa la disposición del torque entrando desde la flecha E, proveniente de la salida de la caja reductora de velocidad, hacia el acople rígido tipo brida montado sobre la misma.

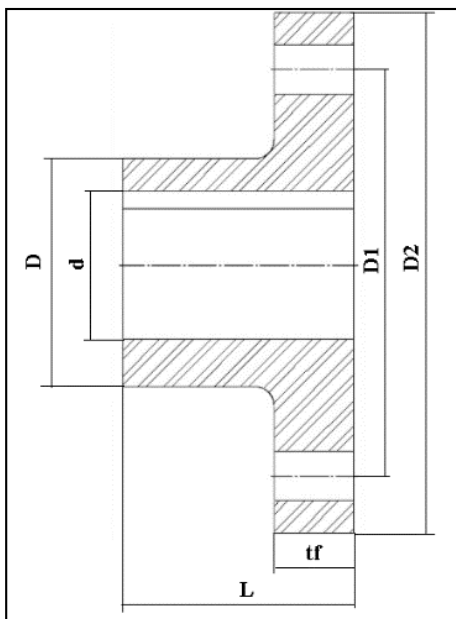
La geometría del acople tipo brida se describe en la Figura 55.

Donde:

Descripción	Valor
D2	138 [mm]
D1	107[mm]
tf	15 [mm]
D	75[mm]
d	55[mm]
L	68[mm]

Figura 55.

Dimensionamiento del acople rígido



Nota: Desarrollado por el autor

En la tabla 33, se detallan las características mecánicas y dimensiones de los pernos Allen montados sobre la brida para su acoplamiento.

Tabla 33.

Características Pernos Allen cabeza redonda

Característica	Valor	Observación
Grado SAE	8	Anexo B 16
Intervalos de tamaños (Diámetro)	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$ [in]	Anexo B 16
Resistencia mínima a la tensión	1034.21[Mpa]	Anexo B 16
Resistencia mínima a la fluencia	896.318[Mpa]	Anexo B 16
Material	Acero de aleación de medio carbono	Anexo B 16

Los cálculos correspondientes al diseño del acople rígido tipo brida se detallan a profundidad en el Anexo B15, en la tabla 34 se resumen las características y valores encontrados.

Tabla 34.

Parámetros del acople rígido tipo brida.

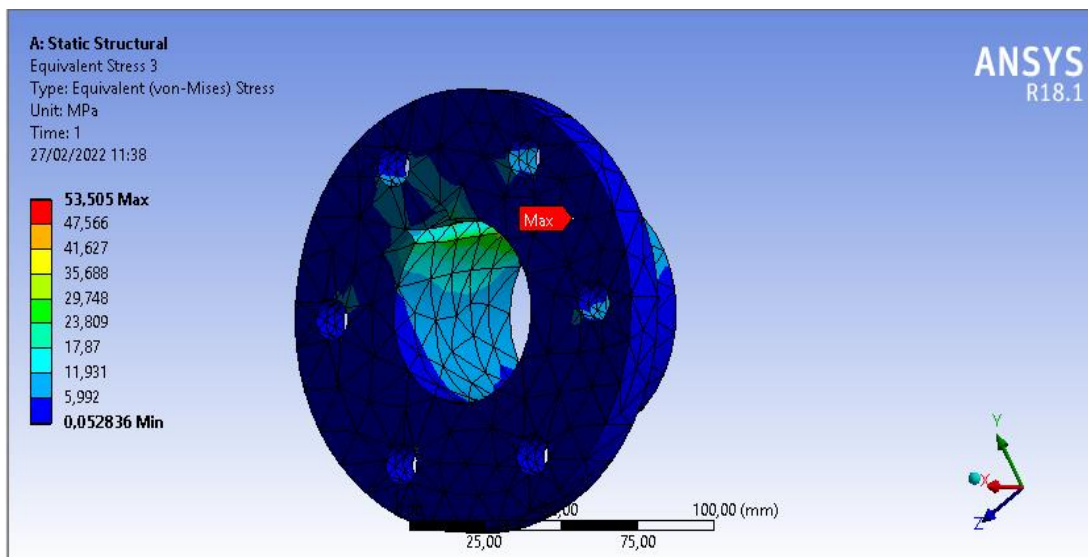
Parámetro	Especificación
Límite de fatiga	$Se' = 517,105$ [Mpa]
Factores que modifican la fatiga	$Ka = 0.92$, $Kb = 0.85$ $Kc = 1$, $Kd = 1$ $Ke = 1$, $Kf = 1$
Esfuerzo a fatiga	$Se = 404,37$ [Mpa]
Factores de concentración de esfuerzos	$Kts = 1.6$ $Kt = 1.8$

Esfuerzo alternante por torsión	$\tau a = 11,89 [Mpa]$
Factores de concentración de esfuerzos por fatiga	$q = 0,64$ y $q_c = 0,86$ $K_f = 1,51$ y $K_{f_s} = 1,34$
Componente de amplitud esfuerzo de Von Mises	$\sigma a' = 27,6[Mpa]$
Factor de seguridad	$nf = 14,65$

Como una alternativa de diseño y comprobación, se caracterizó el análisis de elementos finitos de la brida.

Figura 56.

Comportamiento del acople tipo brida (Simulación ANSYS)

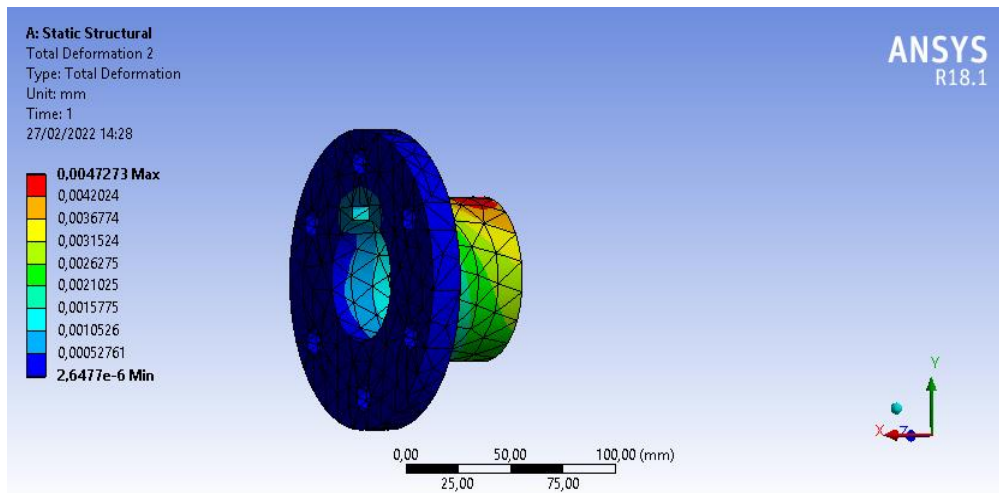


Nota: Desarrollado por el autor

Como se observa en la figura 56, las condiciones más críticas se presentan en la zona de la chaveta, se puede comprobar que los esfuerzos presentes en la zona de pernos son relativamente bajos.

Figura 57.

Deformación total del acople (Simulación ANSYS)

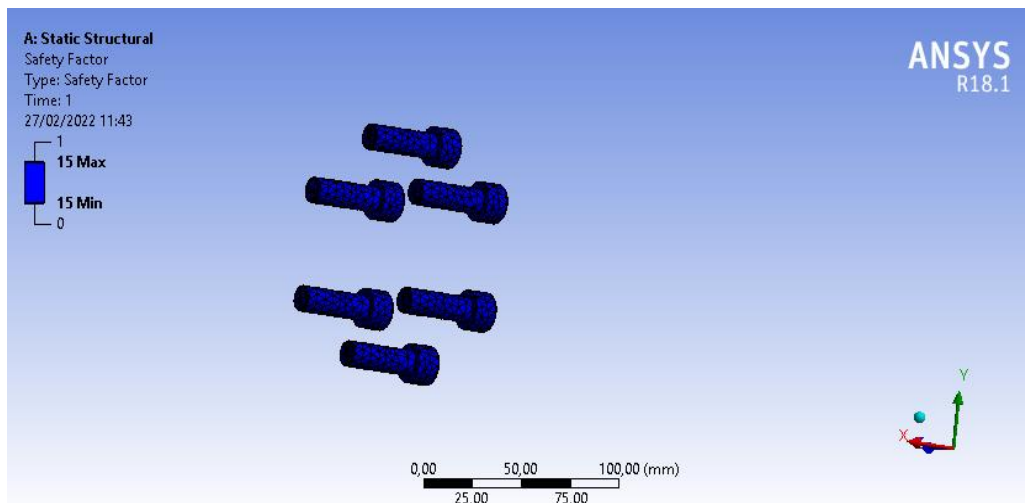


Nota: Desarrollado por el autor

La deformación total sobre el acople tipo brida, en sus condiciones más críticas, presenta una deformación total de 0,0047 [mm], por lo que se puede notar que no sufre deformaciones considerables

Figura 58.

Factor de seguridad sobre los pernos (Simulación ANSYS)



Nota: Desarrollado por el autor

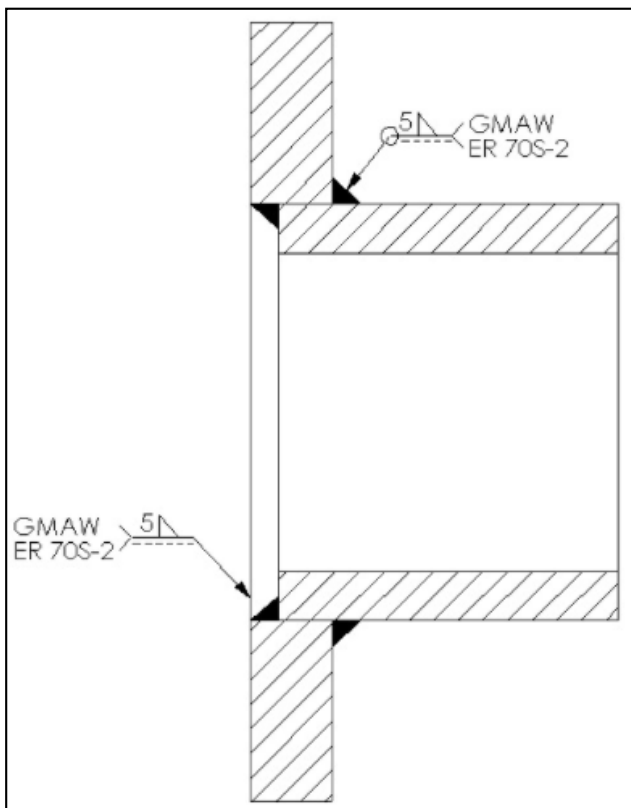
EL factor de seguridad sobre los pernos, otorgado por el programa es de 15, lo que nos indica un sobredimensionamiento de los componentes, esto se debe a que en la salida de la caja reductora de velocidad el diámetro de la flecha es de 50[mm], por lo que el acoplamiento tipo brida debe ser armónico y capaz de acoplarse a las condiciones de los elementos disponibles

Soldadura acople rígido tipo brida

Dentro de la fabricación del acople rígido tipo brida se realizó un proceso de soldadura los cordones de soldadura se especifican en la figura 59.

Figura 59.

Soldadura acople rígido



Nota: Desarrollado por el autor

El material de aporte para la soldadura de las bridas es ER-70 S – 2, es un material de fácil adquisición en el mercado local. Las propiedades del acero se detallan a continuación.

$$S_y = 420[\text{Mpa}] \quad S_{ut} = 510 [\text{Mpa}]$$

Los cálculos correspondientes a la soldadura del acople rígido tipo brida se detallan a profundidad en el anexo B15, en la tabla 35, se resumen las características y valores encontrados

Tabla 35.

Parámetros de soldadura sobre las bridas

Parámetro	Especificación
Esfuerzo cortante primario	$\tau' = \frac{V}{A}$ $\tau' = 0$
Esfuerzo cortante secundario (Producido por torsión)	$\tau'' = \frac{T * c}{J}$ $\tau'' = 7.74[\text{Mpa}]$
Factor de concentración esfuerzos a fatiga	$ka = 0.92 ; Kb = 1 ; Kc = 0.59$ $Kd = 1 ; Ke = 1 ; Kf = 1$
Componente de amplitud esfuerzo de Von Mises	$\sigma a' = 28.7[\text{Mpa}]$
Factor de seguridad	$nf = 5.5$

La soldadura presenta muy buenas características bajo las cargas de trabajo del acople rígido tipo brida, brindando seguridad en el trabajo de la máquina curvadora.

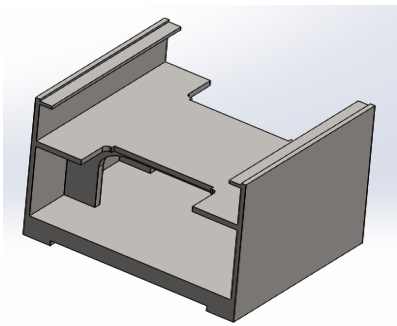
Módulo estructural de soporte

El módulo estructural, estará compuesto por dos elementos, los cuales son: bastidor y soporte auxiliar, su función es soportar las cargas de trabajo generadas por el módulo de curvado y módulo de transmisión con todos sus sistema y subsistemas.

Diseño Bastidor

Figura 60.

Bastidor máquina balanceadora



Nota: Desarrollado por el autor

Para el cálculo de los esfuerzos presentes en el bastidor, se tomó en cuenta las características de este elemento estructural.

Tabla 36.

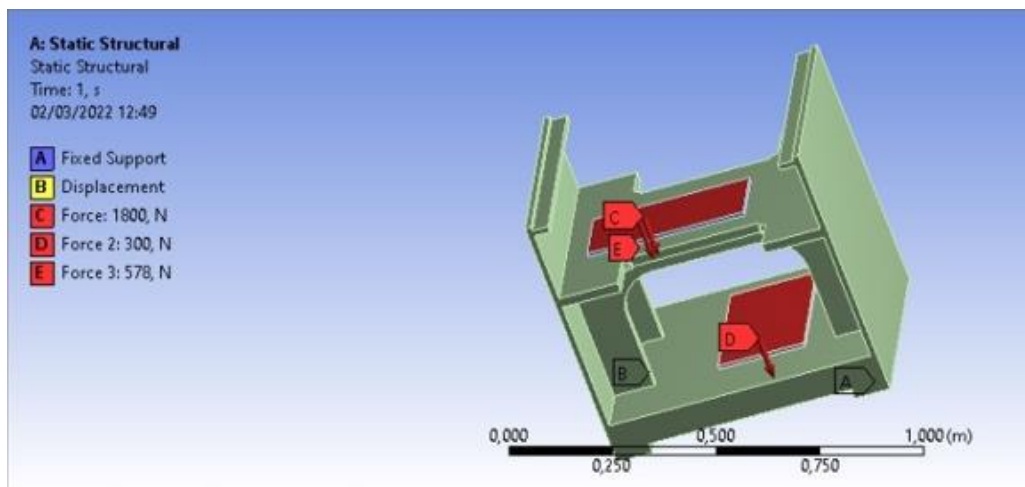
Características bastidor máquina balanceadora

Característica	Parámetros
Dimensiones	Largo 700 [mm] Ancho 550 [mm] Altura 671 [mm]
Espesor de paredes	15, 20 y 25 [mm]
Material	Fundición acero de bajo carbono
Tipo de estructura	Rígida
Masa	408 [kg]

En el diseño del bastidor se ubicaron las cargas que generan los elementos dispuestos sobre él con sus accesorios durante el proceso de curvado, en la figura 61, podemos observar la disposición de estas cargas.

Figura 61.

Cargas de trabajo en el bastidor



Nota: Desarrollado por el autor

La tabla 37 muestra las fuerzas que actúan sobre el bastidor.

Tabla 37.

Aplicación de cargas en el bastidor

Punto	Carga (N)	Componente mecánico
C	1800	Caja reductora
D	300	Motor eléctrico
E	578	Transmisión (motor – caja reductora)

Las cargas detalladas en la Tabla 37, pertenecen al peso muerto de la caja reductora de velocidades con sus elementos constitutivos (flechas, catarinas), peso del motor eléctrico y la carga de operación que genera el motor y la caja reductora por medio de la cadena y catarinas, los cuales forman parte del módulo de transmisión, además los puntos C, D y E donde se

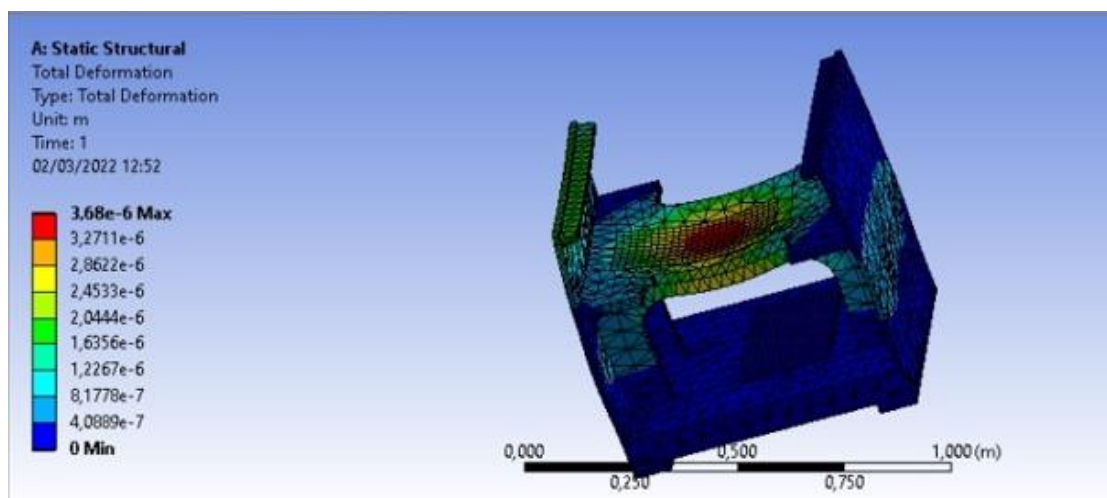
colocaron las cargas, fueron previamente estudiados al diseñar la forma de transmitir la potencia.

Ya que la máquina curvadora de tubos y perfiles trabaja a un régimen de revoluciones bajo, se considera un diseño por deformación debido al peso muerto y la carga de trabajo de los componentes que alberga.

En el estudio por elementos finitos, ver figura 62, podemos identificar el desplazamiento máximo que ocurre en el lugar donde se encuentra la caja reductora de velocidad, converge a un valor de 0.00368 [mm], dicho valor no genera problemas durante el funcionamiento de la máquina.

Figura 62.

Estudio por elementos finitos del batidor, Deformación

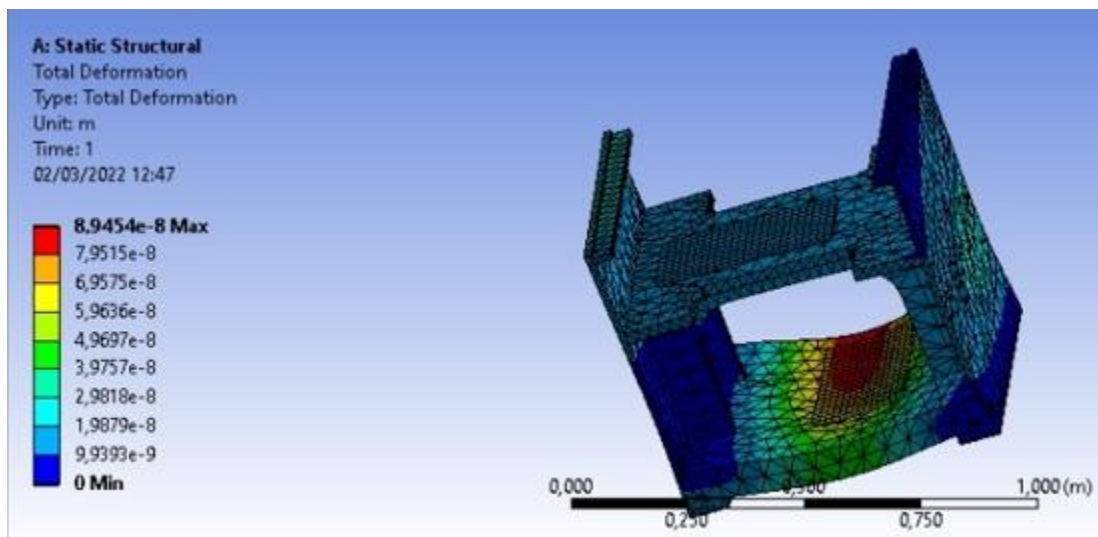


Nota: Desarrollado por el autor

El bastidor por ser previamente diseñado para una máquina herramienta balanceadora, soporta las cargas de trabajo que genera durante su operación la máquina prototipo curvadora de tubos, sin generar deformaciones excesivas, en la figura 63 se identifica el desplazamiento que se genera en el bastidor donde se encuentra el motor eléctrico.

Figura 63.

Deformación bastidor



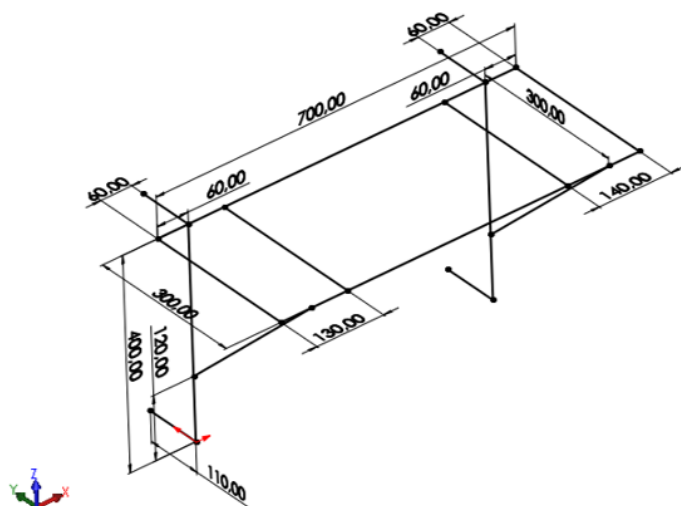
Diseño estructura de soporte auxiliar

Las dimensiones de la estructura de soporte auxiliar fueron consideradas tomando en cuenta los siguientes factores: posición del eje de salida de la caja reductora de velocidades, dimensionamiento del módulo de rolado, seguridad de operación, postura de operación y mantenibilidad. Tomando en cuenta estos factores las dimensiones de la estructura de soporte se muestran en la figura 63.

- Longitud: 700 [mm]
- Altura: 400 [mm]
- Ancho: 300 [mm]

Figura 64.

Diseño alámbrico estructura de soporte



Nota: Desarrollado por el autor

Material

Se empleará en el diseño del soporte, ángulo estructural de 65x65x6[mm] de Acero

ASTM A-36, cuyas especificaciones generales son:

Tabla 38.

Características Angulo estructural

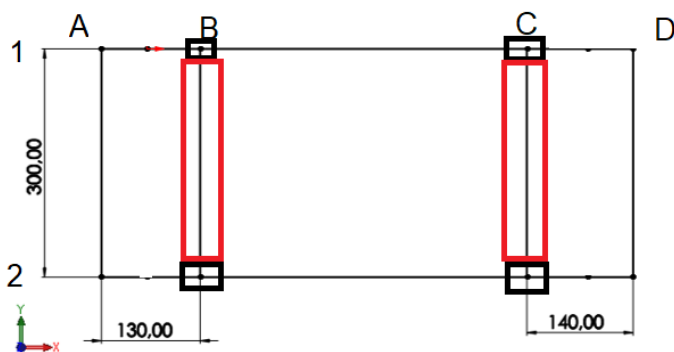
ORD	ESPECIFICACIONES ASTM A-36	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
1	Módulo de elasticidad del acero	E	200	GPa
2	Resistencia a la fluencia del acero	Sy	250	MPa
3	Área de la sección transversal	A	7.53	cm ²
4	Peso por unidad de longitud	P	5.91	Kg/m
5	Momento de inercia de la sección	I	29.2	cm ⁴
6	Módulo de resistencia de la sección	W	6.21	cm ³
7	Radio de giro de la sección	Rx , Ry	1.97	cm

Cálculo de carga sobre la estructura de soporte auxiliar

Empleando el esquema de la Figura 64, teniendo en cuenta que la carga que genera el módulo de rolado mientras la máquina está en operación, para el perfil con mayor momento de inercia es 800 [N] como carga muerta y 15.2 [KN] como carga de trabajo, se aplica sobre las vigas 1B 2B y 1C 2C, ver figura 64.

Figura 65.

Diagrama alámbrico método viga colaborante



Nota: Desarrollado por el autor

En la Tabla 39, se muestran las cargas que soporta la estructura auxiliar en cada punto de interés.

Tabla 39.

Aplicación de cargas estructura de soporte

Carga	Valor (KN)
B1	8.14
C1	8.15
B2	8.14
C2	8.15
Carga máxima QT	11.94

El desarrollo para el cálculo de las cargas de trabajo, que soporta la estructura auxiliar se encuentra en detalle en, Anexo C – 2.

Análisis columna recta

La estructura de soporte posee dos columnas las cuales están atornilladas al bastidor, en la Tabla 40 se detallan sus propiedades para el desarrollo de los cálculos.

Tabla 40.

Propiedades sección transversal columna (McCormac, 2012)

Le	Longitud efectiva	(cm)
K	Constante de fijación en los extremos	
r	Radio de giro sección transversal	(cm)
L	Longitud real entre los apoyos	(cm)
Cc	Razón de transición de delgadez	
σ_e	Esfuerzo de pandeo elástico	N/m ²
σ_{cr}	Esfuerzo de pandeo por flexión crítico de una columna	N/m ²
Pa	Carga admisible	N
Pcr	Carga crítica	N

La carga admisible que puede soportar la columna se calcula mediante la expresión:

$$P_{cr} = \sigma_{cr} * A \quad \text{(Ec.3.11)}$$

$$P_{cr} = \sigma_{cr} * A = 244.6 * 10^6 * 7.53 * 100^{-2} = 184182.3 \text{ N}$$

Donde:

σ_{cr} = esfuerzo crítico que soporta la columna.

A = Área de la sección transversal de la columna, ver Tabla 38

El desarrollo del procedimiento y la obtención de las cargas y los esfuerzos se encuentran a detalle en el Anexo C-2

Calculamos el factor de seguridad mediante la ecuación:

$$N = \frac{P_{cr}}{P_a} \quad (\text{Ec.3.12})$$

Donde:

$$P_{cr} = 184182.3 \text{ N}$$

$$P_a = QT * g$$

$$N = \frac{184182.3 \text{ N}}{11941.202 \text{ N}} = 15.4$$

Teniendo en cuenta que la carga total (P_a) en la columna es menor que la carga crítica (P_{cr}), se admite el diseño de la estructura de soporte.

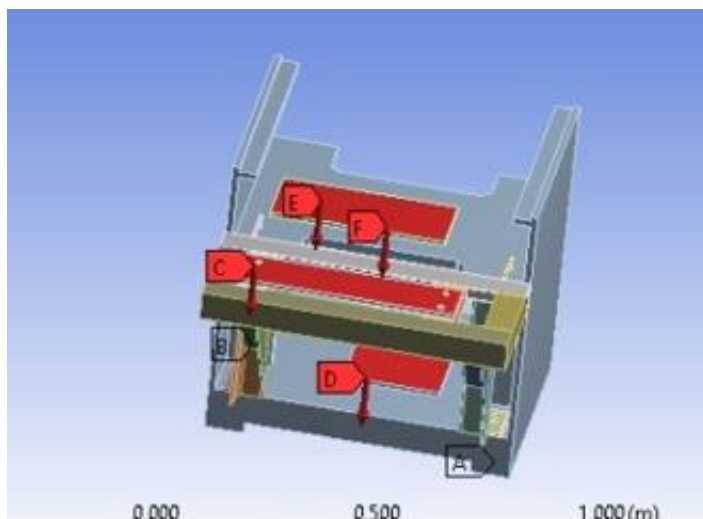
Nota: Los cálculos arrojan un sobredimensionamiento en la estructura auxiliar, esto se debe al uso del ángulo estructural de 65x65x6 [mm], el mismo se encontraba disponible sin ningún costo para la construcción de la máquina prototipo, es por ello que se realizó el diseño en función de este perfil estructural como se evidencio en la selección de alternativas.

Análisis por elementos finitos módulo estructural de soporte

Una vez ensamblado los dos componentes del módulo estructural de soporte, se procedió con el estudio mediante elementos finitos para simular sus cargas de trabajo, ver figura 66.

Figura 66.

Aplicación de cargas conjunto (bastidor - estructura auxiliar)

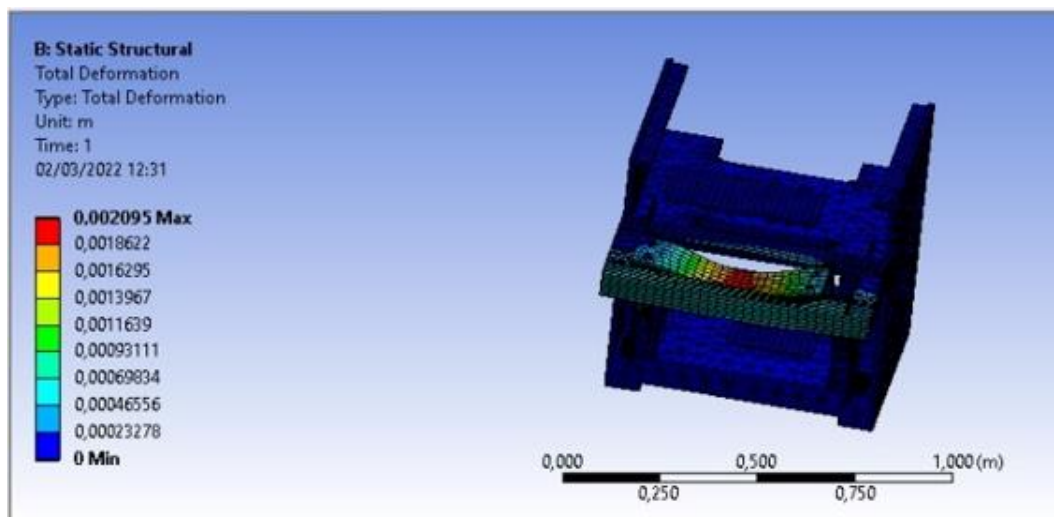


Nota: Desarrollado por el autor

En la figura 67, se evidencia que la estructura auxiliar soporta las mayores cargas de trabajo durante la operación de la máquina prototipo, los resultados de la simulación concuerdan con los cálculos del diseño de la estructura, desarrollados en el Anexo C-2.

Figura 67.

Estudio por elementos finitos modulo estructural de soporte, Deformación



Nota: Desarrollado por el autor

Diseño módulo de control

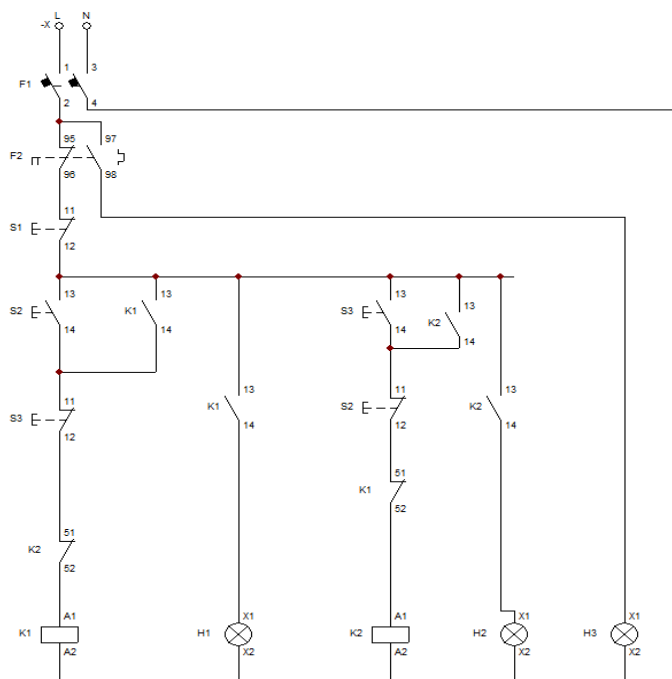
La máquina prototipo curvadora, debe poseer un sistema de control electrónico, los requerimientos que debe cumplir este sistema se detallan a continuación:

- Encender el motor.
- Apagar el motor.
- Paro de emergencia.
- Inversión de giro del motor.
- Contador de giro.
- Voltaje 220V.
- Red trifásica.

Para poder cumplir con los requerimientos antes mencionados es indispensable diseñar dos tipos de circuitos, de control y potencia.

Circuito de control

El circuito de control Figura 68, tiene la función de activar y desactivar los procesos que realiza la máquina, la tabla 41 detalla la función de cada componente en el circuito.

Figura 68.*Circuito de control*

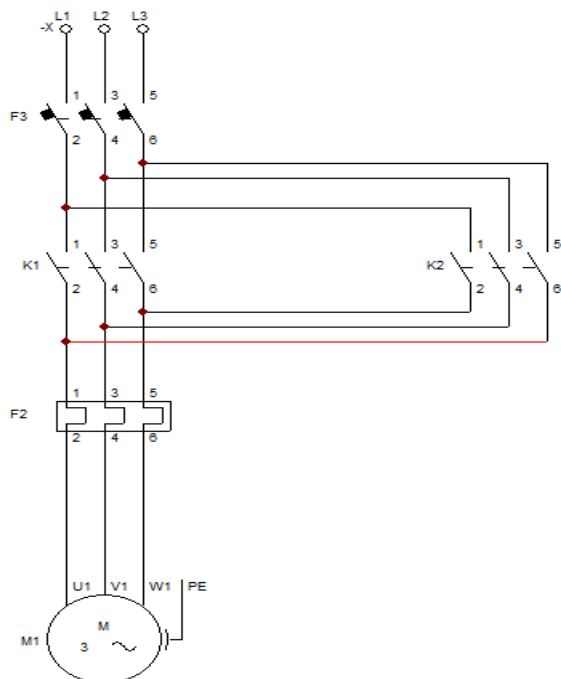
Nota: Desarrollado por el autor.

Tabla 41.*Componentes circuito de control*

Símbolo	Función
K1	Contactora, sentido de giro horario del motor.
K2	Contactora, sentido de giro anti horario del motor.
S1	Pulsador, paro de emergencia
S2	Pulsador, activa contactora K1
S3	Pulsador, activa contactora K2
F1	Breaker, protege el circuito de control

Circuito de potencia

El circuito de potencia figura 69, tiene la función de proteger y alimentar al motor eléctrico de la máquina, la tabla 42 detalla la función de cada componente en el circuito.

Figura 69.*Circuito de potencia*

Nota: Desarrollado por el autor.

Tabla 42.*Componentes circuito de potencia*

Símbolo	Función
K1	Contactora, sentido de giro horario del motor.
K2	Contactora, sentido de giro anti horario del motor.
F2	Interruptor térmico magnético, protege al motor cuando la temperatura supera el rango normal de funcionamiento
F3	Breaker, protege el circuito de potencia
M1	Motor trifásico

Capítulo IV: Construcción y Pruebas

Una vez verificado que el diseño planteado cumple los requerimientos establecidos, tanto en materiales como en dimensiones, se procede con la construcción de la máquina prototipo con la guía de los planos de diseño, ver Anexo D, los cuales detallan elementos y partes con sus respectivas dimensiones y tolerancias.

Los elementos requeridos para la construcción de cada módulo se detallan en el capítulo 5 con sus respectivos costos y mano de obra, además se puede visualizar la construcción a detalle de cada una de las partes de la máquina en el Anexo D. A continuación, se presentan los procesos realizados y descripción de cada uno de los mismos con sus respectivos mecanismos de control para la construcción de la máquina prototipo.

Construcción módulo de curvado

Tabla 43.

Actividades realizadas en la construcción del módulo de curvado

Proceso	Descripción	Equipos empleados	Instrumentos de control
Corte	De acuerdo a las medidas establecidas en el diseño del módulo de rolado, se cortaron las planchas para la estructura de rolado.	<ul style="list-style-type: none"> • Oxicorte • Corte por plasma 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador • pie de rey • Flexómetro
Mecanizado	Rectificación de las planchas cortadas	<ul style="list-style-type: none"> • Fresadora 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador
Estructura de rolado	perforación de agujeros Proceso de roscado	<ul style="list-style-type: none"> • Machuelo 	<ul style="list-style-type: none"> • pie de rey • Comparador de reloj • Nivel

Mecanizado flechas y chumaceras	Torneado de las flechas del tren inferior y superior, ranurado de chaveteros Torneado de las cuatro chumaceras con sus perforaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Torno 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador pie de rey • Comparador de reloj
Mecanizado Base móvil	Torneado base móvil Fresado para acabado final base móvil Torneado tornillo sin fin Torneado volante de fuerza	<ul style="list-style-type: none"> • Torno • Fresadora 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador pie de rey • Comparador de reloj • Escuadra
Mecanizado matrices	Torneado de matrices de acuerdo a los planos de diseño para perfiles no mayores a 1 [in] Torneado de separadores	<ul style="list-style-type: none"> • Torno 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador pie de rey • Comparador de reloj
Tratamiento térmico matrices	Se realiza un cementado mejorando las propiedades del acero AISI 1018 (ver certificado en anexo C-3), aumentando su dureza, lo cual eleva su eficacia al estar en contacto con los perfiles estructurales y curvarlos.	<ul style="list-style-type: none"> • Horno 	<ul style="list-style-type: none"> • Durómetro de pedestal para HRC
Ensamble módulo de	Montaje de chumaceras y rodamientos en la estructura de curvado.	<ul style="list-style-type: none"> • Mesa de planitud 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador pie de rey

curvado	Montaje y alineación de flechas inferiores. Montaje base móvil, tornillo sin fin, flecha superior, rodamientos axiales y volante. Empernado	<ul style="list-style-type: none">• Comparador de reloj• Escuadra• Nivel
----------------	---	--

Figura 70.

Construcción del módulo de curvado



Nota: Desarrollado por el autor

Construcción módulo de transmisión

Tabla 44.

Actividades realizadas en la construcción del módulo de transmisión

Proceso	Descripción	Equipos empleados	Instrumentos de control
Mecanizado de flechas y bridas	Torneado flechas de la caja reductora Torneado bridas para junta Perforación de agujeros	<ul style="list-style-type: none"> Fresadora 	<ul style="list-style-type: none"> Calibrador pie de rey Comparador de reloj
Soldadura bridas	Soldadura de filete	<ul style="list-style-type: none"> Soldadora MIG, gas protector CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Inspección visual
Mecanizado catarinas	Torneado de catarinas, aumento diámetro interior	<ul style="list-style-type: none"> Torno 	<ul style="list-style-type: none"> Comparador de reloj Calibrador pie de rey

Figura 71.

Construcción del módulo de transmisión



Nota: Desarrollado por el autor

Construcción módulo estructural de soporte

Tabla 45.

Actividades realizadas en la construcción de módulo estructural de soporte

Proceso	Descripción	Equipos empleados	Instrumentos de control
Corte	Seccionado del ángulo estructural de acuerdo a los planos de diseño	• Sierra de cinta	• Flexómetro
Soldadura de la estructura	Se fabrica la estructura auxiliar de soporte utilizando el proceso GMAW, para soldar cada elemento.	• Soldadora MIG, gas protector CO ₂	• Inspección visual

Mecanizado	Perforación de agujeros	<ul style="list-style-type: none"> • Taladro de banco 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrador pie de rey
Ensamble módulo estructural de soporte	Se atornilla el soporte auxiliar sobre el bastidor Verificamos alineación Apriete final	<ul style="list-style-type: none"> • Llaves de boca • Racha • Copa 	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel • Escuadra

Figura 72.

Construcción módulo estructural de soporte



Nota: Desarrollado por el autor

Construcción tablero de control

En la construcción del tablero de control, se establece dos componentes importantes mandos (pulsadores, breakers, interruptores, luces piloto) y sección eléctrica (contactores, bobinas, relé térmico), hacemos referencia a la norma IEC 61439-3 para la sección mandos y la norma IEC 61439-1 para la sección eléctrica.

“IEC 61439-3 establecida para tableros de alta tensión, los cuales son diseñados para ser operados y manipulados por personas ordinarias, aquellas que tienen formación media o se encuentran en aprendizaje (Arismendi, 2016)”.

“IEC 61439-1 establecida para instalaciones con elementos eléctricos, los cuales deben cumplir rangos y especificaciones técnicas en su construcción (Arismendi, 2016)”.

La tabla (46), enlista todos los elementos electrónicos y mecánicos utilizados en la construcción del módulo de control de la máquina curvadora de tubos.

Tabla 46.

Componentes módulo de Control

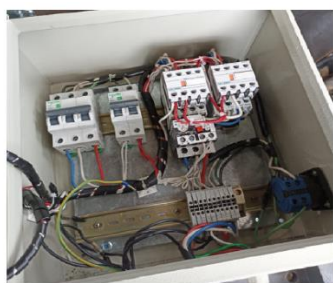
Cantidad	Componente	Especificación
1	Tablero para uso eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricado en lámina de acero de 1.2mm de espesor • Puerta abatible • Placa de montaje para circuitos o elementos electrónicos
2	Breakers	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V • 3 Vías (Potencia) • 2 Vías (Control) • 50 Amp
1	Relé térmico	<ul style="list-style-type: none"> • De 2 a 10 Amp • 220 V
2	Contactores	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V • 20 Amp

		<ul style="list-style-type: none"> • 3 vías
1	Selector	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V • ON / OFF
1	Piloto	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V • Luz roja
3	Pulsadores	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V
1	Botón paro de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V
1	Mando a distancia	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V
1	Contador	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V

La figura 73 sección A y B, muestra la instalación de los componentes eléctricos y mandos de la máquina prototipo.

Figura 73.

Módulo de control máquina curvadora de tubos



A



B

Nota: Desarrollado por el autor

Pruebas y resultados

Al concluir la construcción de cada uno de los módulos, se realiza el ensamble final ver figura 74, y se procede con las pruebas de funcionamiento.

Figura 74.

Máquina Prototipo curvadora de tubos y perfiles metálicos



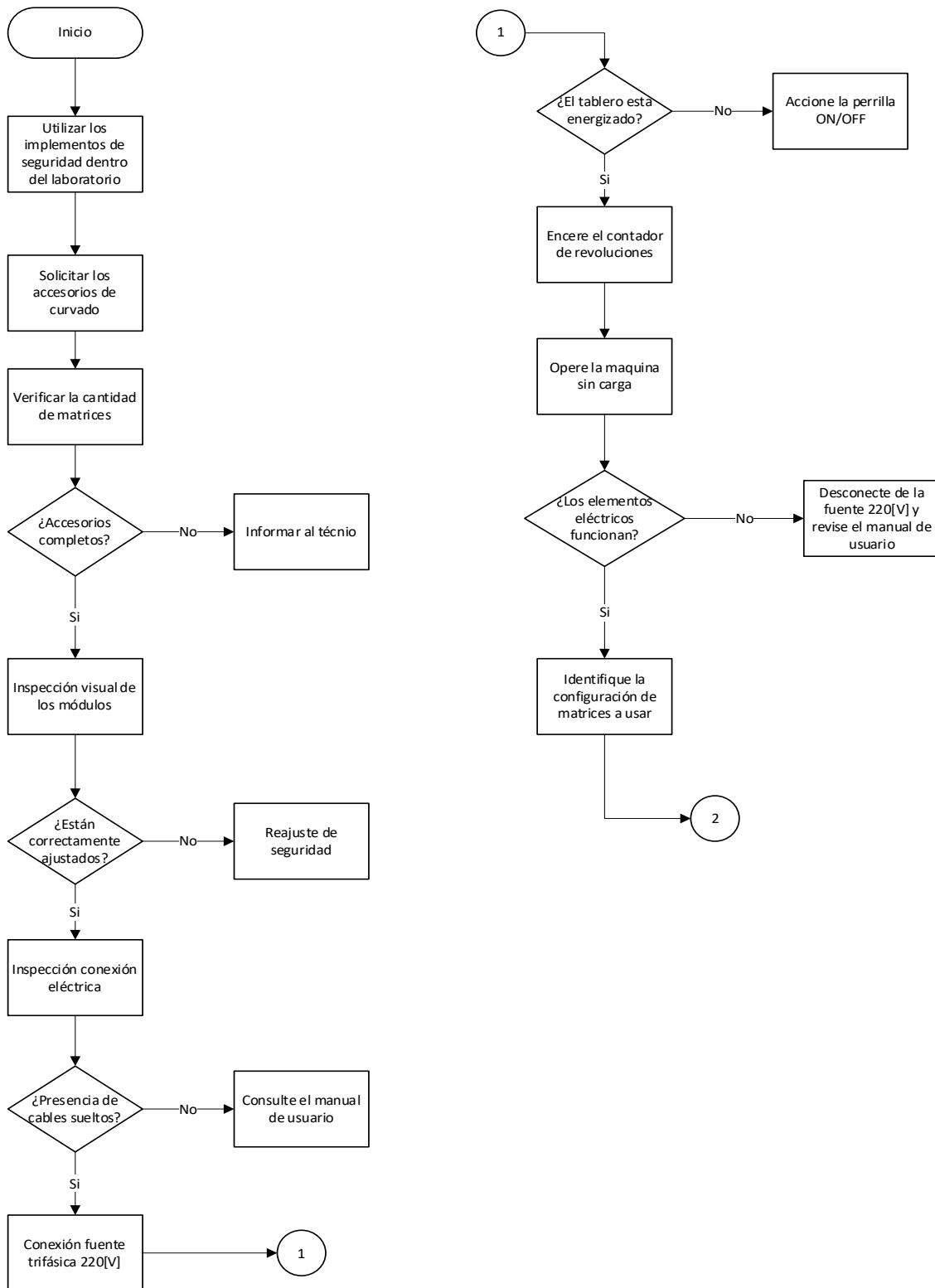
Nota: Desarrollado por el autor

Pruebas de funcionamiento

Se generó un protocolo de pruebas de funcionamiento y operación aprobado por el jefe del laboratorio de procesos de manufactura del DCEM, ver Anexo C - 4, el diagrama de la figura 75, detalla los pasos a seguir para poner en marcha las pruebas de funcionamiento de la máquina prototipo, realizar esta prueba es indispensable para evitar problemas durante la operación de la máquina.

Figura 75:

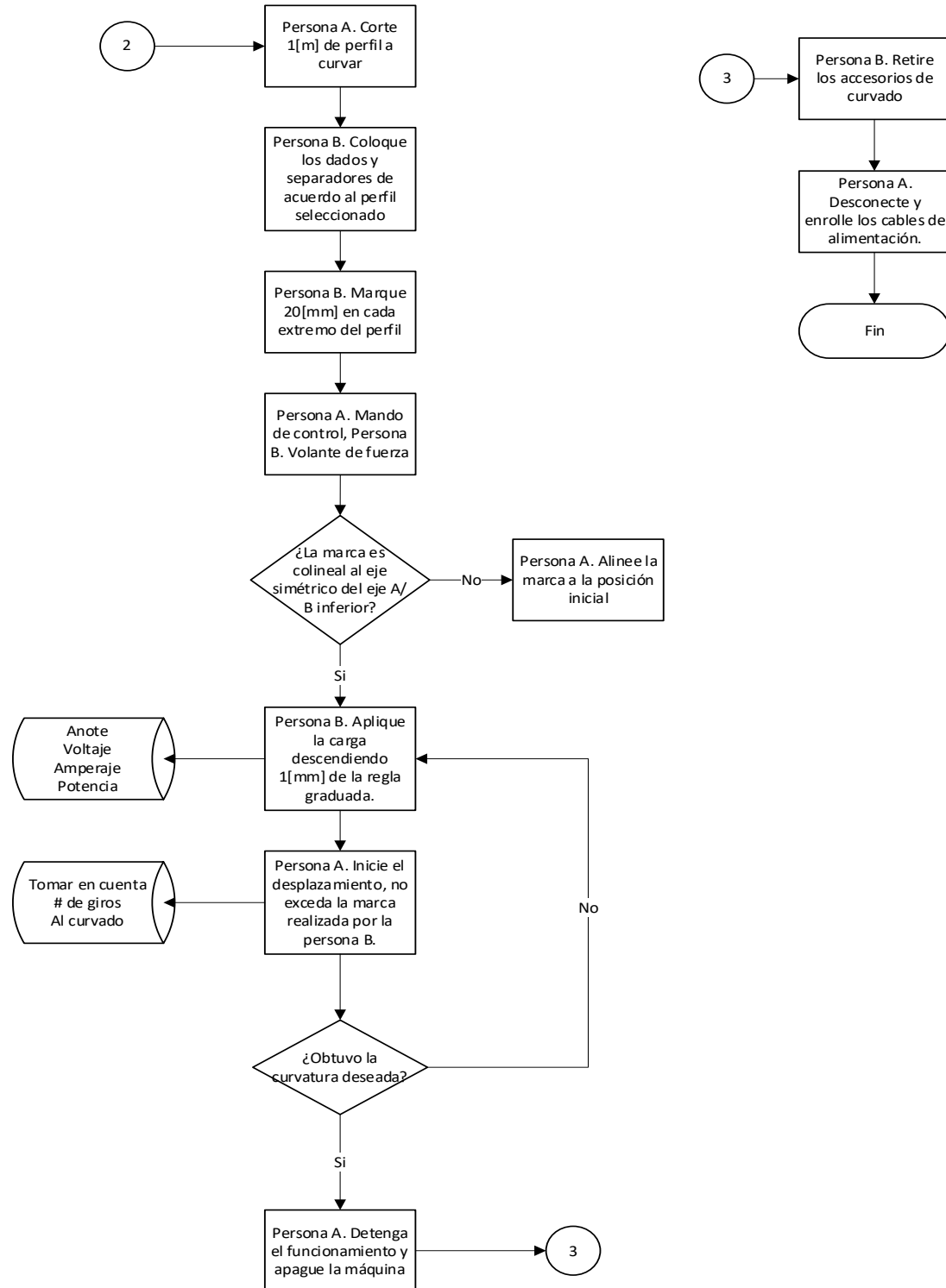
Diagrama previo al arranque y en su funcionamiento



Nota: Desarrollado por el autor

Figura 76.

Diagrama pruebas de operación



Nota: Desarrollado por el autor

En la tabla 47, se observa el *check list* generado para evaluar el correcto funcionamiento de la máquina.

Tabla 47.

Check list prueba de funcionamiento

Parámetro	Estado
Encendido luz piloto	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento botón paro de emergencia	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento botón giro horario del motor	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento botón giro inverso del motor	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento botón de Stop	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento contador de giros	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausencia de vibraciones excesivas	<input checked="" type="checkbox"/>
Temperatura del motor normal	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausencia de fluidos de transmisión	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento botonera mando a distancia	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento Breaker circuito de control	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamiento Breaker circuito de potencia	<input checked="" type="checkbox"/>

Pruebas de operación

El diagrama de la figura 72, detalla los pasos a seguir para ejecutar las pruebas de operación de la máquina prototipo, se han seleccionado los perfiles que detalla la tabla 48, para realizar las pruebas de curvado y la prueba de potencia del motor.

Tabla 48.

Perfiles idóneos pruebas de operación

Perfiles metálicos acero ASTM A36				
Tubo cuadrado	Tubo redondo	Platina	Perfil Tee	Perfil L
15X1,5[mm]	25x2[mm]	25x3[mm]	25x3[mm]	40x3[mm]

En máquinas que poseen una configuración de rodillos triangular, es necesario realizar un precurvado del material, como se muestra en la figura 73, con el fin de encontrar el avance de penetración, este procedimiento se detalla en el protocolo de pruebas Anexo C – 4 y en el diagrama de pruebas figura 76.

Figura 77.

Precurvado perfil metálico



Nota: Desarrollado por el autor

Los perfiles metálicos mencionados en la tabla 48, fueron seleccionados para las matrices de curvado que posee la máquina, se realiza varios ciclos de curvado hasta obtener la geometría deseada, además, se somete la máquina a una sobrecarga de operación aplicando

una fuerza de doblado equivalente a 22487,09[N], para analizar la potencia del motor e identificar problemas en su funcionamiento, ver Tabla 49.

Tabla 49.

Perfiles metálicos curvados

Tubo cuadrado	Tubo redondo	Platina
15X1,5[mm]	25x2[mm]	25x3[mm]
		
Perfil Tee	Perfil L	Sobrecarga
25x3[mm]	40x3[mm]	Tubo cuadrado 50x2[mm]
		

Defectos en el proceso de curvado

Al iniciar el proceso curvado los perfiles no presentan fallas, pero a medida que va aumentando la fuerza de curvado se generan defectos que se detalla en la Tabla 50.

Tabla 50.

Defectos en el proceso de curvado de perfiles metálicos




Defectos al curvado de los perfiles metálicos		
Ralladura	Perdidas de material	Deformaciones
		
Causa/origen del defecto		
Para facilitar el arrastre del material se realizó un moleteado a las matrices inferiores, mientras la fuerza de doblado aumenta genera marcas en su superficie, podemos notar que se imprime la marca del moleteado en el material.	Las matrices de curvado poseen una dureza mayor a los perfiles metálicos del proceso, por ello tiende a refrentar su cara lateral.	Las deformaciones son provocadas por la velocidad de avance en el proceso curvado, esto se debe a que la máquina no cuenta con un regulador de frecuencia que permita disminuir aun más la velocidad de avance.

En la Tabla 51 se detalla los defectos producidos en el proceso de curvado del tubo estructural de 50x2[mm], identificando defectos en el material, la sobrecarga solo se realizo una

sola vez durante 4 ciclos de curvado, puesto que las flechas de rolado así como las matrices no están diseñadas para este perfil.

Tabla 51.

Defecto por sobrecarga de operación

Fase de sobrecarga de trabajo de la máquina perfil cuadrado 50x2[mm]		
Ralladura	Pérdidas de material	Deformaciones
		
<p>Al ejercer una mayor fuerza de doblado, el moleteado favorece el arrastre generando marcas durante su desplazamiento.</p>	<p>La pérdida de material es mayor que en los otros perfiles, la causa principal está en las matrices, ya que no están diseñadas para esas dimensiones de perfil.</p>	<p>Las deformaciones son más evidentes, para perfiles de esas dimensiones se recomienda una velocidad de avance de 5 – 8 [rpm].</p>

Resultados pruebas de operación.

Para verificar el comportamiento de la máquina prototipo, se realizó una prueba de operación exigiendo al máximo sus capacidades, se eligió el perfil cuadrado de 50X2[mm], cuya fuerza de doblado es 22487,09[N] y requiere una potencia de 1.13 [HP], la cual abarca los perfiles de estudio en este proyecto como una fase de sobrecarga, los valores de potencia para los perfiles metálicos que se va a curvar se encuentran detallados, dentro del Anexo A-2, en la Tabla 52, se muestran los datos de.

Condiciones de trabajo

- Avance vertical por pasada: 1 [mm]
- Deformación máxima: 6[mm]
- Numero de pasadas: 6

La potencia de operación en un motor eléctrico de tres fases viene dada por la ecuación:

$$P = \sqrt{3} * nf * n * V * I_{prom} \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde:

n : Relaciona la eficiencia del motor eléctrico.

nf: Coeficiente de funcionamiento

V: Voltaje

I_{prom}: Corriente promedio de línea.

En la tabla 52, se muestra los resultados de voltaje de línea y potencia de operación necesaria para el trabajo de funcionamiento en cada pasada para el perfil cuadrado 50x2[mm].

Tabla 52.

Resultados obtenidos de operación, fase de sobrecarga

VOLTAJE (V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)	CORRIENTE PROMEDIO (A)	Potencia de operación [HP]
220	3,74	4,40	3,44	3,86	1,26
220	4,31	4,59	3,98	4,29	1,40
220	3,89	4,05	3,08	3,67	1,20
220	4,05	4,01	4,29	4,12	1,34
220	4,06	4,3	4,34	4,23	1,38
220	4,23	4,26	4,5	4,33	1,41

Como se puede observar la potencia máxima de operación es de 1,41 [Hp].

En la Tabla 53, se realiza una comparación con la potencia calculada para el perfil cuadrado de 50x2[mm] y la potencia de operación obtenida de manera experimental con las mediciones de intensidad de corriente.

Tabla 53.

Error Potencia teórica vs. Potencia experimental

CORRIENTE PROMEDIO (A)	Potencia de operación [HP]	Potencia calculada [Hp]	%Error
3,86	1,26	1.13	11,5
4,29	1,40	1.13	23,8
3,67	1,20	1.13	6,19
4,12	1,34	1.13	18,5
4,23	1,38	1.13	22,12
4,33	1,41	1.13	24,7

La potencia máxima requerida para realizar el curvado del perfil cuadrado de 50x2[mm] está dentro de los parámetros de diseño considerados para los diferentes módulos de la curvadora, por ende, los perfiles de menor demanda están dentro de los requerimientos de operación.

Nota: Se tomó la decisión de realizar la prueba de sobrecarga tomando un perfil cuadrado, el cual no está en las especificaciones de capacidad de la máquina, con el fin de observar el comportamiento de los elementos mecánicos que componen el prototipo, la máquina pudo soportar la cargas que se generan por el curvado, pero se evidenció una mala calidad en el mismo, esto debido a que las matrices no están diseñadas para este perfil en particular.

Ya que la máquina esta desarrollada en forma modular, se puede realizar una reconfiguración del módulo de curvado, con el fin de adaptarlo para perfiles de mayores dimensiones, tomando en cuenta que el módulo de transmisión y el de soporte estructural pueden manejar estos perfiles sin inconvenientes.

Capítulo V: Análisis Económico y Financiero

El presente proyecto de titulación fue viable económicamente, ya que se estableció un presupuesto para su ejecución, pondremos en consideración como costos directos los materiales y la mano de obra por cada uno de los módulos, y costos indirectos serán considerados rubros por transporte, alimentación, oficina y otros.

Costos directos

Materiales para la construcción.

Establece los rubros destinados a la adquisición de materiales para la fabricación de cada uno de los módulos de la máquina prototipo.

Materiales módulo de curvado

Tabla 54.

Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de curvado

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CURVADO					
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD [unidad]	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]	PROVEEDOR
1	Plancha de acero A36 e=15, (400 [mm] x 350[mm])	2	35,00	70,00	Acería Ambato
2	Plancha de acero A36 e=15, (200 [mm] x 150[mm])	1	15,00	15,00	Acería Ambato
3	Eje acero de transmisión d = 50 [mm] x 1000 [mm]	1	45,00	45,00	Acería Cevallos
4	Eje acero perforado d = 74 [mm] x 30 [mm] x 50 [mm]	1	10,00	10,00	Acería Cevallos
5	Eje acero de transmisión d = 140 [mm] x 40 [mm]	4	17,00	68,00	TecniAceros
6	Eje acero perforado d = 140 [mm] x 76 [mm] x 125 [mm]	1	55,00	55,00	Aceros MG

7	Eje acero de transmisión d = 7/8" x 1000 [mm]	1	8,00	8,00	TecniAceros
8	Eje acero de transmisión d = 83 [mm] x 110 [mm]	1	12,20	12,20	TecniAceros
9	Chaveta 14 [mm] x 14 [mm] x 1120 [mm]	1	8,80	8,80	TecniAceros
10	Eje acero perforado d = 90 [mm] x 50 [mm] x 75 [mm]	1	14,00	14,00	TecniAceros
11	Eje acero de transmisión d = 4" x 15 [mm]	1	4,00	4,00	TecniAceros
12	Eje acero de transmisión d = 4" x 40 [mm]	9	8,50	76,50	Aceros MG
13	Eje acero de transmisión d = 4" x 20 [mm]	3	4,25	12,75	Aceros MG
14	Eje acero perforado d = 95 [mm] x 45 [mm] x 45 [mm]	1	8,75	8,75	TecniAceros
15	Pasadores tubulares	4	0,32	1,28	TecniAceros
16	Chaveta 3/8" x 400 [mm]	1	2,50	2,50	TecniAceros
17	Eje duralón d = 75 [mm] x 200 [mm]	1	14,00	14,00	TecniAceros
18	Eje duralón d = 70 [mm] x 140 [mm]	1	10,80	10,80	Aceros MG
19	Oxicorte	1	45,00	45,00	Servicor
20	Rodamiento FK NJ2208	2	15,50	31,00	RulliValle
21	Rodamiento FK NJ2209	4	17,20	68,80	RulliValle
22	Pernos allen	50	0,25	12,50	Castillo HH
23	Prisioneros 1/8	12	0,15	1,80	Castillo HH
24	Tratamiento térmico Cementado	1	100,00	100,00	Acein

25	Rodamiento axial ZKL	2	14,00	28,00	TecniAceros
Subtotal				723,68	

Materiales módulo de transmisión

Tabla 55.

Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de transmisión

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE TRANSMISIÓN					
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD [unidad]	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]	PROVEEDOR
1	Eje acero de transmisión d = 58 [mm] x 500 [mm]	1	26,25	26,25	Aceros MG
2	Eje acero de transmisión d = 45 [mm] x 300 [mm]	1	9,75	9,75	Aceros MG
3	Chumacera de piso d = 35 [mm] KDF	1	18,00	18,00	TecniAceros
4	Piñón N80, Paso 1" 15 dientes	2	31,00	62,00	Rulivalle
5	Cadena N80, L = 1 [m]	1	25,00	25,00	Aceros Sur
6	Medio candado N80	1	4,00	4,00	Aceros Sur
7	Piñón 40B x 15 T	1	4,60	4,60	Maquinarias Henriquez
8	Piñón 40B x 67 T	1	41,00	41,00	Maquinarias Henriquez
9	Cadena transmisión 1/2", L = 3 [m]	1	19,90	19,90	Maquinarias Henriquez
10	Eje acero de transmisión d = 140" x 20 [mm]	2	10,10	20,20	TecniAceros
11	Eje acero perforado d = 80 [mm] x 40 [mm] x 60 [mm]	1	8,60	8,6	TecniAceros

12	Eje acero perforado d = 65 [mm] x 30 [mm] x 50 [mm]	1	5,60	5,6	TecniAceros
13	Aceite de transmisión 1[lit]	1	14,00	14,00	Aceites EC
Subtotal				258,90	

Materiales módulo estructural de soporte

Tabla 56.

Costos materiales empleados en la fabricación del módulo estructural de soporte

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO ESTRUCTURAL DE SOPORTE					
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD [unidad]	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]	PROVEEDOR
1	Pernos M8	20	0,35	7,00	Aceros MG
2	Pintura 1/8 [lit]	1	8,00	8,00	LatColor
Subtotal				15,00	

Materiales módulo de control

Tabla 57.

Costos materiales empleados en la fabricación del módulo de control

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL					
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD [unidad]	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]	PROVEEDOR
1	Tablero de control eléctrico	1	20,00	20,00	Dms Electric
2	Relé térmico	1	12,00	12,00	Dms Electric
3	Contactores	2	10,00	20,00	Dms Electric

4	Breaker bifásico	1	7,00	7,00	Dms Electric
5	Breaker trifásico	1	9,00	9,00	Dms Electric
6	Selector	1	2,00	2,00	Dms Electric
7	Piloto	1	1,25	1,25	Dms Electric
8	Pulsadores	3	1,50	4,50	Dms Electric
9	Botón paro de emergencia	1	5,50	5,50	Dms Electric
10	Mando a distancia Botonera	1	18,00	18,00	Dms Electric
11	Contador 6 cifras	1	11,35	11,35	Dms Electric
12	Limitador de rodillo	1	13,65	13,65	Dms Electric
13	Enchufe pata de Gallina	1	10,80	10,80	Dms Electric
14	Cable concéntrico 3x12, L = 5 [m]	1	9,60	9,60	Dms Electric
Subtotal				144,65	

Mano de obra

En la ejecución del presente trabajo de titulación, fue indispensable el recurso humano y profesional.

Tabla 58.*Costos mano de obra para la fabricación de la máquina prototipo*

COSTOS DE MANO DE OBRA DEL PROYECTO		
ITEM	TRABAJO	COSTO [USD]
1	Construcción módulo de curvado	500,00
2	Construcción brida y puesta a punto de la caja reductora de velocidades	175,00
3	Construcción soporte auxiliar y puesta a punto del bastidor	125,00
4	Construcción del tablero de control	150,00
5	Mantenimiento del motor eléctrico	10,00
subtotal		960,00

Costos indirectos

Establece los rubros no incluidos en los costos directos, específicamente gastos logísticos en los que incurren los investigadores durante el desarrollo del trabajo de titulación.

Tabla 59.*Costos indirectos del proyecto*

COSTOS INDIRECTOS		
ITEM	DETALLE	COSTO [USD]
1	Alimentación	50,00
2	Transporte	70,00
3	Impresiones e internet	60,00
4	otros	100,00
subtotal		280,00

Inversión total

Determina el gasto total realizado por los proyectistas durante la ejecución de su trabajo de titulación.

Tabla 60.

Inversión total realizada por los proyectistas

INVERSIÓN TOTAL PROYECTO DE TITULACIÓN		
ITEM	DETALLE	COSTO [USD]
1	Materiales construcción módulo de curvado	723,68
2	Materiales construcción módulo de transmisión	258,90
3	Materiales construcción modulo estructural de soporte	15,00
4	Materiales construcción módulo de control	144,65
5	Mano de obra	960,00
6	Costos indirectos	280,00
		Total 2382,23

Para el diseño y construcción de la máquina prototipo curvadora de tubos y perfiles metálicos, se estimó un presupuesto referencial de 1800 dólares (600 dólares por cada estudiante), el cual fue superado debido al fluctuante costo de los materiales de construcción, en especial el acero, por motivos de importación y escases el mismo superó el valor referencial establecido al realizar el análisis de factibilidad económico en el perfil del proyecto, además en un inicio se planteó utilizar la mayor parte de materiales reciclados, lo cual al realizar el diseño fue desestimado, con el fin de asegurar la calidad y seguridad de operación del producto terminado.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se Diseñó y construyó una máquina curvadora de tubos y perfiles metálicos, modular, semiautomática, para el laboratorio de procesos de manufactura del DCEM.
- Establecidas las especificaciones de la máquina, se secciono la misma en cuatro sistemas modulares, curvado, transmisión, estructural de soporte y control.
- Tomando como base las cargas de los elementos constitutivos de la máquina, se diseñó y construyó un soporte capaz de albergar todos los sistemas y subsistemas presentes en el prototipo.
- Se diseñó y construyó el sistema de curvado permitiendo conformar perfil cuadrado 25x25[mm], perfil redondo 25[mm], perfil L 25x3[mm], platina 25x3[mm], varilla maciza cuadrada lisa 25[mm], varilla maciza redonda lisa 25[mm] y perfil T 25x3[mm], perfiles establecidos por el jefe de laboratorio.
- Se diseñó y construyó un sistema de transmisión capaz de generar el torque y la velocidad necesaria para la correcta operación del prototipo.

Recomendaciones

- Se recomienda colocar rodillos enderezadores facilitando el recorrido lineal de perfil metálico, disminuyendo; tiempo de producción, deformación durante el proceso de curvado y el aumento de la longitud del perfil a curvar.
- Al manufacturar piezas de diferentes dimensiones y ensamblarlas, su acople debe ser ideal con el fin de evitar desgaste prematuro en sus componentes mecánicos, como árbol de rolado, mecanismo de desplazamiento que están sometidos a cargas estáticas variables.
- Se debe realizar trabajos de mantenimiento periódico de los módulos para asegurar un

correcto funcionamiento de la máquina curvadora, tales como limpiezas generales y engrasado de sistemas de transmisión de potencia.

- Leer y acatar las disposiciones establecidas en el manual de usuario de la máquina prototipo para evitar daños materiales y físicos.

Trabajos futuros

- Implementar un control electrónico al desplazamiento vertical del árbol superior, con galgas extensiométricas que permitan detectar la deformación permisible del material reduciendo considerablemente los defectos de curvado y pérdida del material.
- Diseñar y construir un juego de matrices de mayor diámetro que permitan realizar más pruebas de laboratorio, para ello se debe mejorar el subsistema de árbol de rolado (SS2), con materiales cuyas propiedades mecánicas sean superiores.
- Implementar un sistema variador de frecuencia con el fin de controlar la velocidad del motor eléctrico, esto permitirá mejorar el proceso de conformado de los perfiles.
- Realizar un estudio de factibilidad en el sistema de transmisión, analizar las horas de trabajo de la máquina, para la implementación de un sistema de lubricación en la transmisión cadenas- catarinas.

Bibliografía

- AISC, A. (1994). ASTM Structural Steel Specifications. En *Manual of Steel Construction* (págs. 20-1993). EE UU: Asociación Latinoamericana del Acero.
- Alacero. (2021). *Curvado de perfiles y tubos*. Obtenido de arquitecturaenacero.org:
<http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/curvado-de-perfiles-y-tubos>
- Arguello. (2021). *Rectificadora Arguello*. Obtenido de
<https://www.findglocal.com/EC/Quito/299583006915544/Rectificadora-Arguello>
- Arismendi, L. A. (2016). ABB Tableros de . En L. A. Arismendi.
- ASTM. (s.f.). Designation: A 36/A 36M-00a. *Standard Specification for Carbon Structural Steel*, 3.
- Ballesteros, M. (2005). Tecnología de proceso y transformación de materiales. Barcelona: Edicions UPC.
- Barriga, B., & Santillan, M. (2020). *Diseño y construcción de una máquina de torsión para ensayos de polímeros*. Riobamba : Escuela Politécnica de Chimborazo.
- Beer, F., & Johnston, E. (2011). *Mechanics of materials*. Houston: Mcgraw-Hill.
- Budynas, R. G., & Nisbett, K. J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8 Ed. ed.). México: McGrawHill.
- Bustamante A., H. D. (2010). *Diseño y cálculo de una máquina curvadora de perfiles para la empresa metalmecánica AGS ingenieros limitada*. Chile: Universidad del Bío-Bío.
 Obtenido de Curva-man.com: <http://www.curva-man.com/curvado.htm>
- Chávez, C. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HIDRÁULICA PARA DOBLAR TUBERÍA REDONDA DE ACERO AL CARBONO DE TRES Y CUATRO PULGADAS CÉDULA 40 CON ÁNGULOS DE 0 A 90°*. Ambato.

- Collado. (20 de Mayo de 2021). *www.collado.com.mx/*. Obtenido de <https://www.collado.com.mx/Views/Procesos/Fabricacion/Rolado>
- Cosmos. (2021). *www.cosmos.com.mx/*. Obtenido de <https://www.cosmos.com.mx/wiki/rolado-bx7b.html>
- Ferregon. (20 de Mayo de 2021). *www.distribuidoraferregon.com/*. Obtenido de <https://www.distribuidoraferregon.com/servicios/rolado-de-perfiles>
- Gangotena, R. (1986). Análisis de doblado con rodillo. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Garcés, E. (2019). *Diseño y simulación de una maquina curvadora de tubos de acero hasta 8 pulgadas SCH40 para la empresa Saurus Ecuador CIA. LTDA*. Sangolquí: UFA ESPE - Facultad de Ingeniería Mecánica.
- García, F. (2019). *Diseño de una máquina roladora para el distrito de Pinchanaki*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Gordo, G., & Piris, M. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educación. S.A.
- Hibbeler, R. C. (2005). *Resistencia de materiales* (10 Ed. ed.). México: Pearson.
- INEN 579. (2013). *Tornillería y requisitos dimensionales*. (pág. 3). Quito: Norma Técnica Ecuatoriana.
- Iza, B. (2007). *Dimensionamiento y construcción de una roladora manual para*. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica, EPN.
- Jaramillo Suárez, H. (2016). *Resistencia de materiales* (Segunda ed.). Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
- Jimenez, C. (2012). *Diseño e implementación de un sistema modular y reconfigurable para el control de calidad de Zippers*. En M. Ricardo.

Lara, E. (2017). *Doc Player* . Obtenido de Doc Player : <https://docplayer.es/20417598-Banco-de-pruebas-de-sistemas-de-transmision-de-potencia-diego-fernando-carvajal-avila-melvin-armando-rojas-galvis.html>

LLive, B., & Klever, I. (2020). *Diseño y construcción de una roladora semiautomática para elementos esbeltos estructurales para la metalmeccanica de san bartolo*. Quito .

Manzano, R., & Jiménez, C. (2012). *Diseño e implementación de un sistema modular y reconfigurable para el control de calidad de Zippers*. Sangolquí.

MIPSA. (2022). *Metales Industriales de Puebla S.A.* Obtenido de <https://www.mipsa.com.mx/procesos/doblez-de-tubo/#titulo-1>

Monar, W. (2013). Conformado de materiales metálicos por deformación plásticas. Quito: EPN.

Nargesa. (2021). *Nargesa*. Obtenido de [nargesa.com/es:
https://www.nargesa.com/es/maquinaria-industrial/curvadoras-o-dobladoras-de-tubos/?gclid=Cj0KCQjw2tCGBhCLARIsABJGmZ7ThclFAP-QyMzGWhXUcHPijWQABjr-eK05Q0IsOIPvevIOz5JUp1saAt67EALw_wcB](https://www.nargesa.com/es/maquinaria-industrial/curvadoras-o-dobladoras-de-tubos/?gclid=Cj0KCQjw2tCGBhCLARIsABJGmZ7ThclFAP-QyMzGWhXUcHPijWQABjr-eK05Q0IsOIPvevIOz5JUp1saAt67EALw_wcB)

Piña, E., & Ojeda, J. (2009). *Evaluación de la Resistencia a la Fatiga del acero AISI 1018 sometido a tratamientos térmicos de Temple y Normalizado*. Universidad de Carabobo: Facultad de ingeniería mecánica.

Rodríguez, P. (2005). *IM - Revista de Ingeniería Mecánica*, 8(2), 51-58. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225118187007>

SKF. (2021). *Fábrica de rodamientos de bola sueca*. Obtenido de <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-rating-life/basic-dynamic-load-rating-c>

Thoman , B. (2021). *Curvadoras de perfiles*. Oberrimsingen-Alemania.

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5ta Ed. ed.). México: McGrawHill.

UMSS. (2015). *Formado de metales y trabajo con lámina metálica*. Obtenido de <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-31.pdf>

Zambrano, G. (2006). *Diseño y construcción de una baroladora para tubo rectangular y redondo para la empresa NOVACERO*. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica, EPN.

Anexos

Anexo A. Memoria de cálculo – Módulo de curvado

Anexo B. Memoria de cálculo – Módulo de transmisión

Anexo C. Memoria de cálculo – Módulo de soporte

Anexo D. Planos de detalle Anexo

Anexo E. Manual de usuario