



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
UPIIZ

“Diseño y construcción de laminadora
reversible para el conformado mecánico
de materiales metálicos en frío”

Trabajo escrito correspondiente a la opción de titulación
curricular

Para obtener el grado de:
Ingeniero Mecatrónico

Presentan:

C. Maria Diaz Letechipia

C. José Luis Letechipia Meza

Asesores:

Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales.

Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes.

M. en I. Umanuel Azazael Hernández González.



Zacatecas, Zac., enero 2020



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS

“Diseño y construcción de laminadora reversible para el conformado mecánico de materiales metálicos en frío”

Trabajo escrito correspondiente a la opción de titulación curricular

Para obtener el grado de:

Ingeniero Mecatrónico

Presentan:

C. María Díaz Letechipia

C. José Luis Letechipia Meza

Asesores:

Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales

Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes

M. en I. Umanel Azazael Hernández González

Revisores:

M. en C. Carlos Daniel Rico Maddujano

M. en I. Carlos Cuevas Cortés



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad los que suscriben Maria Diaz Letechipia y José Luis Letechipía Meza, estudiantes del programa de Ingeniería Mecatrónica, con números de boleta 2015670040 y 2015670090 respectivamente, adscritos a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Diseño y construcción de laminadora reversible para el conformado mecánico de materiales metálicos en frío", en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales e impresos "El Trabajo de Titulación" por un periodo de un año contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindamos de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a enero de 2020.

Atentamente



C. Maria Diaz Letechipia



C. José Luis Letechipia Meza

Dedicatorias

A mis padres Susana Margarita Meza Soto y José Letechipia Ramírez por apoyarme en todo momento y por motivarme a seguir adelante a pesar de todos los obstáculos que se llegaban a presentar.

Jose Luis Letechipia Meza

A mi mamá Guillermina Letechipia Ramírez y mi papá José José Miguel Ángel Díaz Landín por todos sus esfuerzos por apoyarme en mi carrera, por su comprensión y su amor. A mis hermanas por siempre apoyarme e impulsarme a ser mejor persona cada día.

Maria Diaz Letechipia

Agradecimientos

A mis asesores Dr. Miguel Angel Suárez Rosales, M. en I. Umanel Azazael Hernandez González y Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes por brindar su ayuda y conocimiento en este proyecto, por apoyarnos y guiarnos en todo momento.

A los técnicos docentes, por sus consejos y su grande apoyo que nosdieron a lo largo de este proyecto, especialmente a Ing. Addried Samir Moreno Castro, Ing. Jesús Álvarez Montufar y Ing. José Antonio Tenorio Hernández.

A mis compañeros de clase y amigos que me apoyaron y me motivaron en todo momento para seguir adelante en este proyecto, especialmente a Óscar Madrigal Lopez y Víctor Hugo Castro Becerra.

José Luis Letechipia Meza

Un especial agradecimiento a mis asesores que me brindaron todo su apoyo a lo largo de la construcción de este proyecto.

A Josúe Daniel Becerra Márquez y Geovanni Tadeo Huerta Monroy por su apoyo en la realización del proyecto.

Mi más sincero agradecimiento a Talia Deli Peredo Barón, Gilmore Ramírez Martínez, Antonio Moreno Cayetano, Oscar Madrigal Lopez y a todos mis amigos por su apoyo incondicional.

Maria Diaz Letechipia

Resumen

La laminación en frío de los metales es uno de los procesos más importantes del conformado mecánico, su estudio es de vital importancia para el desarrollo e investigación de nuevos materiales. El presente trabajo muestra el diseño y construcción de una laminadora automática para el conformado de materiales metálicos no ferrosos a nivel laboratorio para el desarrollo de prácticas profesionales e investigación.

También se describe una revisión bibliográfica donde se obtuvieron los mecanismos necesarios para el diseño de una laminadora automatizada con todos los requerimientos mecánicos, eléctricos, de control, monitoreo y seguridad adecuados para su funcionamiento.

La laminadora consta de un juego de rodillos que al rotar en su mismo eje en sentidos opuestos, ejercen una presión y un movimiento sobre todo el material, que será deformada plásticamente por el mecanismo y reduciendo el espesor del material. En adición al diseño común se integrará de una interfaz de automatización de la máquina para una fácil operación del proceso.

Palabras clave

Laminadora en frío, Juego de rodillos, Diseño, Automatización

Abstract

The cold rolling of metals is one of the most important mechanical forming processes; its study is of vital importance for the development and research of new materials. The present project aims at the design and construction of a laminator for the shaping of metallic materials at the laboratory level for the development of professional practices and research.

In the present work the design of a laminator and its components are described. The adequate mechanisms to automate the laminator with all the mechanical, electrical, control, monitoring and safety requirements were investigated through an extensive literature review.

The laminator will consist of a set of rollers that when rotated in its same axis towards opposite directions, will exert a pressure and a movement over the material, that will be distorted by the mechanism and will realize a thinning of the plate. In addition, the design will have a machine automation interface for an easy process' operation.

Keywords

Cold rolling mill, Roller kit, Design, Automation

Contenido

Dedicatorias	V
Agradecimientos.....	VI
Resumen.....	VIII
Palabras clave.....	VIII
Abstract.....	IX
Keywords.....	IX
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Justificación.....	3
Capítulo 2. Marco teórico	4
2.1 Antecedentes históricos	4
2.2 Laminado	5
2.2.1 Laminado de perfiles	7
2.2.2 Laminado de anillos.....	7
2.2.3 Laminado de cuerda	8
2.2.4 Laminado de engranes	9
2.2.5 Laminado plano	9
2.2.6 Molinos laminadores.....	10
2.3 Tipos de laminadoras	11
2.3.1 Laminadoras industriales.....	12
2.3.2 Laminadoras manuales para masar o moldear.....	12
2.3.3 Laminadora para joyería.....	13

2.3.4	Componentes de laminadora.....	13
2.3.5	Rodillos de laminación.....	14
2.4	Análisis del proceso de laminado.....	14
2.5	Diseño de ejes para esfuerzo.....	17
2.5.1	Esfuerzos en ejes.....	17
2.5.2	Cojinetes en ejes.....	18
2.5.3	Engranés para transmisión de fuerzas y movimiento.....	18
2.6	Transmisión mecánica.....	19
2.6.1	Transmisión por polea.....	19
2.6.2	Transmisión por cadena.....	19
2.6.3	Transmisión por engrane.....	19
2.6.4	Cople.....	19
2.6.5	Tornillos de desplazamiento vertical.....	20
2.7	Componentes electrónicos y eléctricos.....	21
2.7.1	Tarjetas de adquisición de datos.....	21
2.7.2	Interfaz de usuario.....	23
2.7.3	Motor a pasos.....	24
2.7.4	Motorreductor.....	24
2.8	Estado del arte.....	25
Capítulo 3.	Desarrollo del trabajo.....	27
3.1	Diseño de rodillos de laminación.....	27
3.2	Diseño de sistema de apertura de rodillos.....	37
3.3	Selección de transmisión de potencia.....	39
3.4	Diseño de carcasa.....	42
3.5	Selección de componentes electrónicos.....	44
3.5.1	Tarjeta de desarrollo.....	44

3.6	Diseño de interfaz de usuario.....	44
Capítulo 4. Análisis y validación de resultados.....		46
4.1	Construcción y ensamble mecánico.....	46
4.1.1	Laminadora.....	46
4.1.2	Transmisión mecánica.....	48
4.2	Construcción electrónica – eléctrica.....	51
4.2.1	Circuito principal y de alimentación	51
4.2.2	Circuito de control de sentido de giro de rodillos	54
4.2.3	Control de velocidad de rodillos.....	56
4.2.4	Circuito de control de motor a pasos	57
4.3	Testigos de calibración.....	59
4.4	Interfaz	60
4.5	Sistema integrado	62
4.5.1	Arranque del sistema.....	62
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....		69
5.1	Conclusiones	69
5.2	Recomendaciones	69
5.3	Trabajo a futuro.....	70
Fuentes de consulta		71
Anexos		76
Anexo 1.	Código de cálculo de cortante y momento simples.....	77
Anexo 2.	Análisis estático de rodillo inferior.....	78
Anexo 3.	Análisis estático de rodillo superior.....	80
Anexo 4.	Plano de rodillo superior	82
Anexo 5.	Plano de rodillo inferior	83
Anexo 6.	Plano de tornillo de desplazamiento vertical.....	85

Anexo 7. Plano de base de motor a pasos	87
Anexo 8. Plano de cople.....	89
Anexo 9. Plano de bases de motor principal y laminadora	91
Anexo 10. Plano de caja para circuitería	93
Anexo 11. Plano de mesa de laminadora	95
Anexo 12. Vista explosionada de sistema	97
Anexo 13. Datos de motorreductor	99

Figuras

Figura 2.1. Esquema de varios procesos de laminado plano y de forma	5
Figura 2.2. Perfiles de conformado mecánico.	6
Figura 2.3. Productos hechos con laminado de perfiles.	7
Figura 2.4. Proceso de laminado de anillos.....	8
Figura 2.5. Laminado de cuerdas con dados planos	9
Figura 2.6. Varias configuraciones de molinos de laminación	11
Figura 2.7. Laminadora industrial.	12
Figura 2.8. Laminadora manual para pasta.....	12
Figura 2.9. Laminadora de joyería.....	13
Figura 2.10. Raspberry pi 3 modelo b plus.....	21
Figura 2.11. Tessel 2.....	22
Figura 2.12. Arduino Mega ADK REV3	22
Figura 2.13. Launchpad MSP430.....	23
Figura 2.14. Motor a pasos NEMA 17	24
Figura 2.15. Motorreductor.	24
Figura 2.16. Interfaz de control para laminadora industrial.....	25
Figura 2.17. Laminadora eléctrica para uso artesanal.....	26
Figura 2.18. Laminadora eléctrica	26
Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos simples.....	29
Figura 3.2. Gráfica de esfuerzos simples en rodillo, en SkyCiv	30
Figura 3.3. Gráfica de esfuerzos simples en rodillo, en Scilab	30
Figura 3.4. Gráfica deformación de rodillo, por SkyCiv	30
Figura 3.5. Gráfica deformación de rodillo, por Scilab.....	30
Figura 3.6. Rodillo con reducción de diámetros para el acoplamiento de chumaceras.....	31
Figura 3.7. Rodillo con concentradores de esfuerzos.....	34
Figura 3.8. Rodillo inferior en SolidWorks® Student Edition 2017-2018.....	35
Figura 3.9. Rodillo superior en SolidWorks® Student Edition 2017-2018.....	35
Figura 3.10. Simulación de fuerzas en rodillo superior.....	35

Figura 3.11. Simulación de fuerzas en rodillo inferior.....	36
Figura 3.12. Simulación de rodillo superior a fatiga.....	37
Figura 3.13. Simulación de rodillo inferior a fatiga.....	37
Figura 3.14. Tornillo de desplazamiento vertical.	39
Figura 3.15. Circuito de control de sentido de giro y velocidad de motor	41
Figura 3.16. Simulación de PCB de circuito de control.....	41
Figura 3.17. Carcasa de laminadora.	43
Figura 3.18. Diseño de la laminadora y motor en posición horizontal.	43
Figura 3.19. Propuesta de interfaz gráfica.....	45
Figura 4.1. Engranaje de apertura de rodillos.	46
Figura 4.2. Tornillos de movimiento vertical	47
Figura 4.3. Rodillos de laminadora.....	47
Figura 4.4. Tensor	48
Figura 4.5. Motor acoplado al reductor.....	48
Figura 4.6. Motorreductor y seguro omega de eje.....	49
Figura 4.7. Maquinado de cople para laminadora.	50
Figura 4.8. Machueleado de cople.	50
Figura 4.9. Cople para motorreductor y laminadora.	50
Figura 4.10. Engranajes helicoidales de laminadora.....	51
Figura 4.11. Diagrama de bloques de conexión	52
Figura 4.12. Clavija para conexión a tomacorriente	52
Figura 4.13. Terminales para conexión de alimentación	52
Figura 4.14. Diagrama electrónico de circuito principal.	53
Figura 4.15. Circuito de distribución de alimentación electrónica.....	54
Figura 4.16. Vista 3D de circuito de alimentación electrónica	54
Figura 4.17. PCB del circuito de control de sentido de giro.....	54
Figura 4.18. Vista 3D de circuito de control de giro	54
Figura 4.19. Eliminación del cobre con cloruro férrico.....	55
Figura 4.20. Dimmer AC SCR	56
Figura 4.21. Diseño de la pcb del circuito del motor a pasos	57
Figura 4.22. Vista 3D del circuito del motor a pasos	57

Figura 4.23. Maquinado de la PCB del motor a pasos	58
Figura 4.24. PCB del motor a pasos.....	58
Figura 4.25. Soldado los componentes electrónicos de la PCB	58
Figura 4.26. Circuito impreso del motor a pasos	58
Figura 4.27. Pruebas del motor a pasos con el Arduino.....	59
Figura 4.28. Testigos de calibración 1	59
Figura 4.29 Testigos de calibración 2.....	59
Figura 4.30. Interfaz grafica.....	60
Figura 4.31. Programación de Interfaz grafica	61
Figura 4.32. Programa del control de sentido de giro.....	61
Figura 4.33. Programa del control de velocidad	62
Figura 4.34. Programa del sistema de abertura de los rodillos.....	62
Figura 4.35. Botón de paro de emergencia electrónico, guardamotor, PIA y puerto para Arduino.....	63
Figura 4.36. Circuitería	64
Figura 4.37. Sistema integrado	65
Figura 4.38. Pruebas de laminado.....	66
Figura 4.39. Laminación de 10%.....	66
Figura 4.40. Laminación al 50%.	67
Figura 4.41. Prueba de laminación de tercer probeta.....	68

Tablas

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas típicas de aluminio 1050	27
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del Plomo.....	28
Tabla 3.3. Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramientas.	32
Tabla 3.4. Pruebas de dureza de acero al manganeso	32
Tabla 3.5. Típicas propiedades mecánicas longitudinales de acero H11	33
Tabla 3.6. Comparación de motores a pasos.....	38
Tabla 3.7. Comparación de motores para rodillos.....	40
Tabla 3.8. Comparación de tarjetas para uso en interfaz gráfica.	44

Capítulo 1. Introducción

La laminadora es una máquina que reduce el espesor (o modifica la sección transversal) de una pieza larga mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos. A este proceso se le denomina laminación [2].

Existen principalmente 2 tipos de laminado:

- Laminado en caliente: se realiza cuando el material se encuentra a una temperatura encima de la de recristalización.
- Laminado en frío: se realiza por debajo de la temperatura de recristalización.

Hay una gran variedad de diseños de laminadoras que se adecuan al nivel de trabajo que van a realizar, algunos ejemplos son:

- Laminadora industrial
- Laminadora manual
- Laminadora de joyería

Los principales componentes que conforman una laminadora son:

- Rodillos
- Rodamientos
- Mecanismo de ajuste
- Carcasa estructural
- Fuente de potencia

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo general*

Diseñar y construir una laminadora tipo joyero escala laboratorio para el conformado mecánico en frío para materiales metálicos no ferrosos, en la cual se pueda llevar una supervisión controlada de la velocidad y presión que ejercen los rodillos laminadores, para reducir el grosor de las piezas que se procesan en la laminadora.

1.1.2 *Objetivos específicos*

1. Diseñar una laminadora para el conformado mecánico en frío de materiales metálicos no ferrosos.
2. Diseñar transmisiones de potencia para el movimiento de mecanismos involucrados en la laminación.
3. Diseñar una interfaz de supervisión controlada para el operador de la laminadora, que permita leer y modificar datos del estado de operación de los rodillos.
4. Hacer testigos para calibración de rodillos.
5. Construir y ensamblar las partes diseñadas para el funcionamiento de laminadora de tipo para joyería en frío.

1.2 Justificación

El presente trabajo plantea el diseño y construcción de una laminadora para el conformado mecánico en frío a escala laboratorio para materiales dúctiles no ferrosos. Actualmente, existe la necesidad de una laminadora para el estudio de materiales metálicos no ferrosos, en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas (UPIIZ), con el objetivo del desarrollo de prácticas de mecanismos de deformación, recristalización, extracción, deformación, anisotropía del material e isotropía del material; en las carreras de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Metalúrgica. Además, la implementación ayudaría a la generación de nuevos estudios en torno a los materiales metálicos no ferrosos, en la unidad académica.

Al existir una falta de equipo necesario para que los alumnos, maestros y comunidad Politécnica en la UPIIZ en general, realicen prácticas de metalurgia mecánica, se planteó diseñar la laminadora en frío para así contribuir a un mejor aprendizaje y conocimiento del comportamiento de los metales frente a las fuerzas o cargas que se les aplican en un momento dado, con ayuda del uso de esta máquina.

Adaptar la laminadora para que el operador la maneje de una manera más sencilla, y pueda llevar un control en sus prácticas. Para una mejor anotación y comprensión de los datos que varían de dicho proceso, es una de las necesidades que también se quieren satisfacer al realizar este proyecto, dado que así resultaría más amigable la obtención de la información de los procesos realizados para su uso en cálculos o datos de los estudios implicados para la laminación de materiales no ferrosos metálicos, así como la realización del conformado de una forma más segura para el operador.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Antecedentes históricos

El laminado de oro y plata por medios manuales data del siglo XIV. Leonardo da Vinci diseñó uno de los primeros molinos de laminación en 1480, pero es dudoso que su modelo se haya construido alguna vez. Alrededor del año 1600 se practicaba el laminado del plomo y del estaño en molinos manuales. Alrededor de 1700, el hierro ya se laminaba en caliente en Alemania, Bélgica, Francia, Inglaterra y Suecia. Estos molinos se usaron para hacer lámina a partir de barras de hierro. Antes de esta época, los únicos molinos laminadores que existían en las acerías eran molinos ranuradores, pares de rodillos opuestos con collares (discos cortantes) que cortaban el hierro y el acero en tiras angostas para hacer clavos y productos similares. Los molinos ranuradores no estaban diseñados para reducir el espesor del metal.

La práctica moderna de laminado data de 1783, cuando se expidió en Inglaterra una patente para un proceso que producía barras de hierro usando rodillos acanalados. La Revolución Industrial creó una tremenda demanda de productos de hierro y acero, estimulando el desarrollo de la laminación. El primer molino que laminaba rieles para ferrocarril se inició en Inglaterra en 1820. Las primeras vigas en "I" se laminaron en Francia en 1849. Además, el tamaño y la capacidad de los molinos de laminado plano se incrementaron de manera drástica durante este periodo. El laminado es un proceso que requiere una fuente muy grande de potencia. Hasta el siglo XVIII se usaron las ruedas accionadas por agua para mover los molinos de laminación. Las máquinas de vapor incrementaron la capacidad de estos molinos de laminación hasta poco después de 1900, cuando los motores eléctricos remplazaron al vapor [1].

2.2 Laminado

El laminado es el proceso de reducir el espesor (o modificar la sección transversal) de una pieza larga mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos, como se muestra en la figura 2.1. La operación básica es el laminado plano o laminado simple, donde los productos laminados son la placa plana (superior a 6 mm o 1/4 in de espesor) y la hoja (menor a 6 mm de espesor) [2].

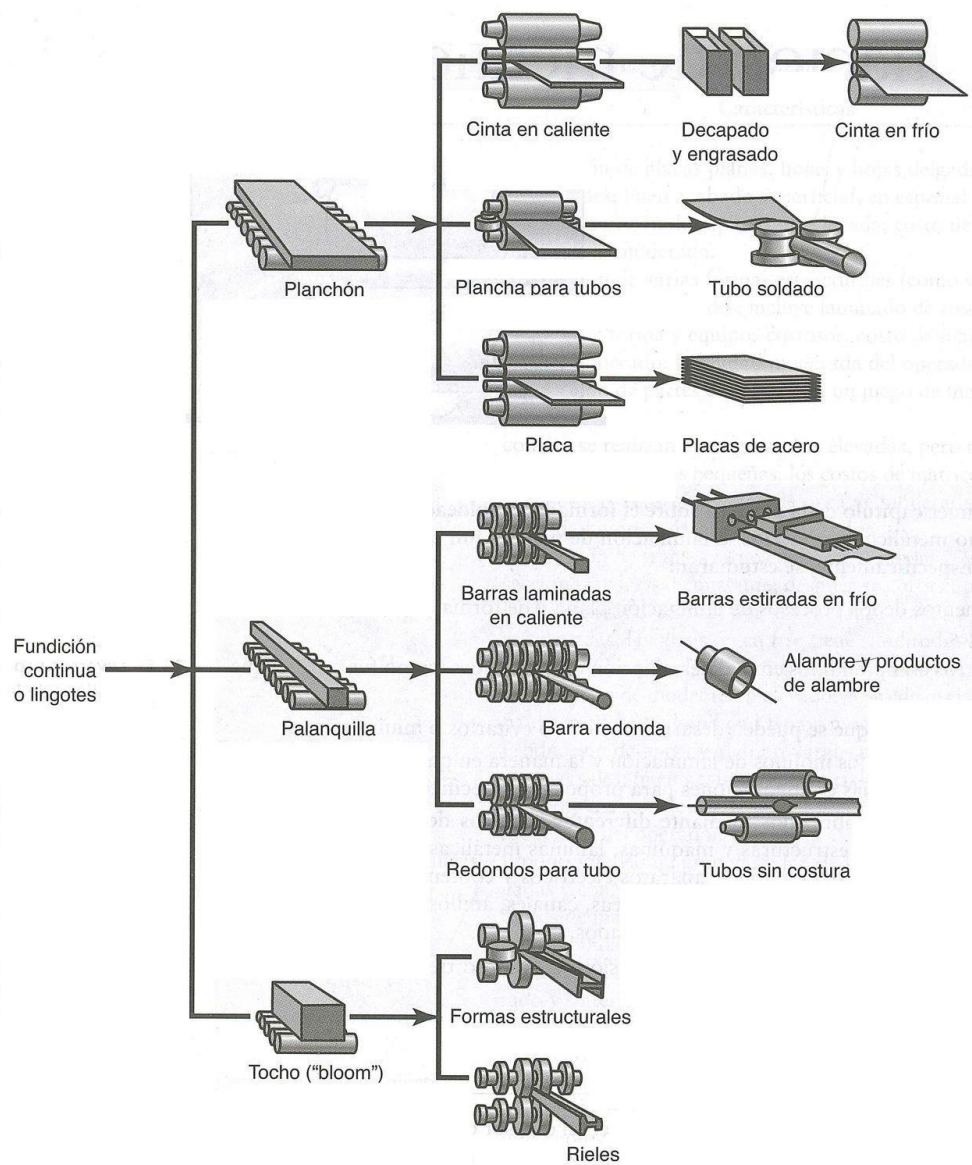


Figura 2.1. Esquema de varios procesos de laminado plano y de forma [2].

Existen principalmente dos tipos de laminado: laminado en caliente, y laminado en frío.

La laminación en caliente se realiza cuando el material se encuentra a una temperatura encima de la de recristalización, que es a la cual los granos de la microestructura comienzan a transformarse en nuevos granos refinados. Por lo anterior cualquier deformación durante el proceso de compresión bajo los rodillos da como resultado la recristalización de los granos.

El laminado en frío se realiza por debajo de la temperatura de recristalización, este laminado tiene un acabado superficial mejor que el laminado en caliente además de mejores tolerancias dimensionales y mejores propiedades mecánicas debidas al endurecimiento por deformación.

La laminación en frío permite tener un control sobre la deformación plástica, pues es posible medir el endurecimiento por deformación teniendo en cuenta el concepto de trabajo en frío [1-2].

Otra característica importante del proceso de laminado es que el metal laminado fluye en dirección normal a la fuerza de compresión aplicada. En el proceso de conformado mecánico por laminación, la fricción entre los rodillos y el metal produce también fuerzas de compresión y dislocaciones en la dirección perpendicular a la de compresión aplicada [3].

En la figura 2.2 se muestran varios ejemplos de perfiles de conformado mecánico.



Figura 2.2. Perfiles de conformado mecánico [3].

2.2.1 Laminado de perfiles

Los rodillos formadores son más complicados; y el material inicial, de forma generalmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final.

El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama diseño de pases de laminación. Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción [1].

En la figura 2.3 se muestran ejemplos de laminados de perfil.

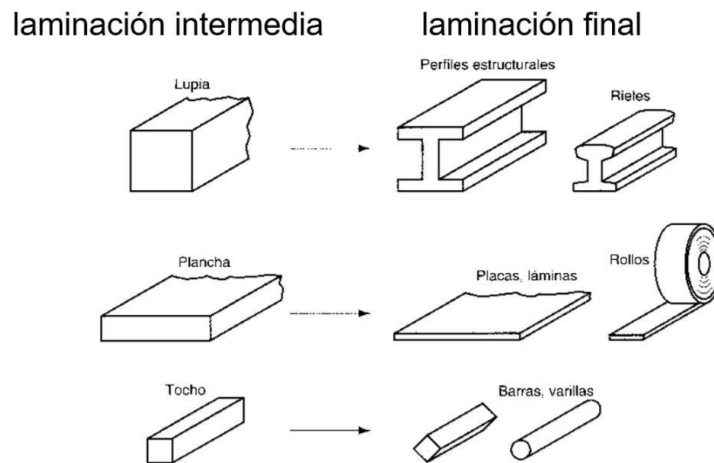


Figura 2.3. Productos hechos con laminado de perfiles [1].

2.2.2 Laminado de anillos

El laminado de anillos es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor. La figura 2.4 ilustra el proceso antes y después. Conforme el anillo de paredes gruesas se comprime, el material se alarga, ocasionando que el diámetro del anillo se agrande. El laminado de anillos se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños.

Las aplicaciones de laminado de anillos incluyen collares para rodamientos de bolas y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias. Las paredes de los anillos no se limitan a secciones rectangulares, el proceso permite la laminación de formas más complejas. Las ventajas del laminado de anillos sobre otros métodos para fabricar las mismas partes son: el ahorro de materias primas, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío [1].

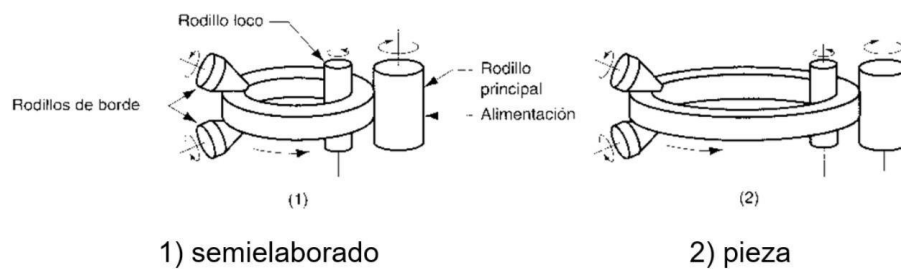


Figura 2.4. Proceso de laminado de anillos [1].

2.2.3 Laminado de cuerda

El laminado de cuerdas se usa para formar cuerdas en partes cilíndricas, mediante su laminación entre dos dados. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con cuerdas externas (pernos y tornillos, por ejemplo). El proceso competidor es el maquinado de cuerdas. La mayoría de las operaciones de laminación de cuerdas se realizan por trabajo en frío utilizando máquinas laminadoras de cuerdas. Estas máquinas están equipadas con dados especiales que determinan el tamaño y forma de la cuerda. En la figura 2.5 se muestran dados de dos tipos: 1) dados planos que se mueven alternativamente entre sí. 2) dados redondos, que giran relativamente entre sí para lograr la acción de laminado.

Las velocidades de producción en el laminado de cuerdas pueden ser muy altas, su capacidad alcanza hasta 8 partes por segundo para pernos y tornillos pequeños. Pero la velocidad no es la única ventaja con respecto al maquinado,

existen otras como son: 1) mejor utilización del material, 2) cuerdas más fuertes debido al endurecimiento por trabajo, 3) superficies más lisas, 4) mejor resistencia a la fatiga debido a los esfuerzos por compresión que se introducen durante el laminado [1].

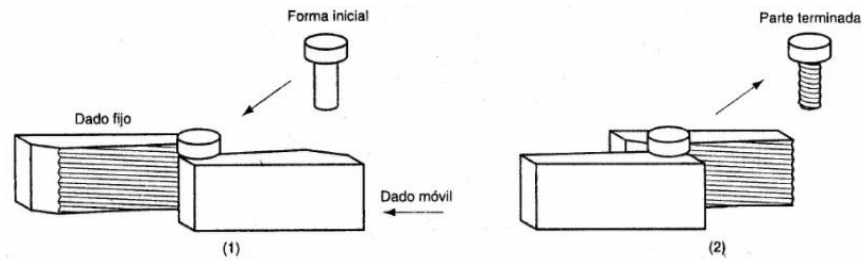


Figura 2.5. Laminado de cuerdas con dados planos: (1) inicio del ciclo y (2) fin del ciclo [1].

2.2.4 Laminado de engranes

Laminado de engranes es un proceso de formado en frío que produce ciertos engranes. La industria automotriz es un importante usuario de estos productos. La instalación para el laminado de engranes es similar al laminado de cuerdas, excepto que las características de deformación de los cilindros o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en el caso de engranes helicoidales) en lugar de la espiral del laminado de cuerdas. Las ventajas del laminado de engranes - comparadas con el maquinado - son similares a las ventajas en el laminado de cuerdas: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menos desperdicio de material [1].

2.2.5 Laminado plano

El laminado plano consiste en reducir el espesor de una tira con espesor inicial (h_o) a un espesor final (h_f) por medio de un par de rodillos en rotación movidos a través de su propia flecha. La velocidad de la tira incrementa su valor de entrada V_o a través del espacio de laminación, de la misma manera que el fluido se ve obligado a moverse más rápido al pasar por un canal convergente, la velocidad

máxima de la tira es a la salida del espacio de laminación (V_f). Existe un punto a lo largo del tramo de contacto conocido como punto neutro o de no deslizamiento en donde la velocidad de la tira es la misma que la del rodillo [2].

Los rodillos aplican presión sobre el material para poder reducir el espesor, por el cual se necesita una fuerza perpendicular al arco de contacto, o perpendicular al plano de la lámina [1-2].

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajos, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En el laminado la fricción ayuda a que el material fluya a través de los rodillos [4].

2.2.6 Molinos laminadores

El molino de laminación básico se denomina de dos rodillos. Los rodillos en estos molinos tienen diámetros que van de 0.6 a 1.4 m. La configuración de dos rodillos puede ser reversible o no reversible. En el molino no reversible los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo siempre pasa a través del mismo lado. El molino reversible permite la rotación de los rodillos en ambas direcciones, de manera que la placa puede pasar a través de cualquier dirección. Esto permite una serie de reducciones que se hacen a través de este juego de rodillos, pasando simplemente la placa varias veces desde direcciones opuestas. La desventaja de la configuración reversible es el momento angular significativo debido a la rotación de grandes rodillos, y los problemas técnicos asociados a la reversibilidad de la dirección.

En la figura 2.6 se ilustran algunos arreglos alternativos. En la configuración de tres rodillos, figura 2.6-b, hay tres rodillos en una columna vertical y la dirección de rotación de cada rodillo permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede pasar el material de trabajo en cualquier dirección, ya sea elevando y/o bajando la tira después de cada paso. El equipo en un molino de tres rodillos se vuelve más complicado debido al mecanismo elevador que se necesita para elevar o bajar el material de trabajo.

Al reducir el diámetro de los rodillos se ganan algunas ventajas. La longitud de contacto entre los rodillos y el trabajo se reduce con un menor radio de los rodillos y esto conduce a fuerzas más bajas, menor momento de torsión, y menor potencia. En los molinos de cuatro rodillos se usan dos rodillos de diámetro menor para hacer contacto con el trabajo y dos rodillos detrás como respaldo, como se muestra en la figura 2.6-c. Debido a las altas fuerzas de laminado, los rodillos menores podrían desviarse elásticamente con el paso de la laminación, sí no fuera por los rodillos más grandes de respaldo que los soportan. Otra configuración que permite el uso de rodillos menores contra el trabajo es el molino en conjunto o racimo, figura 2.6-d [1].

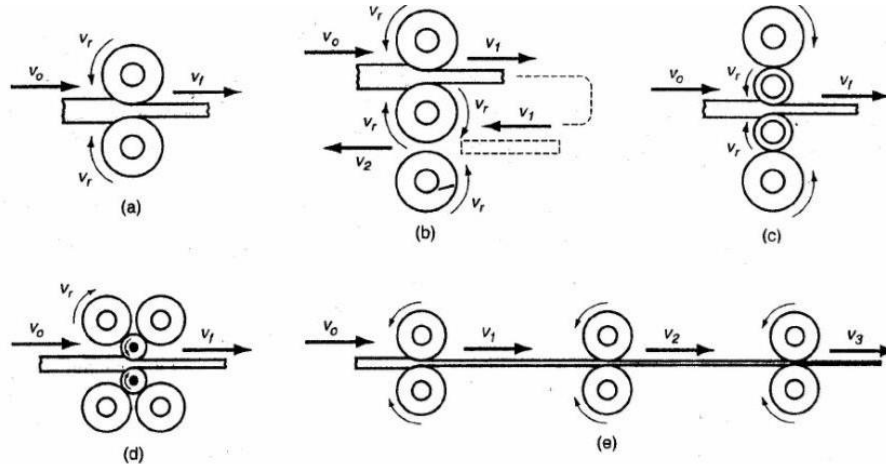


Figura 2.6. Varias configuraciones de molinos de laminación, (a) dos rodillos, (b) tres rodillos, (c) cuatro rodillos, (d) molino en conjunto y (e) molino de rodillos en tándem [1].

2.3 Tipos de laminadoras

Existen diferentes diseños de laminadoras que se han modificado para facilitar la tarea de lo que van a laminar. Algunos de los diseños más sobresalientes son:

- Laminadoras Industriales
- Laminadoras manuales para masar o moldear
- Laminadoras para joyería

2.3.1 Laminadoras industriales

Son las más grandes (figura 2.7) y suelen maquinar mucho material para todo tipo de uso industrial como plásticos, vidrios, metales, etc.



Figura 2.7. Laminadora industrial [5].

2.3.2 Laminadoras manuales para masar o moldear

Estas laminadoras se usan para moldear y amasar el pan o la pasta de manera más rápida, son más pequeñas que las industriales y cuentan con una manivela para su manejo como se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Laminadora manual para pasta [6].

2.3.3 Laminadora para joyería

Esta laminadora al igual que la anterior, es más pequeña que la industrial y suelen tener manivelas, la diferencia es que esta tiene un mecanismo en la parte superior de la máquina que permite cambiar la presión que ejercen los rodillos sobre la pieza como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9. Laminadora de joyería [7].

2.3.4 Componentes de laminadora

Los principales componentes de una laminadora, denominado usualmente un *castillo de laminación*, son:

- Los rodillos de laminación. Estos comprimen el material que se encuentra entre ellos.
- Los rodamientos. También denominados chumaceras o baleros se asientan en los cuellos de los rodillos.
- Mecanismo de ajuste de la abertura entre rodillos. Sirve para ajustar la abertura deseada entre los rodillos y para ajustar la altura de la línea del paso.

- La carcasa. Contiene los componentes del castillo de laminación y resiste la carga de laminación aplicada, es una estructura muy sólida y rígida.
- Fuente de potencia. Transfiere la potencia a los rodillos y controla su velocidad.

Las fuerzas necesarias para efectuar la laminación son muy elevadas, por eso se requiere un motor de potencia muy grande [8].

Los rodillos de la laminadora constan de la parte de trabajo, que se denomina cuerpo del rodillo, al que se unen por ambos extremos los cuellos que sirven para sujetar el rodillo en los cojinetes del puente. Los cuellos tienen unos salientes especiales que se denominan cabezales motores. Por medio de acoplamientos y husillos a través de los cabezales motores se realiza la unión de los rodillos con la caja de engranaje [9].

2.3.5 Rodillos de laminación

Los rodillos de laminación son la herramienta principal del proceso de laminación, son los que ejercen el movimiento y las fuerzas que actúan en el proceso.

Un rodillo de laminación es un cilindro de metal, generalmente aleado, que desde luego deberá ser más duro que el metal que se lamina para que pueda ser resistente al desgaste. El material deberá de ser homogéneo, es decir, sin discontinuidades (porosidades, grietas, inclusiones, etc.) para que resista los esfuerzos para los que fue diseñado. Deberá de soportar las temperaturas a las que está sometido durante el proceso, suponiendo desde luego un buen enfriamiento [10].

2.4 Análisis del proceso de laminado

El proceso de laminación es el más utilizado en la deformación de lingotes. En la primera etapa de laminación se cierran los huecos producidos por sopladuras o contracción y se destruye la estructura de fundición. Debido a que la estructura

colada es muy frágil, en los primeros pasos de laminación la reducción en espesor no debe ser muy grande. Los pasos intermedios de laminación se diseñan para producir una reducción de espesor mayor; en el último paso de laminación la reducción es aún mayor [8].

La laminación en frío le otorga al producto laminado más resistencia y dureza y mejor acabado superficial. Sin embargo, requiere mayor energía (debido al incremento de la resistencia del material a temperatura ambiente) y da como resultado un producto con propiedades anisotrópicas (por la orientación preferida o fibrilado mecánico) [2].

Para realizar el laminado es necesario un ángulo de contacto que sea menor al ángulo de fricción que para los rodillos lisos no se toma de mayor de 20°. También en la laminación interviene el término de magnitud de reducción absoluta ($H-h$), está se obtiene de la diferencia de espesores inicial y la disminución. La relación entre el diámetro de los rodillos, ángulo de contacto (α) y la magnitud de reducción absoluta se expresa por la fórmula 2-1:

$$H - h = D[1 - \cos(\alpha)] \quad (2-1)$$

es decir, la magnitud de reducción absoluta se eleva con el aumento del diámetro de los rodillos D , y para una misma magnitud de reducción a medida que disminuye el diámetro de los rodillos, aumenta el ángulo de contacto [9].

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo a lo largo de un arco de contacto (α). Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial v_r . Esta velocidad es mayor que la velocidad de entrada v_o y menor que la velocidad de salida v_f . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad del trabajo iguala la velocidad del rodillo. Este punto se llama punto de no deslizamiento o punto neutro [1].

Se puede calcular la fuerza de laminado por medio de la ecuación 2-2:

$$F = S_y w L \quad (2-2)$$

Donde:

F es la fuerza de laminado en N,

S_y es el esfuerzo a la fluencia promedio del material en MPa,

w es el ancho del material de trabajo que se está laminando en mm y

L es la longitud de contacto entre el rodillo y el trabajo en mm [1].

La longitud de contacto está dada por

$$L = \alpha R \quad (2-3)$$

o bien puede aproximarse mediante

$$L = \sqrt{R(H-h)} \quad (2-4)$$

El momento de torsión de cada rodillo es

$$T = 0.5FL \quad (2-5)$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $2N$, donde N es la velocidad rotacional del rodillo, por lo tanto, la potencia en ambos rodillos es

$$P = 2\pi NFL \quad (2-6)$$

siendo las unidades de potencia en Joules [1].

O bien

$$P = \frac{2\pi NFL}{60,000} = \frac{4\pi NT}{60,000} \text{ kW} \quad (2-7)$$

para S. I [2].

El ángulo de mordida se puede determinar por medio de

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{H-h}{R}} \quad (2-8)$$

Una aproximación sencilla para el cálculo de la fuerza de laminación es considerar la presión de laminación igual al esfuerzo de cedencia S_y , del material laminado [8].

Por tanto, dado que el mayor de los esfuerzos involucrados es ordinariamente el cortante por flexión se puede considerar que

$$\sigma_f < \frac{S_y}{n} \quad (2-9)$$

donde σ es el esfuerzo cortante al que está sometido el sistema y n el factor de seguridad.

2.5 Diseño de ejes para esfuerzo

Los requisitos básicos de los materiales para los rodillos son la resistencia a la cedencia y la resistencia al desgaste. Los materiales más comunes son el hierro fundido y variados tipos de acero, aunque también se utilizan carburos de tungsteno para rodillos de diámetro pequeño. Los rodillos de acero forjado tienen mayor resistencia, rigidez y tenacidad que los rodillos de hierro fundido, pero son más costosos. Los rodillos para laminado en frío se rectifican para un acabado fino, también se pulen para aplicaciones especiales. Los rodillos fabricados para laminado en frío no deben utilizarse para laminado en caliente, ya que se pueden agrietar por los ciclos térmicos. También debe recordarse que el módulo elástico del rodillo influye en la deflexión y compresión de los rodillos [2].

No es necesario evaluar los esfuerzos en todos los puntos de un eje; es suficiente hacerlo en unas cuantas ubicaciones potencialmente críticas. Por lo general, estas ubicaciones se localizan en la superficie exterior, en ubicaciones axiales donde el momento flexionante es grande, donde el par de torsión está presente y donde existen concentraciones de esfuerzo [11].

2.5.1 Esfuerzos en ejes

Los esfuerzos de flexión, torsión o axiales pueden estar presentes tanto en medios como alternantes. En general, las cargas axiales son comparativamente muy pequeñas en ubicaciones críticas donde dominan la flexión y la torsión, por lo que pueden dejarse fuera de las siguientes ecuaciones. Los esfuerzos fluctuantes debidos a la flexión y la torsión en ejes solidos con sección transversal redonda están dados por

$$\sigma_f = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (2-10)$$

$$\tau_T = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2-11)$$

$$\tau_V = \frac{4V}{3\pi d^2} \quad (2-12)$$

Donde:

M es el momento flexionante,

T es el par de torsión

V es el esfuerzo cortante [11].

2.5.2 Cojinetes en ejes

Los cojinetes se fabrican para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje puras o una combinación de ellas [11].

Algunos tipos de cojinetes son: de bolas (para cargas radiales y axiales), de rodillos (para cargas radiales), de fricción (para cargas radiales o axiales en un sentido).

En la laminación, la carga transmitida a cada cojinete, superior e inferior de un castillo de rodillos es igual a la mitad de la fuerza separadora (debido a que cada rodillo se apoya en dos cojinetes), siempre que el material que está siendo laminado esté centrado en los rodillos. Los cojinetes pueden ser baleros o chumaceras [8].

Para conocer las resistencias mecánicas de estos es necesario recurrir a su catálogo del fabricante.

2.5.3 Engranajes para transmisión de fuerzas y movimiento

Los principales tipos de engranes son: rectos, helicoidales, cónicos y sinfín. Normalmente los engranes son seleccionados desde catálogos de fabricantes los cuales nos otorgan especificaciones de caballos de fuerza y rpm que pueden soportar, y algunos catálogos más especializados dan las dimensiones de los componentes en otros apartados.

En dichos catálogos se otorgan formulas o tablas para la selección de sus componentes con esos proveedores. Los catálogos tienen sus particularidades en la forma de selección, es por eso que para la selección de engranes es necesario recurrir a su catálogo correspondiente.

2.6 Transmisión mecánica

2.6.1 *Transmisión por polea*

El sistema más simple para la transmisión del movimiento es la polea. Ésta es básicamente un disco de material con un comportamiento plástico importante, y un acabado que le proporciona un elevado índice de rozamiento. La transmisión angular-lineal es, junto con la pie-suelo, el mecanismo de movimiento que mejor conocemos [12].

2.6.2 *Transmisión por cadena*

Este tipo de transmisiones trabajan de acuerdo con el principio de engranaje. En las transmisiones por cadena que tienen el esquema de transmisión flexible abierta, el lugar de las poleas lo ocupan ruedas dentadas, a las que se llama ruedas de estrella o simplemente estrella y en vez de la cinta flexible tenemos una cadena [12].

2.6.3 *Transmisión por engrane*

La principal ventaja de las transmisiones por engranajes mediante ruedas dentadas es la gran exactitud en la relación de transmisión que se puede alcanzar frente a otros tipos de transmisiones, lo que permite, entre otras aplicaciones, su uso en maquinaria de precisión [13].

2.6.4 *Cople*

Los coples y conexiones con extremos ranurados son la parte medular para la unión de tuberías y accesorios en una gran variedad de sistemas. Los coples se han diseñado para proveer juntas o uniones concéntricas, que se adaptan a las

fuerzas internas o externas de presión o vacío, vibraciones, contracciones o expansiones, etc [14].

2.6.5 Tornillos de desplazamiento vertical

Las roscas de los tornillos son hélices que permiten el desplazamiento longitudinal de un tornillo, cuando éste es girado. Hay dos tipos de roscas normalizadas para tornillos la UNS (Unified National Standard) y la ISO (métricas).

Las roscas UNS tienen tres series estándar de familias de paso de rosca:

- Roscas bastas (UNC). Se usan en aplicaciones en las que se requiera el montaje y desmontaje fácil o frecuente. No son adecuados donde exista vibración considerable.
- Roscas finas (UNF). Son adecuadas cuando existe vibración. Los agujeros roscados en donde se unen no deben de ser materiales frágiles.
- Roscas extrafinas (UNFE). Son de paso muy pequeño y son particularmente utilizadas en equipos aeronáuticos.

La longitud roscada de los tornillos UNS está dada por

$$L_r = 2d + 0.25 \text{ in} \quad (2-13)$$

si la longitud total, L_{rs} , es menor o igual a 6 in , donde d es el diámetro mayor del roscado [15].

El esfuerzo axial σ en el cuerpo del tornillo debido a la carga a la que se encuentra sometido el que se

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (2-14)$$

donde d_r es el diámetro menor del roscado [11].

El factor de seguridad del tornillo se da por [15]:

$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma}{S_y} \quad (2-15)$$

2.7 Componentes electrónicos y eléctricos

2.7.1 Tarjetas de adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC's estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable [16].

A continuación, se muestran algunos sistemas que pueden ser empleados como tarjetas de adquisición de datos.

2.7.1.1 Raspberry

Dimensiones de placa de 8.5 por 5.3 cm, en el modelo B, el cual está caracterizado de la siguiente manera:

En su corazón nos encontramos con un chip integrado Broadcom BCM2835, que contiene un procesador ARM11 con varias frecuencias de funcionamiento y la posibilidad de subirla (overclocking) hasta 1 GHz sin perder la garantía, un procesador gráfico VideoCore IV, y distintas cantidades de memoria RAM. Las últimas Raspberry Pi cuentan con 512 MB de memoria [17].



Figura 2.10. Raspberry pi 3 modelo b plus [18].

2.7.1.2 Tessel 2

También conocido como Technical.io, es un proyecto de Hardware *Open-Source* que consiste en un microcontrolador, del estilo a Arduino, pero programable con JavaScript. Además de la placa y la MicroSD, se han desarrollado diferentes módulos para añadirle más funcionalidad como son el acelerómetro, un chip RFID, audio, bluetooth, un servomotor, relés, y sensores de temperatura y humedad. Puede programarse directamente desde un USB, sin necesidad de utilizar cables ethernet, WiFi, teclados externos y pantallas externas [19].



Figura 2.11. Tessel 2 [20].

2.7.1.3 Arduino Mega ADK

El Arduino mega ADK es un tablero de microcontroladores basado en el ATmega2560. Tiene una interfaz de host USB para conectarse con teléfonos basados en Android, el IC MAX3421e. Tiene 54 pines de entrada / salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, una toma de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio [21].



Figura 2.12. Arduino Mega ADK REV3 [22].

2.7.1.4 Launchpad MSP430

La tarjeta dispone de un socket de 20 pines que puede albergar uno de los dos microcontroladores de 16 bits de la familia MSP430 que vienen con el kit, dispone además de una conexión USB que permite descargar y depurar programas directamente en el hardware. Dispone de dos botones (uno de ellos es de reset), un par de leds y unos headers (hembra/macho) para poder acceder a los pines del microcontrolador [23].



Figura 2.13. Launchpad MSP430 [24].

2.7.2 Interfaz de usuario

Es un programa informático que actúa utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar las acciones y la información disponibles en la interfaz. Su función principal consiste en facilitar un entorno visual sencillo que permita la comunicación con el sistema operativo de un ordenador [25].

Puede haber distintos tipos de Interfaz de usuario como mecánica, electrónica y digital.

2.7.3 Motor a pasos

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control [26].



Figura 2.14. Motor a pasos NEMA 17 [27].

2.7.4 Motorreductor

Un motorreductor es un reductor de velocidad con un motor directamente conectado. Un motorreductor no utiliza un adaptador campana y cople para montar el motor, el motor es de hecho parte del reductor de velocidad [28].



Figura 2.15. Motorreductor [29].

2.8 Estado del arte

En la actualidad existen diferentes tipos de automatizados o controles para las laminadoras industriales para una mejor comunicación entre el operador y la máquina con el objetivo de así reducir costos y aumentar la producción y la seguridad en los procesos de laminado.

Existen algunas empresas que se dedican a la creación de interfaces para el control de los equipos industriales, tal como RUSULLA [10], la cual se encarga de realizar simuladores y programas de control de las máquinas de las empresas como se muestra en la figura 2.16, para que así puedan tener un mejor control en los procesos de formado de sus productos.

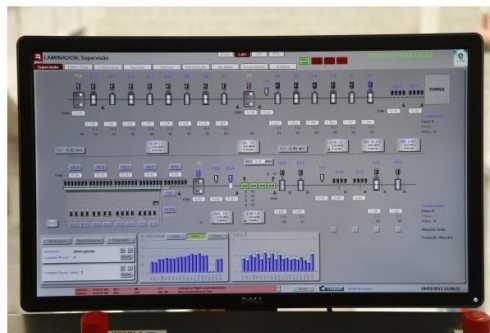


Figura 2.16. Interfaz de control para laminadora industrial [10].

Para el diseño de una laminadora de tipo experimental a escala de laboratorio se considerarán diseños de laminadoras de uso artesanal como la que se muestra en la figura 2.17. En estas laminadoras su control está limitado a una etapa de potencia por la velocidad de rotación de los rodillos, la cual varía el operador de la máquina por medio de velocidades estandarizadas por el fabricante, o bien, por medio de perillas para su manipulación.



Figura 2.17. Laminadora eléctrica para uso artesanal [30].

Estos controles resultan ser muy básicos y prácticos ya que se puede saber con exactitud, o tener una noción clara, de la velocidad y fuerza que ejercen los rodillos sobre las placas. Además, el control de la fuerza necesaria para incrementar la presión de los rodillos contra la pieza de trabajo es de forma manual, es decir, sin actuadores que realicen el trabajo por el operador como lo mostrado en la figura 2.18.



Figura 2.18. Laminadora eléctrica para uso artesanal [31].

En la actualidad las laminadoras con el mayor control sobre sus operaciones resultan ser de tipo industrial. Para la realización de pruebas metalmecánicas en laboratorios pequeños, se utilizan laminadoras de uso artesanal y mediante suposiciones o cálculos externos de la máquina se obtienen los datos necesarios de adquisición del formado mecánico.

Capítulo 3. Desarrollo del trabajo

3.1 Diseño de rodillos de laminación

Suponiendo los parámetros mecánicos máximos a los cuales se podría someter la laminadora para el formado de materiales, se adquieren los siguientes datos y cálculos:

La resistencia elástica de los rodillos deberá ser mayor a los esfuerzos de fluencia de los materiales que se van a ensayar, aleaciones de aluminio 1050, por citar algún ejemplo con:

$$S_y = 20 \text{ MPa}$$

según la información que se obtiene de la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas típicas (a temperatura ambiente de 20°C) de aluminio 1050 [32].

Estado	Espesor mm	Características a la tracción				Dureza		
		Carga de rotura MPa	Límite elástico MPa	Alargamiento 5.65%	Límite a la fatiga MPa	Resistencia a la cizalladura MPa	Brinell (HB)	Vickers
F	3,2<e<150	65		20			20	
0-H11111	0,35<e<12	65-95	20	42	50	60	21	20
H14	0,35<e<12	100-140	105	10	70	70	35	36
H24	0,35<e<6	100-140	105	10	70	70	35	36
H16	0,35<e<3,2	120-160	120	7			39	
H26	0,35<e<3,2	120-160	120	7			39	
H18	0,35<e<3,2	150	140	6	100	85	43	44

Dado que el espesor máximo de aluminio para laminado es propuesto de 1 cm, entonces tenemos que:

$$w = 0.01 \text{ m}$$

Utilizando la ecuación 2-2 se tiene:

$$F = S_y w L = S_y w (R \propto)$$

entonces se supone un ángulo máximo de mordida de:

$$\alpha = 8^\circ = 0.1396 \text{ rad}$$

y suponemos el radio de los rodillos de:

$$R = 0.025 \text{ m}$$

dado que la fuerza está dada a largo de la placa a laminar tenemos:

$$F = 698 \text{ N}$$

sería la fuerza puntual máxima que será distribuida a los rodillos en una distancia de 50 mm que es el ancho de la placa más grande propuesta para soportar en el diseño, por tanto

$$F = 698 \text{ N/mm}$$

También teniendo en cuenta que la altura más grande propuesta a laminar es de 3 cm se propone un material más blando como lo es el Plomo cuya resistencia a la fluencia es

$$S_y = 5.5 \text{ MPa}$$

según la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del Plomo [33].

Estado del Material	Moldeado de arena	Policristalino
Dureza – Mohs	1.5	
Límite elástico (MPa)	5.5	
Módulo de tracción (GPa)		16.1
Módulo volumétrico (GPa)		45.8
Relación de Poisson		0.44
Resistencia a la tracción (MPa)	12	

Al igual que el aluminio se utiliza el ángulo de mordida, el radio de los rodillos supuesto y modificamos los nuevos parámetros del esfuerzo a la fluencia y la altura de la lámina, lo cual nos da que la fuerza aplicada sobre los rodillos es de

$$F = 575.85 \text{ N/mm}$$

Teniendo en cuenta ambas fuerzas se utiliza la de mayor magnitud para el cálculo de los rodillos para asegurar mayor factor de seguridad.

Para la obtención de las reacciones en el eje se calcula:

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0; \quad R_{Ay} + R_{By} - [698 \text{ N/mm}(50 \text{ mm})] = 0$$

$$\curvearrow^+ \sum M_A = 0; \quad R_{By}(115 \text{ mm}) - 34.9 \text{ KN}(57.5 \text{ mm}) = 0$$

$$\Rightarrow \quad R_{By} = R_{Ay} = 17.45 \text{ KN}$$

Utilizando la ecuación 2-5 para la obtención del torque en los rodillos se calcula:

$$T = 0.5(698 \text{ N/mm})[0.1396(25 \text{ mm})] = 1.218 \text{ N} \cdot \text{m/mm}$$

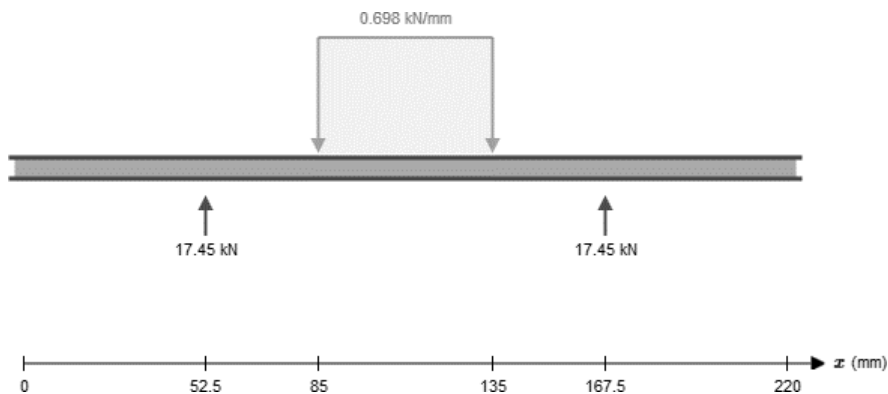


Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos simples.

Para la visualización de los esfuerzos en los rodillos se proponen lugares para los soportes y se propone aplicar la fuerza distribuida en el centro del rodillo, la simulación de diagrama de cuerpo libre para esfuerzos en vigas está hecha en una calculadora en línea, la cuál es la versión gratuita de SkyCiv para análisis estructural como se muestra en la figura 3.1.

Tomando los valores máximos de los esfuerzos involucrados podemos calcular con las ecuaciones 2-10, 2-11 y 2-12:

$$\tau_v = \frac{4(17.45 \text{ KN})}{3[\pi(25 \text{ mm})^2]} = 11.8496 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{32(785.25 \text{ kN} \cdot \text{mm})}{\pi(25 \text{ mm})^3} = 511.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_T = \frac{16(60.9 \text{ N} \cdot \text{m})}{\pi(25 \text{ mm})^3} = 19.85 \text{ MPa}$$

Dado que tenemos esfuerzos flexionantes y cortantes, se muestran a continuación las gráficas de estos esfuerzos en dos formatos, el primero está dado por el uso de la herramienta de versión gratuita de SkyCiv (como se muestra en la figura 3.2 y la figura 3.4) y la segunda está dada por la implementación de código en Scilab (anexo 1) para el cálculo de los esfuerzos sin concentradores (figura 3.3 y figura 3.5).

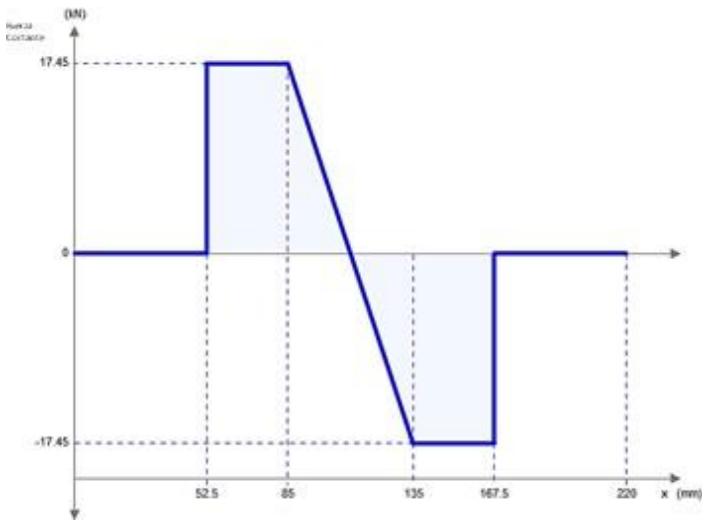


Figura 3.2. Gráfica de esfuerzos simples en rodillo, en SkyCiv.

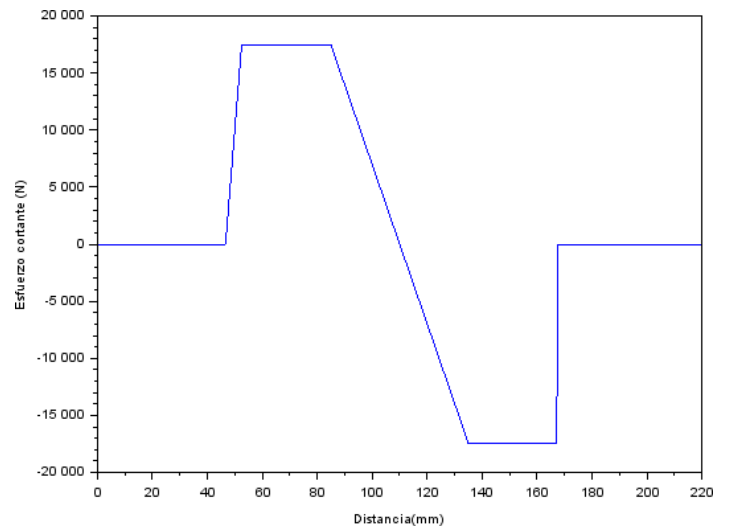


Figura 3.3. Gráfica de esfuerzos simples en rodillo, en Scilab.

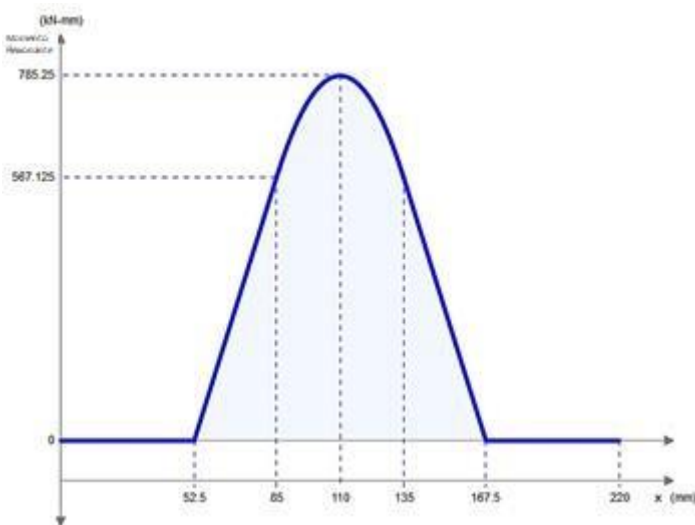


Figura 3.4. Gráfica de deformación de rodillo, por SkyCiv.

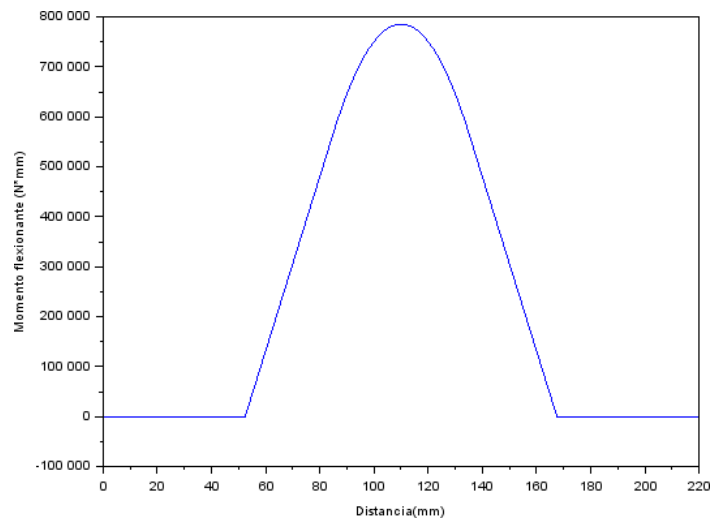


Figura 3.5. Gráfica de deformación de rodillo, por Scilab.

Dado también que el eje necesita sujeción se determina que debe de tener por lo menos las tres diferencias de diámetro, el primer diámetro ya propuesto es el que hará el proceso de laminado y estará en contacto con el material a formar, el segundo cambio de diámetro esta dado para la sujeción y rodamientos de los ejes, y el tercer cambio es para la transmisión de potencia junto con el movimiento a los rodillos.



Figura 3.6. Rodillo con reducción de diámetros para el acoplamiento de chumaceras.

Para poder determinar el tamaño de los diámetros en los rodillos es necesario proponer un factor de seguridad para trabajar, utilizando la ecuación 2-9 podemos despejar el valor mínimo necesario de resistencia a la fluencia del material de los rodillos y así poder proponer los nuevos radios. Para el factor de seguridad se propone de 2 para tener un mayor rango de resistencia de los rodillos.

$$n\sigma_f < S_y \therefore 2(511.9 \text{ MPa}) < S_y$$

$$1,023.8 \text{ MPa} < S_y$$

Con el objetivo de elegir el material de los rodillos se hace parte de una tabla comparativa de materiales de grado herramienta como se muestra en la tabla 3.3. Debido también a la facilidad de adquisición del material se seleccionó de primera instancia un acero H11, ya que cumple con las características que necesita para un fácil maquinado para la futura rectificación de los rodillos, una tenacidad alta para soportar los esfuerzos involucrados en el formado del metal y una alta resistencia al ablandamiento para respetar el factor de seguridad propuesto anteriormente.

Tabla 3.3. Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramientas [2].

Denominación AISI	Resistencia a la descarburización	Resistencia al agrietamiento	Dureza aproximada (HRC)	Maquinabilidad	Tenacidad	Resistencia al ablandamiento	Resistencia al desgaste
M2	Media	Media	60 - 65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T1	Alta	Alta	60 - 65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T5	Baja	Media	60 - 65	Media	Baja	La más alta	Muy alta
H11, 12, 13	Media	La más alta	38 - 55	Media a alta	Muy alta	Alta	Media
A2	Media	La más alta	57 - 62	Media	Media	Alta	Alta
A9	Media	La más alta	35 - 56	Media	Alta	Alta	Media a alta
D2	Media	La más alta	54 - 61	Baja	Baja	Alta	Alta a muy alta
D3	Media	Alta	54 - 61	Baja	Baja	Alta	Muy alta
H21	Media	Alta	36 - 54	Media	Alta	Alta	Media a alta
H26	Media	Alta	23 - 58	Media	Media	Muy alta	Alta
P20	Alta	Alta	28 - 37	Media a alta	Alta	Baja	Baja a media
P21	Alta	La más alta	30 - 40	Media	Media	Media	Media
W1, W2	La más alta	Media	50 - 64	La más alta	Alta	Baja	Baja a media

Debido a la necesidad de saber los valores comerciales de resistencia del acero H11 se adquirieron un par de rodillos de laminadora y se comprobó su composición por medio de varias pruebas, una de ellas fue la prueba de chispa del material con una pulidora en el laboratorio de pesados 1 en la UPIIZ y la prueba de dureza con un durómetro del laboratorio de Metalúrgica en la UPIIZ. De la prueba de dureza se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Pruebas de dureza de acero al manganeso.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dureza (HL) ± 001	792	786	768	740	768	763	790	768	778	776

El promedio de las pruebas es de $772.9 \cong 773 HL^1$. Para poder determinar la dureza del material u obtener sus valores comerciales es necesario hacer una conversión de unidades de dureza. Se realiza las conversiones de dureza obteniendo $773 HL = 56 HRC^2 = 625 HV^3 = 595 HBS^4$ [34]. Teniendo esto se determina, en base a la tabla 3.5 que el esfuerzo de cedencia del material comercial H11 es de $1,675 MPa$, cuyo valor es mayor al factor de seguridad multiplicado por el esfuerzo cortante involucrado en los rodillos de laminación.

Tabla 3.5. Típicas propiedades mecánicas longitudinales de acero H11 [35].

Temperatura de templado		Esfuerzo a la tensión		Esfuerzo de cedencia		Elongación en 50 mm,	Reducción en área,	Energía de impacto		Dureza, HRC
°C	°F	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%	%	J	Ft(lbf)	
510	950	2120	308	1710	248	5.9	29.5	13.6	10.0	56.5
540	1000	2005	291	1675	243	9.6	30.6	21.0	15.5	56.0
565	1050	1855	269	1565	227	11.0	34.5	26.4	19.5	52.0
595	1100	1540	223	1320	192	13.1	39.3	31.2	23.0	45.0
650	1200	1060	154	855	124	14.1	41.2	40.0	29.5	33.0
705	1300	940	136	700	101	16.4	42.2	90.6	66.8	29.0

A fin de hacer una iteración de los concentradores de esfuerzos al mismo tiempo que se propone la reducción de diámetro se determinan los modos de sujeción de los componentes en la reducción de los diámetros. En vista de que los engranes estarán al final de los ejes, se propone un cuñero en la última reducción de diámetros para poder transmitir la fuerza sin tener el factor de derrape de los elementos, además, se puede mantener dentro del diámetro poniendo un tornillo y su arandela para el caso en que el engrane se mueva de forma axial por algún golpe a la máquina. Dado que no son fuerzas grandes a las que se somete el tornillo y la arandela para mantener el engrane en su sitio, se propone el uso de tornillos de valor comercial.

¹ HL: Hardness Leeb.

² HRC: Hardness Rockwell C.

³ HV: Hardness Vickers.

⁴ HBS: Hardness Brinell Steel Ball.

En el caso de los cojinetes del eje, por el uso no continuo que se le dará a la laminadora, se proponen bujes, o cojinetes de fricción, los cuales no contienen partes móviles y sirven sólo de apoyo además de que evitan el desgaste de los puntos en los que están localizados. Para minimizar las pérdidas producidas por el rozamiento se usará un lubricante entre las piezas (aceite).

Dado que los rodillos necesitan un sistema de apertura se propone un ranurado en los extremos de la primera reducción de diámetro de estos debido a que en ese punto sólo se apoyan en los bujes y no existe otro concentrador de esfuerzo que comprometa ese diámetro, además para no afectar la resistencia del diámetro mayor que interviene directamente en el laminado, pero que también no limite la rotación del eje o interfiera con los engranes. Por todo esto se propone un diseño como el de la figura 3.7.



Figura 3.7. Rodillo con concentradores de esfuerzos (a) Piñón, (b) Tensor, (c) Chumacera (d) Laminación.

Sabiendo que los dos rodillos tendrán la misma resistencia, pero diferentes características debido a que no es necesaria la misma geometría en ambos se define que el rodillo inferior tendrá la geometría como se muestra en la figura 3.8 y el rodillo superior no contará con el extremo derecho para engrane, como se muestra en la figura 3.9, debido a que la transmisión de movimiento y potencia se propone en el extremo izquierdo, lo cual nos otorga más espacio para los demás componentes de la laminadora.

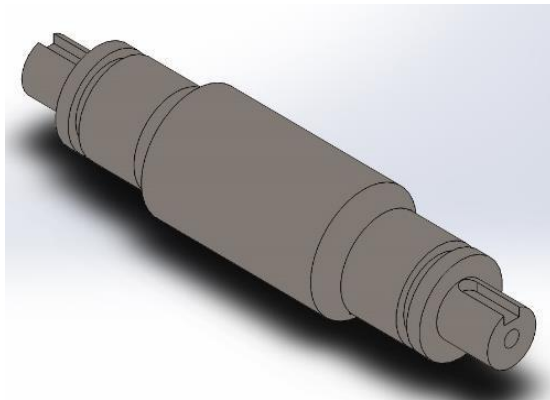


Figura 3.8. Rodillo inferior en SolidWorks® Student Edition 2017-2018.

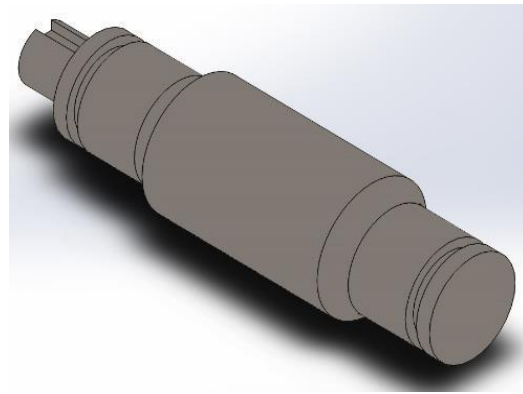


Figura 3.9. Rodillo superior en SolidWorks® Student Edition 2017-2018.

Utilizando SolidWorks® Student Edition 2017-2018, se pudo simular un análisis estático (figura 3.10 y figura 3.11) y un análisis a fatiga (figura 3.12 y figura 3.13) para obtener la deformación y resistencia de los rodillos con iteraciones de geometría y se obtuvo que el diseño que soportaba como se propone en los cálculos anteriores con los concentradores de esfuerzos ya integrados es el que se muestran.

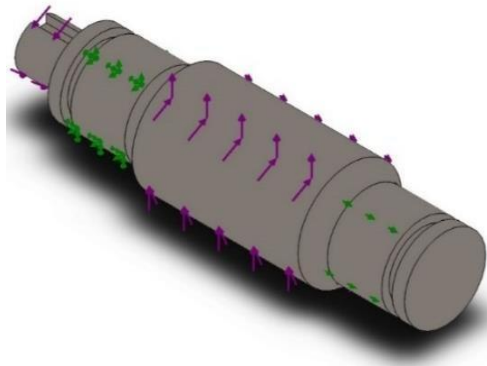


Figura 3.10. Simulación de fuerzas en rodillo superior.

Las fuerzas que se simulan para poder determinar la geometría válida de diseño del rodillo inferior para la laminadora, tal como se muestran en la figura 3.11, son de izquierda a derecha: la torsión del motor para permitir la laminación de la placa, el rodamiento del eje, en la parte media (o superficie de trabajo) del rodillo se tiene las fuerzas de la lámina al rodillo, es decir, la fuerza de laminación y el torque

de respuesta del motor, debido a que en esa superficie está dado el contraste del torque del motor y de la lámina así dando el empotramiento del torque para su simulación, y la última fuerza es el segundo rodamiento del eje.

Las fuerzas simuladas en el rodillo superior (figura 3.10) son de izquierda a derecha: el torque transmitido por el movimiento del rodillo inferior, el primer rodamiento, al igual que el rodillo inferior en la superficie de trabajo se presenta el torque que provoca la laminación junto a la fuerza en el rodillo, por último, tenemos el segundo rodamiento del eje.

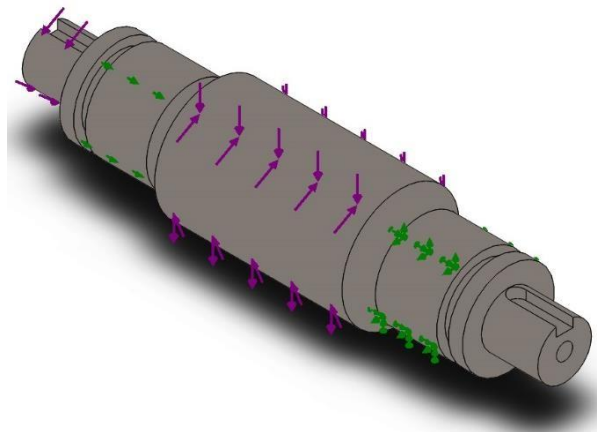


Figura 3.11. Simulación de fuerzas en rodillo inferior.

Los resultados completos del análisis estático de los rodillos inferior y superior se encuentran en el anexo 2 y 3 respectivamente, dejando como datos resaltables el factor de seguridad de 8 y 7.3 respectivamente, mostrando así que los rodillos soportan las cargas de laminación y dando el modelo como válido.

Las simulaciones de fatiga se realizaron para corroborar el número de ciclos a los cuales los rodillos pueden fallar en uso continuo de las fuerzas analizadas de forma estática.

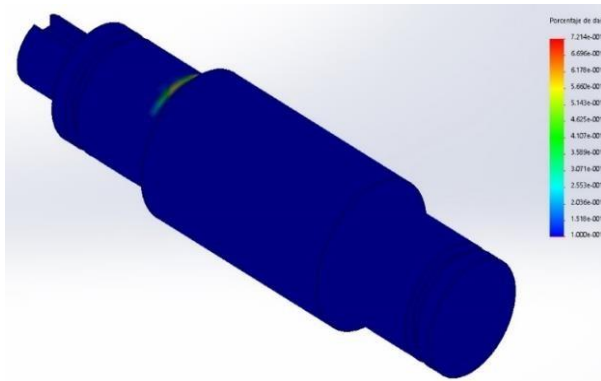


Figura 3.12. Simulación de rodillo superior a fatiga.

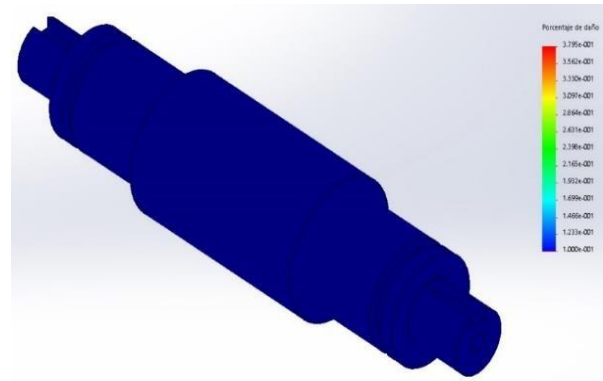


Figura 3.13. Simulación de rodillo inferior a fatiga.

De las simulaciones a fatiga se pudo rescatar la vida a ciclos de los rodillos inferior y superior, las cuales son de 2.635×10^5 *ciclos* y 1.386×10^5 *ciclos* respectivamente. Tomando en cuenta que no se someterán a velocidades altas se puede definir como vida útil alta. Los resultados de las simulaciones de los rodillos superior e inferior se encuentran en los anexos 3 y 2, respectivamente.

Los planos de geometría están en el anexo 4 y 5.

3.2 Diseño de sistema de apertura de rodillos

Para el sistema de apertura se define un sistema conformado por un par de tornillos de desplazamiento vertical en los rodamientos del rodillo superior para contrarrestar la fuerza en los rodamientos por la laminación y mantener fijo el rodillo en la posición deseada para el conformado del material, además de una sincronización con un motor a pasos para la automatización de la apertura de los rodillos, ambos sistemas estarán sincronizados, de manera que trabajen de forma simultánea para no agregar más esfuerzos a la laminadora.

Tabla 3.6. Comparación de motores a pasos.

Motor a pasos	Resolución, °	Torque, kg*cm	Corriente, A/fase	Voltaje, V	Precio, MXN
4 hilos 42BYGHM809	0.9	4	1.7	3	600
6 hilos 57BYGH420	1.8	9	2	3	673
NEMA 17	1.8	3.17	1.2	4	550

Se selecciona el motor a pasos de 4 hilos descrito en la tabla 3.6, debido a que el toque necesario es aproximadamente 2.25 kg*cm ya que el motor solo se utilizará para el control de apertura de los rodillos, lo cual se define como que la fuerza sometida al motor es el peso del rodillo superior; el motor seleccionado también cuenta con más pasos por revolución gracias a su resolución, lo cual nos permite manejar medidas más pequeñas de apertura en los rodillos para así permitir una mejor variación de ángulos de mordida en la laminación.

También para el sistema de apertura es necesario un par de tornillos de desplazamiento vertical para poder mantener el rodillo superior en su lugar contrarrestando el esfuerzo de empuje que genera la laminación en los rodamientos, por tanto, es necesario que los tornillos de desplazamiento vertical soporten las fuerzas de reacción calculadas en la sección 3.1, en cada rodamiento superior.

Se calcula el esfuerzo axial al que estará sometido debido a que el cambio de apertura se hará sin cargas aplicadas a los rodillos, por tanto, no hay un esfuerzo de torsión para elevar o bajar cargas. Se propone utilizar rosca UNF, debido a que su ángulo de rosca es a 60°, lo cual facilita su maquinado. También se propone un diámetro mayor de 19.05 mm debido a que es un valor nominal y es una medida estándar de barras cilíndricas de casi todos los metales.

El diámetro menor por estandarización del UNF es de 16.988 mm [15].

Con esos datos para calcular el esfuerzo axial al que se somete el tornillo de desplazamiento vertical se hace uso de la ecuación 2-14:

$$\sigma = \frac{4(17.45KN)}{\pi(0.016988m)^2} = 76.988 MPa$$

La longitud de roscado se da por la ecuación 2-13:

$$L_r = 2(19.05 mm) + 6.35 = 44.45 mm$$

Proponiendo un factor de seguridad de 1, para que el diseño del elemento sea a vida infinita, podemos determinar la resistencia a la fluencia mínima necesaria del material del tornillo utilizando la ecuación 2-15:

$$1 = \frac{76.988 MPa}{S_y} \rightarrow S_y = 76.988 MPa$$

Se propone el uso de un acero a medio carbono como lo es el AISI 1020, que normalmente se utilizan para la fabricación de piezas de mediana resistencia o como acero para máquinas, cuya resistencia a la fluencia es de 210 MPa [36, 37].

Con estos datos se crea un modelo de tornillo de desplazamiento vertical para la laminadora como el que se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.14. Tornillo de desplazamiento vertical.

3.3 Selección de transmisión de potencia

En la transmisión de potencia es necesario un sistema que permita transmitir el torque máximo propuesto para la laminación. Utilizando los resultados del cálculo del torque de la sección 3.1 podemos considerar varias opciones a elegir para el sistema que transmitirá la potencia.

Se toman en cuenta varios motores monofásicos para la transmisión del torque a los rodillos debido a que en general suelen ser mucho más accesibles

económicamente que los motorreductores. La tabla 3.7 nos muestra la comparación de varios motores comerciales para la definición del que resulta más factible de acuerdo con las características descritas en la misma tabla.

Tabla 3.7. Comparación de motores para rodillos.

Modelo	Velocidad (rpm)	Torque (Nm)	Precio (MXN)
PACINO 7IK400RGU-CF	30	80.3	4,956.66
ToAuto PUTA120/2S-19	9.375	60.9	3,061.82
SIEMENS WEG 12165929	85.9	60.9	1,799.00
Baldor APM925AT-B	114.84	60.9	2,269.00
Baldor APM925AT-B	18	73	2,100.00
Baldor 175A9AF	4	88	4,100.00

Debido a que es el motor más accesible de directa se decide el Baldor APM925AT-B, debido a que los motores de directa son más simples de controlar y requieren menor mantenimiento que los de alterna.

La forma de control de torque otorgado de un motor de directa se hace por medio del control de su velocidad mediante PWM, para esto es necesario adaptar la alimentación que nos otorga el laboratorio de pesados de UPIIZ a la alimentación que requiere el motor y que se regulará por medio de un driver para motor de DC que permitirá la comunicación con la tarjeta de adquisición de datos y se podrá controlar por medio de algoritmo el sentido de giro y la velocidad del motor, por tanto se considera pertinente el uso del circuito de la figura 3.15 para la adaptación de la alimentación y control de velocidad del motor para la transmisión de potencia al rodillo inferior de la laminadora.

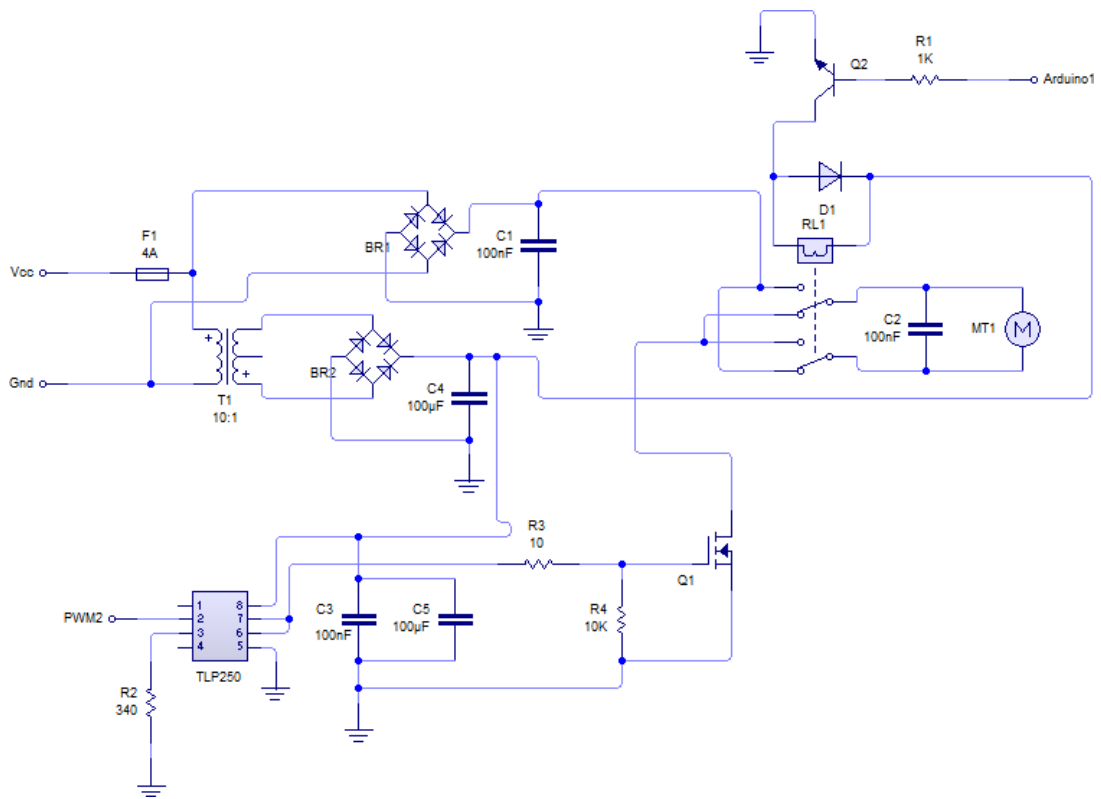


Figura 3.15. Circuito de control de sentido de giro y velocidad de motor de rodillos.

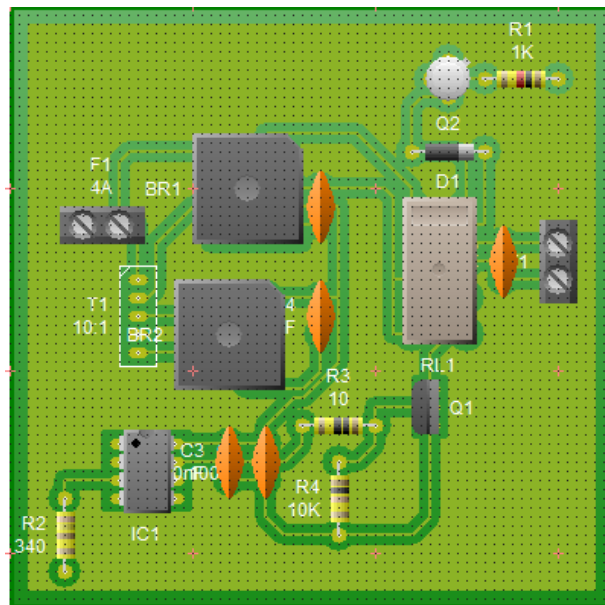


Figura 3.16. Simulación de PCB de circuito de control.

Para la transmisión de los rodillos de la laminadora se optó por usar piñones de acero con dientes helicoidales, 12 dientes y con un diámetro máximo 40 mm, ya que como son rodillos muy pequeños no es necesario tener engranes grandes para su movimiento. Otra de las características es que la carga de los engranes helicoidales es más grande y esto genera un menor desgaste. Un engranaje helicoidal pequeño (piñón) puede transmitir la misma carga que un engranaje de dientes rectos grande.

La siguiente transmisión variara de acuerdo con el tipo de diseño que se escoja de la sección 3.4.

La transmisión para el diseño de la figura 3.12 será de una barra que comunique el motor con un rodillo por medio de una abrazadera.

La transmisión para el diseño de la figura 3.13 será con 2 engranes cónicos rectos de hierro fundido con ángulo de presión de 20° . Esto conecta el eje del motor en un ángulo de 90° con el eje del rodillo y así lograr la comunicación para el movimiento de los rodillos de manera más precisa.

3.4 Diseño de carcasa

Una parte vital para la laminadora es la carcasa, que es la estructura donde se integran todas las partes que se incluyen en el formado de metales por medio de la laminación. Esta estructura debido a que debe ser muy resistente a esfuerzos y vibraciones debido a que debe de otorgar firmeza a todos los elementos de la laminadora, comúnmente se utilizan metales de alta rigidez, es por eso que se decide utilizar un hierro gris, que normalmente es el material que se usa para los armazones de las máquinas herramienta.

El diseño de esta carcasa se muestra en la figura 3.17, donde se puede apreciar que se da lugar para un montaje y desmontaje de piezas de la laminadora, sencilla para mantenimiento, además de que se integra la parte roscada donde irán los tornillos para retener los rodillos de laminación en su posición.

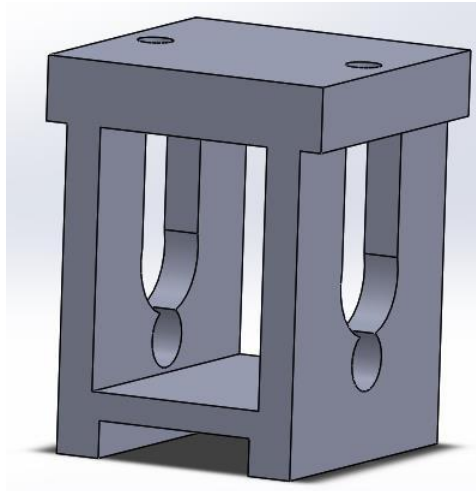


Figura 3.17. Carcasa de laminadora.

El diseño de la laminadora y los componentes que la integran es con el motor de manera horizontal, como se puede apreciar en la figura 3.18. Esto con el fin de tener un desmontaje rápido y sin dificultades al momento de querer hacer cambios en la transmisión o mantenimiento de la máquina.

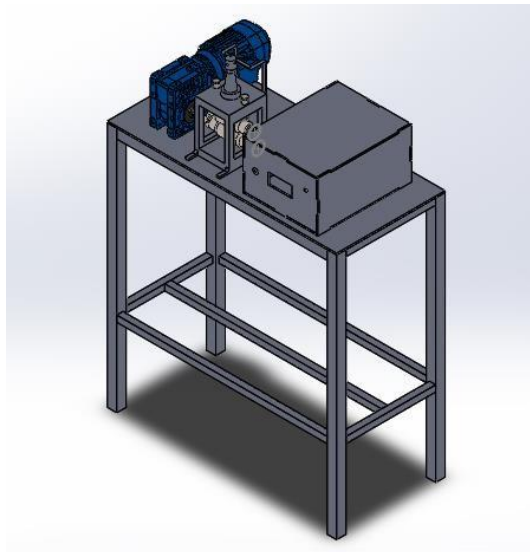


Figura 3.18. Diseño de la laminadora y motor en posición horizontal.

Cabe resaltar que el diseño es una propuesta, sus dimensiones pueden variar dependiendo de los componentes que vayan a integrar la laminadora. Se propone que la carcasa del diseño sea de acrílico, para que sea didáctico y en caso de alguna falla se detecte fácilmente para su corrección. Tanto la carcasa como el motor se

ensamblarán a una placa de acero inoxidable que ira sobre la mesa del área de trabajo.

3.5 Selección de componentes electrónicos

3.5.1 Tarjeta de desarrollo

Para la selección de la tarjeta de desarrollo que se utilizó en la implementación de la interfaz gráfica y la comunicación con los elementos electrónicos involucrados en la automatización de la laminadora, se hizo uso de una tabla comparativa, como se puede apreciar en tabla 3.8, analizando las distintas características de cada una.

Tabla 3.8. Comparación de tarjetas para uso en interfaz gráfica.

Tarjetas	Pines I/O	Programación	Precio (aproximado)	Memoria
Tessel	10	Avanzada	Bajo	32 Mb
Arduino Mega	54	Sencilla	Bajo	256 Kb
Launchpad	14	Sencilla	Muy bajo	16 Kb
Raspberry	27	Avanzada	Alto	512 Mb

Analizando todas las características de cada microcontrolador, se optó por usar Arduino Mega, ya que es el que cumple con los requerimientos necesarios para la obtención de datos de los sensores a utilizar y la salida de controles de los componentes electrónicos de la laminadora.

3.6 Diseño de interfaz de usuario

Para satisfacer la necesidad de tener una interfaz de usuario, se propone un diseño de interfaz, como el que se muestra en la figura 3.19, en la cual se puedan

manipular los parámetros de los rodillos como la velocidad, el sentido de giro, la apertura, se planea colocar un botón de paro para detener el giro y así cambiar el sentido de los rodillos, el encendido y apagado de la máquina.

Para fines prácticos y de seguridad en las operaciones se opta por utilizar una interfaz en computadora, para así hacer más cómoda la manipulación de los parámetros involucrados en la laminación. También se opta por esta opción dado que, al tener la laminadora en el laboratorio de pesados, que es donde se implementará, existen muchos residuos metálicos y polvo que afectarían a una interfaz de tipo mecánica. Teniendo estos factores en cuenta es más factible tener una interfaz en una computadora además de que nos sirve para implementar un bloqueo de pantalla de usuario en caso de que se presione algún elemento de la pantalla por error y así evitar posibles accidentes al manipular la laminadora.



Figura 3.19. Propuesta de interfaz gráfica

Capítulo 4. Análisis y validación de resultados

4.1 Construcción y ensamble mecánico

4.1.1 Laminadora

Se adquirió una laminadora tipo joyero basado en las medidas que se habían considerado en el diseño de la máquina. A continuación, se muestran las partes importantes que conforman este mecanismo y sus funciones.

En la figura 4.1 se muestra el sistema de transmisión de engranes que realiza el movimiento vertical del rodillo superior para el control del mecanismo de apertura de los rodillos.



Figura 4.1. Engranaje de apertura de rodillos.

Lo que permite el movimiento vertical del rodillo superior es el sistema de engranes de la figura 4.1. Este sistema mueve 2 tornillos en contacto a una chumacera (figura 4.2), que pueden deslizarse hacia arriba o abajo dependiendo de la dirección del giro de los engranes superiores a cada lado. Cada vuelta completa del engrane pequeño da una distancia de apertura de 1.27 mm (0.05 in).



Figura 4.2. Tornillos de movimiento vertical

Las chumaceras ya mencionadas están unidas al rodillo superior, como se muestra en la figura 4.3, y esto permite el movimiento vertical del rodillo al impulsar los tornillos con la transmisión de engranes.



Figura 4.3. Rodillos de laminadora

Los rodillos se sometieron a una prueba con un durómetro y a prueba de chispa arrojando como resultado que son de un acero AISI H11.

En la figura 4.4 se muestra un tensor que ejerce una fuerza de reacción que contrarresta la gravedad y las fuerzas que ejercen los tornillos al moverse. Este tensor se encuentra a ambos lados de la laminadora, permitiendo así la estabilidad de los rodillos en la posición que deben estar.



Figura 4.4. Tensor

4.1.2 Transmisión mecánica

La transmisión del movimiento y torque a los rodillos de la laminadora están dados por un motor de corriente alterna, de medio caballo de fuerza, acoplado a un reductor para aumentar el torque otorgado por el motor.

En la figura 4.5 se muestra el acoplamiento del motor con el reductor, así como su instalación en la mesa de trabajo de la laminadora. Los datos del motor y el reductor se encuentran en el anexo 13. datos de motorreductor



Figura 4.5. Motor acoplado al reductor.

Para la sujeción del motor en la mesa de trabajo, debido a la diferencia de alturas con respecto a su reductor, se hicieron un par de bases para que el motor quedara en posición horizontal y así no tener problemas de concentración de esfuerzos y bajar el rendimiento del motor.

En la transmisión de movimiento y fuerza, el motorreductor utiliza un eje el cuál se acopla al reductor por medio de una cuña y un seguro omega para evitar el desplazamiento axial del eje (figura 4.6).



Figura 4.6. Motorreductor y seguro omega de eje.

Debido a las diferencias de altura del eje del motorreductor y el rodillo inferior de la laminadora, que es el que recibe el torque del motor; se realizaron bases, para colocar la laminadora a una altura en la cual ambos ejes pudieran ser concéntricos y sea más sencilla la transmisión de la fuerza para la laminación (anexo 9). La manera de acoplar ambos ejes concéntricos se hizo por medio de un cople de coldroll reforzado con solera en forma de anillo para darle más resistencia.

La fabricación del cople se realizó en el torno (figura 4.7 y figura 4.8) mediante las técnicas de careado, barrenado, cilindrado externo e interno, para abrir los diámetros de los ejes, tal como se muestra en el plano del anexo 8.



Figura 4.7. Maquinado de cople para laminadora.



Figura 4.8. Machueado de cople.

Además de que se le realizaron machueados para la sujeción de los ejes y el cople por medio de opresores como se muestra en la figura 4.9.

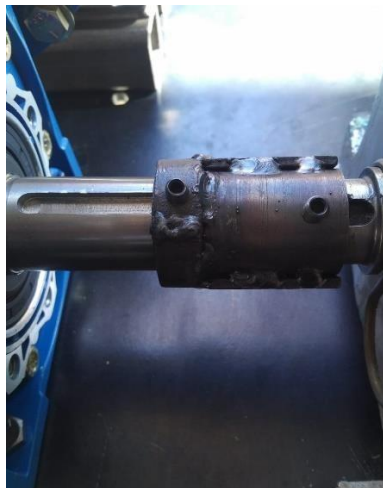


Figura 4.9. Cople para motorreductor y laminadora.

Para la transmisión del movimiento entre los rodillos se utilizan un par de engranes helicoidales (figura 4.10) que venían integrados en la laminadora, estos además de transmitir el movimiento otorgado por el motor principal, transmiten la fuerza de laminación necesaria en el proceso. Estos están unidos a los rodillos por

medio de una cuña, arandela y tronillos de cabeza hexagonal para evitar el desplazamiento axial.



Figura 4.10. Engranajes helicoidales de laminadora.

La apertura máxima entre los rodillos para laminar que permiten los engranes integrados con la laminadora es de 6 mm .

4.2 Construcción electrónica – eléctrica

4.2.1 Circuito principal y de alimentación

El circuito principal se desglosa en dos partes (figura 4.11), la de electrónica y la eléctrica; eso se hizo debido a los amperajes que se utilizan en la parte eléctrica pueden llegar a ser altos y pueden dañar la parte electrónica, es por eso que se manejan de forma separada pero con la misma fuente de alimentación (es decir, una toma de voltaje a 220 V bifásica).

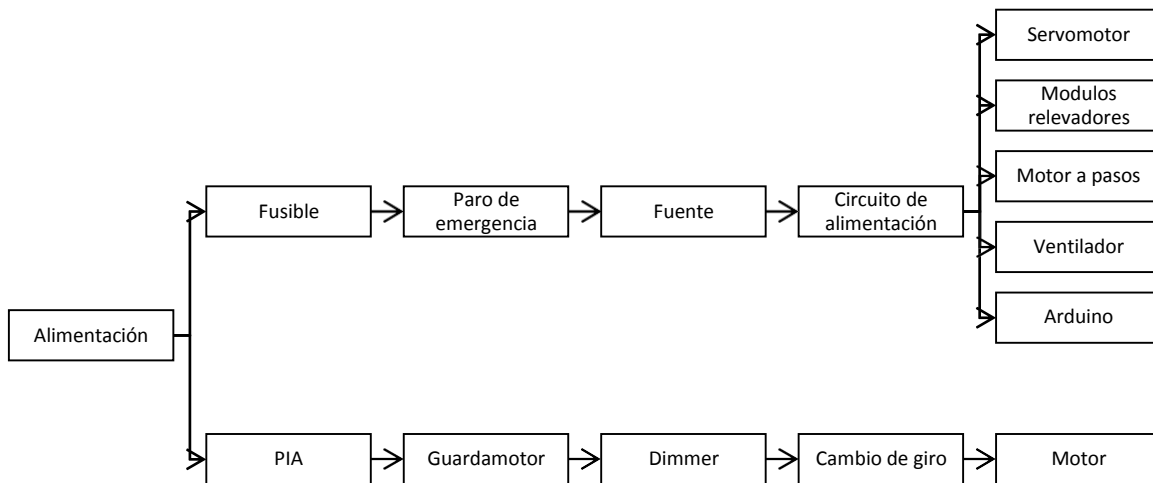


Figura 4.11. Diagrama de bloques de conexión.

Para la conexión de la alimentación se armó una clavija para poder conectar a la toma de voltaje a 220 V proporcionada en el laboratorio de pesados 1 en UPIIZ, así como se muestra en las figura 4.12 y figura 4.13.

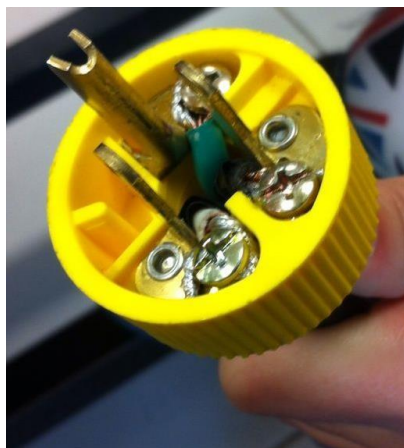


Figura 4.12. Clavija para conexión a tomacorriente.



Figura 4.13. Terminales para conexión de alimentación.

El diagrama electrónico de conexión del diagrama de bloques de la figura 4.11 es el de la figura 4.14 en el cual se puede apreciar de mejor manera las conexiones generales de alimentación y la electrónica de la máquina.

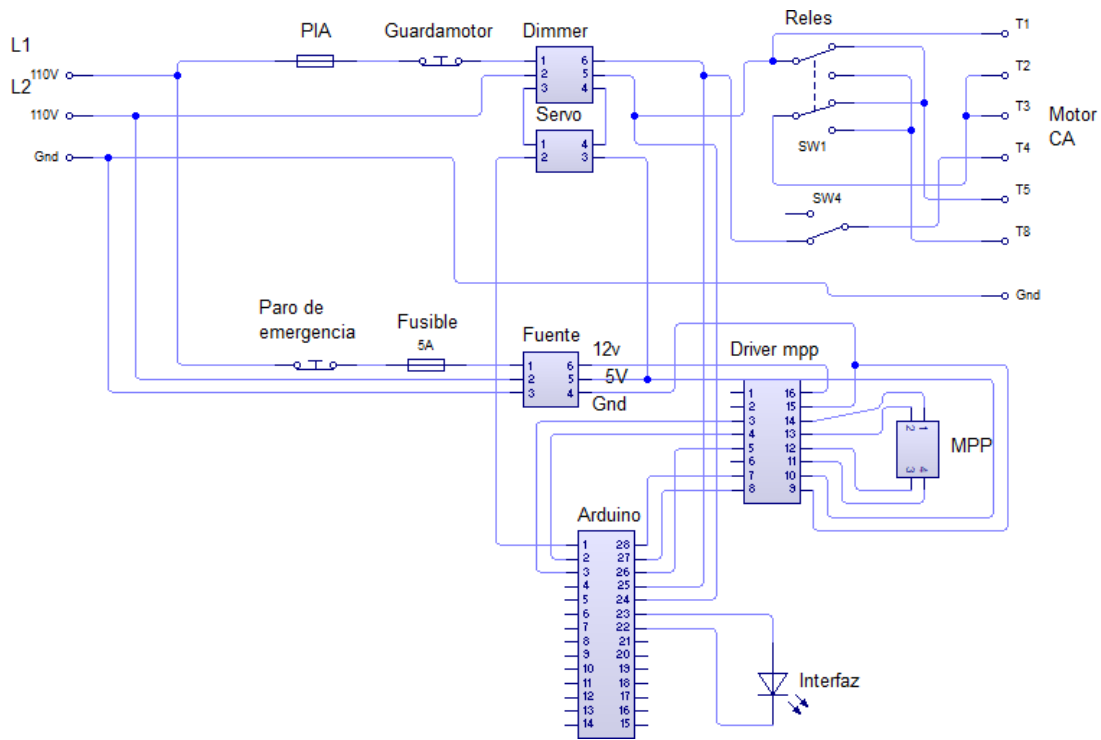


Figura 4.14. Diagrama electrónico de circuito principal.

Para la alimentación de los elementos electrónicos se utilizó una fuente de computadora de la cual se sacaron los 3 cables de alimentación necesarios para alimentar a 5 V, a 12 V y la tierra común, estos cables se conectaron a un circuito (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) para una buena distribución de carga.

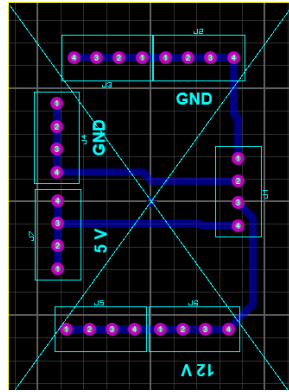


Figura 4.15. Circuito de distribución de alimentación electrónica.

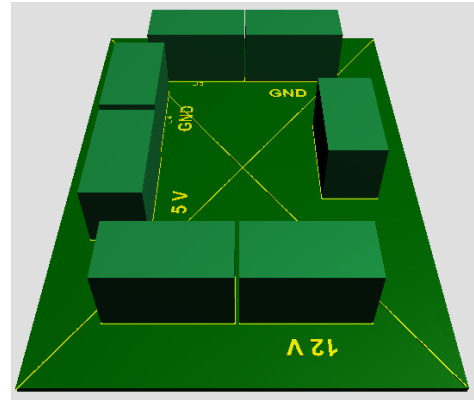


Figura 4.16. Vista 3D de circuito de alimentación electrónica.

4.2.2 Circuito de control de sentido de giro de rodillos

El motor cuenta con la descripción eléctrica para la configuración de cambio de sentido de giro (anexo 12), así que se diseñó un circuito (figura 4.17) que permite el cambio de giro desde la interfaz de usuario. Esta placa sirve para conectar los 6 cables del motor principal a módulos relevadores para controlar el cambio de conexiones eléctricas desde la interfaz, así se adaptaría el diseño inicial al motor de alterna que se utiliza.

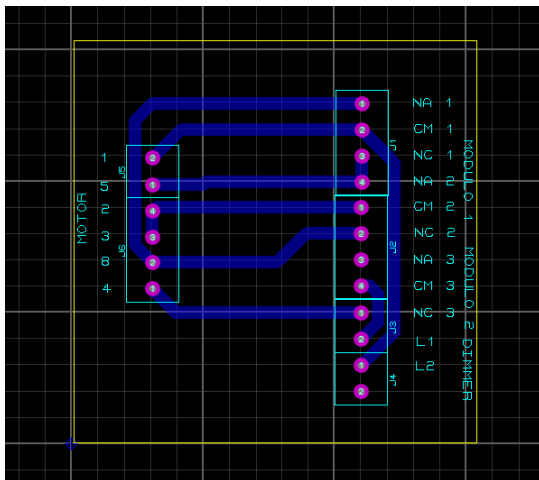


Figura 4.17. PCB del circuito de control de sentido de giro

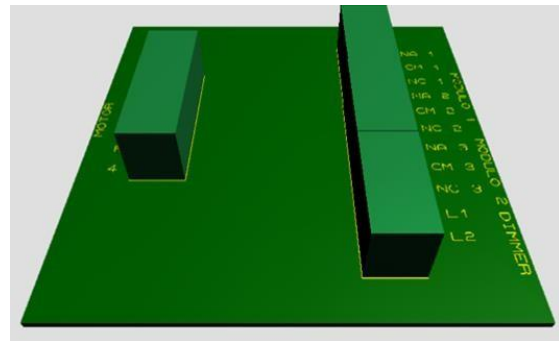


Figura 4.18. Vista 3D de circuito de control de giro.

El cambio de giro se da por cambiar el cable 5 por el 8, ese es el principio de funcionamiento del circuito de cambio de giro. La placa sirve para tener un nodo común en los relevadores del cambio de giro, las otras terminales de los dos primeros relevadores que sirven para intercalar entre el cable 5 y el 8 para cada conexión. El tercer relevador sirve para cortar la energía de alimentación del motor en el momento del cambio de conexiones para no tener un corte circuito en el motor.

Las entradas y salidas del circuito están descritos en la PCB del circuito que se encuentra en la figura 4.17, en estas terminales se utilizan bornes enchufables debido a que resisten hasta 10 A de corriente alterna y son lo suficientemente amplios para ingresar los cables de calibre 12 AWG que usa el motor y sus conexiones de alimentación.

Para la realización de la placa de cambio de giro se realizaron adecuaciones de potencia elevada, se optó por eliminar todo el cobre de la placa con cloruro férrico, como se aprecia en figura 4.19, para evitar cortos u otros fallos en el circuito; además se recubrieron las pistas con esmalte para aislar las pistas y no tener cortos circuitos por entrar en contacto con alguna basura o metal.



Figura 4.19. Eliminación del cobre con cloruro férrico.

Se optó por utilizar módulos relevadores debido a que vienen acoplados; las terminales de estos soportan hasta 10 A en corriente alterna.

4.2.3 Control de velocidad de rodillos

El control de velocidad del motor se realizó por medio de un dimmer AC SCR (figura 4.20), debido a la facilidad de adquirir uno y que el precio es más bajo que el circuito diseñado.

La variación de la velocidad se hace por medio de un acoplamiento entre el potenciómetro del dimmer y un servo motor, el cual se controla desde la interfaz de usuario. La limitación de la velocidad, por el reductor acoplado al motor, hace que la velocidad máxima que puede otorgar sea de 8 rpm y la velocidad de arranque sea de 6 rpm; estas velocidades se varían por el dimmer.

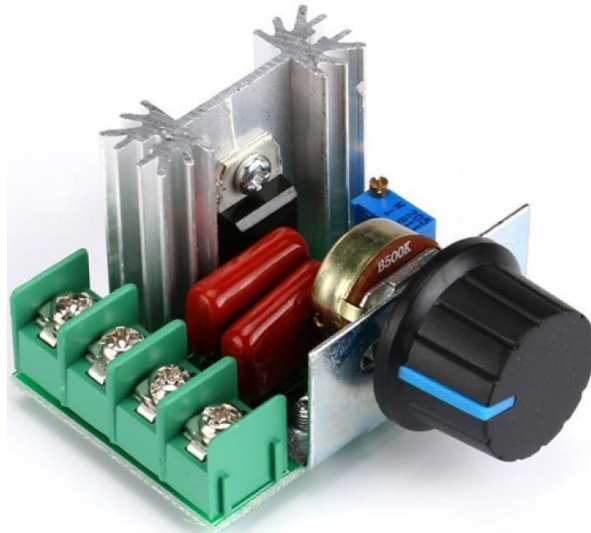


Figura 4.20. Dimmer AC SCR

Tabla 4.1. Características de dimmer AC SCR.

Voltaje de trabajo	220 VAC
Máxima potencia	2000 W
Regulación de voltaje	50 VAC a 220 VAC
Máxima corriente	25 A
Máximo voltaje	1200 VAC

4.2.4 Circuito de control de motor a pasos

El diseño del circuito del motor a pasos que controla la abertura entre los rodillos se muestra en la figura 4.21, ahí se pueden observar los puertos que conectan al controlador con el Arduino y el motor a pasos.

Para calibrar el controlador se alimentó el driver A4988 sólo con la fuente de 5 Volts y se reguló el potenciómetro interno a la corriente estipulada por la fórmula de calibración:

$$V_{ref} = I_{max} \times (8 \times r_s)$$

Donde la corriente máxima se despeja y se consideró de 1.2 A.

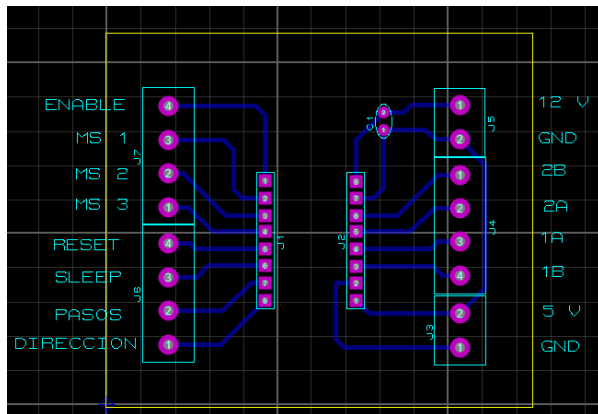


Figura 4.21. Diseño de la pcb del circuito del motor a pasos

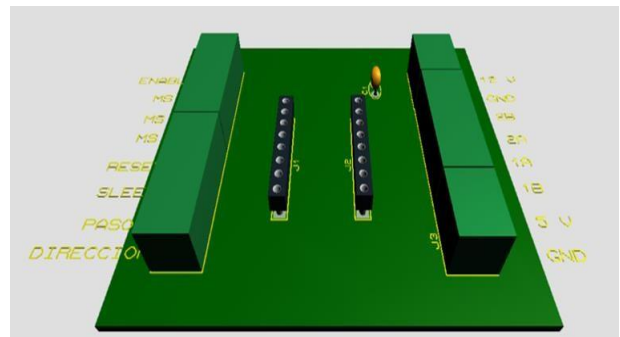


Figura 4.22. Vista 3D del circuito del motor a pasos

Para la fabricación de la placa PCB sobre una placa de cobre se utilizó la maquina Bungard CCD para manufacturarla, como se muestra en la figura 4.23.



Figura 4.23. Maquinado de la PCB del motor a pasos

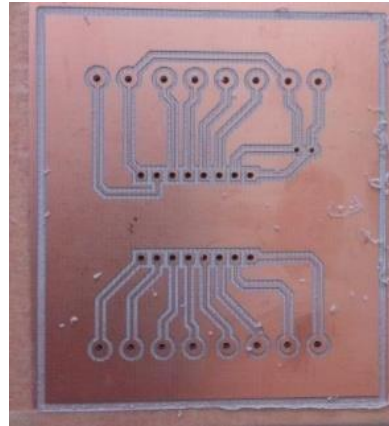


Figura 4.24. PCB del motor a pasos

Se soldaron los componentes electrónicos con estaño como se muestra en la figura 4.25, en los cuales se encuentran los bornes para la sujeción de los cables, el driver y el capacitor para la protección del motor a pasos.

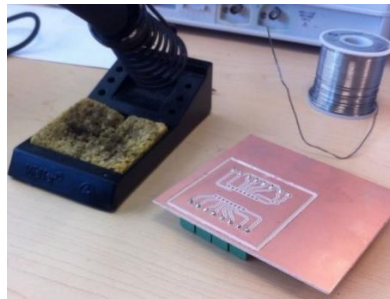


Figura 4.25. Soldado los componentes electrónicos de la PCB

El circuito impreso con los componentes electrónicos soldados se muestra en la figura 4.26.

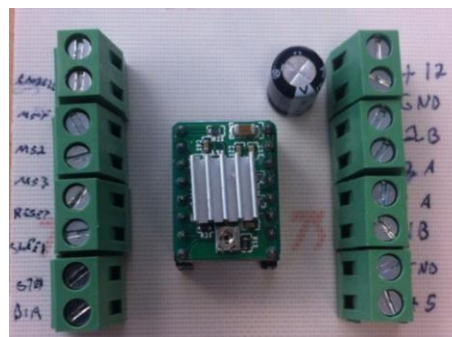


Figura 4.26. Circuito impreso del motor a pasos

Se realizaron pruebas para controlar el sentido de giro con el Arduino y el engrane principal que permite el movimiento de los tornillos que desplazan el rodillo de sentido vertical como se muestra en la figura 4.27.

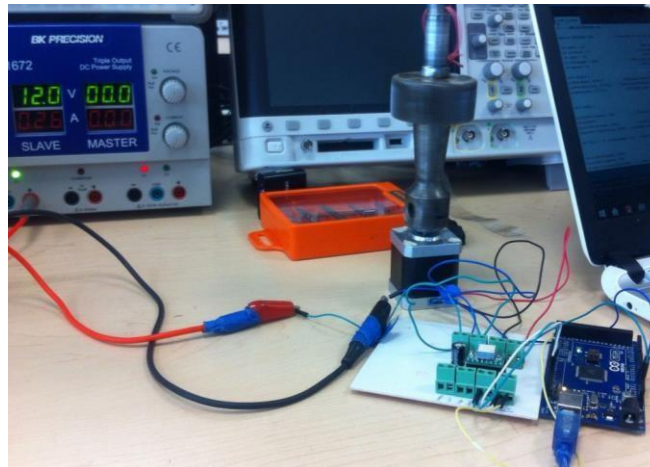


Figura 4.27. Pruebas del motor a pasos con el Arduino

4.3 Testigos de calibración

Para los testigos se realizaron 2 diseños diferentes, como se puede apreciar en las figura 4.28 y figura 4.29, estos testigos están hechos de un polímero PLA (polímero de ácido láctico). Estos testigos nos sirven para ajustar y nivelar los rodillos de la laminadora y así evitar esfuerzos no uniformes en los rodillos.

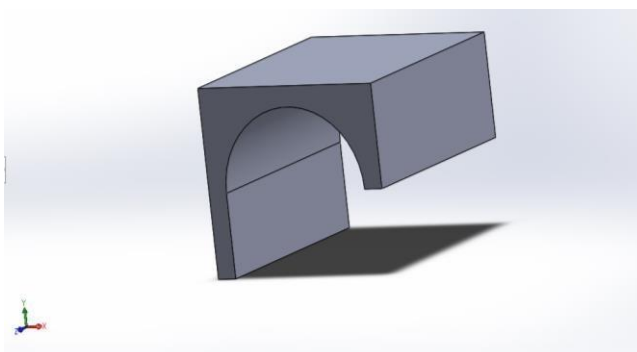


Figura 4.28. Testigos de calibración 1

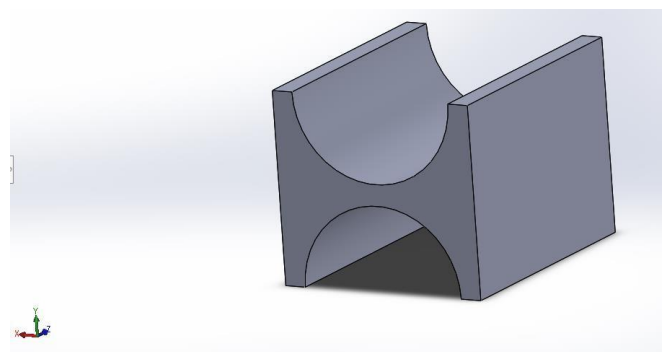


Figura 4.29 Testigos de calibración 2

En el proceso de laminado es necesario calibrar los rodillos después de cualquier proceso de montaje y desmontaje de la laminadora, es por eso que se debe de hacer este proceso de forma manual debido a que los tornillos de avance vertical tienen el mismo avance y es por eso que el motor a pasos no servirá para la calibración de linealización horizontal en los rodillos.

4.4 Interfaz

El diseño de la interfaz se realizó en un software de programación gráfica. En él se colocaron los botones e indicaciones necesarias para que el usuario se le facilite la manipulación de la máquina, como se muestra en figura 4.30.



Figura 4.30. Interfaz grafica

Se colocó un bloqueo en los interruptores para habilitar los cambios de giro y apertura de los rodillos. Esto con el fin de que, si el usuario por error llegara a accionar los 2, solo se pueda ejecutar el primero y hasta que no acabe su función no se pueda accionar el segundo.

A continuación, en la figura 4.31, se muestra la programación utilizada en la interfaz para el funcionamiento de la máquina.

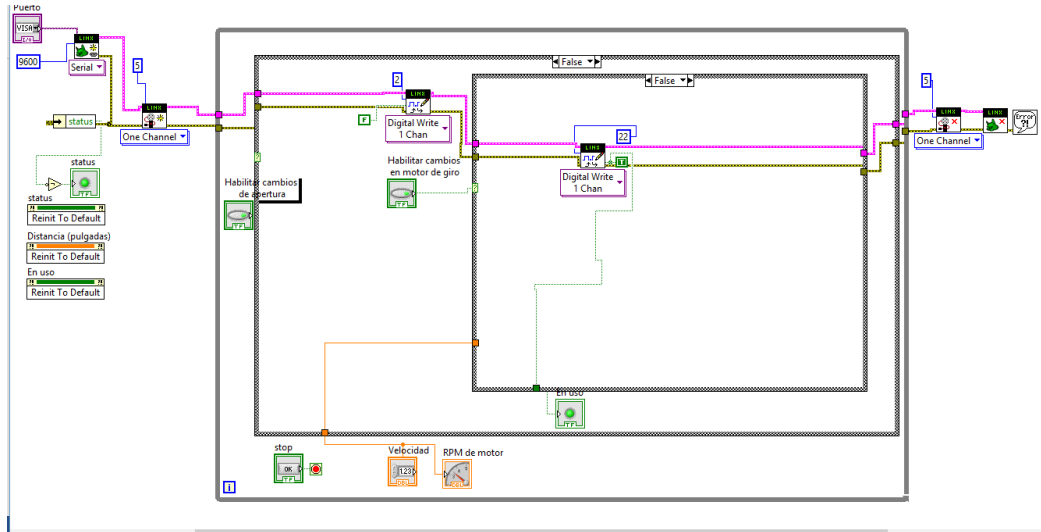


Figura 4.31. Programación de Interfaz grafica

Este código se divide principalmente en 3 partes, la primera es el control de sentido de giro del motorreductor SEW, el código se puede apreciar en figura 4.32.

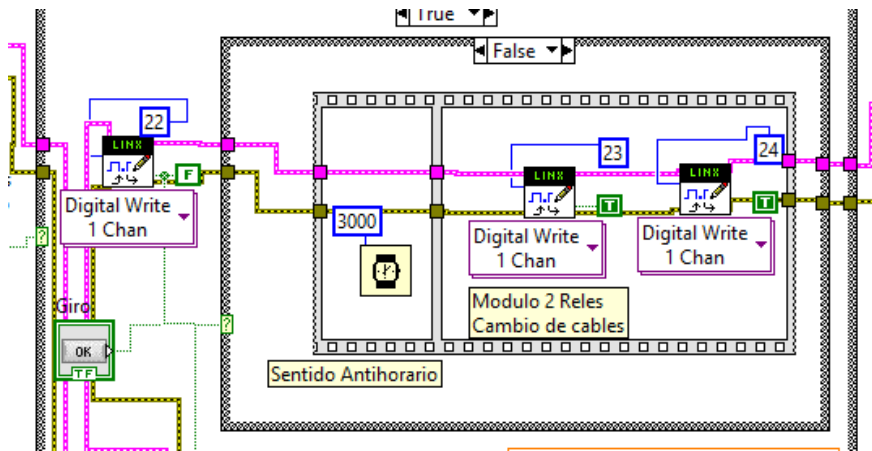


Figura 4.32. Programa del control de sentido de giro

La segunda parte del código muestra el control de velocidad de giro del motorreductor SEW (ver figura 4.33).

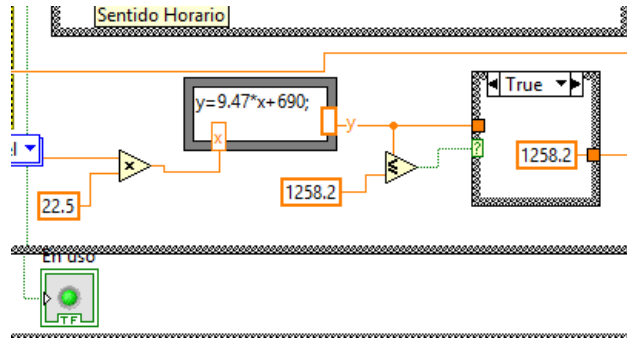


Figura 4.33. Programa del control de velocidad

La última parte del código es del cambio de abertura de los rodillos, como se puede apreciar en la figura 4.34.

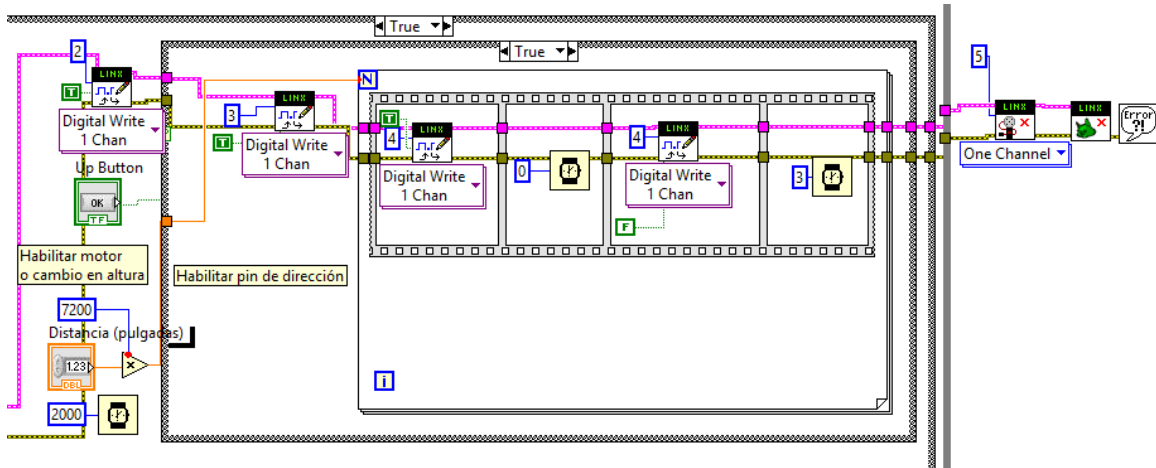


Figura 4.34. Programa del sistema de abertura de los rodillos

4.5 Sistema integrado

4.5.1 Arranque del sistema

Para utilizar el sistema se deben de seguir los siguientes pasos para no tener ningún problema de señales parásitas o de sobrecargas.

1. Revisar que el paro de emergencia electrónico este presionado, que el PIA y el guardamotor estén en off.
2. Conectar el Arduino a la computadora con la interfaz de usuario.

3. Configurar el puerto en el que se conecta el Arduino y se espera a que el led de estatus en la interfaz encienda, de lo contrario se desconecta y se vuelve a configurar el puerto hasta que el estatus sea verdadero (es decir que el led encienda lo cual indica que hay comunicación con el Arduino).
4. Conectar la clavija a una conexión de 220 V bifásica.
5. Desactivar el botón de paro de emergencia electrónico y se corrobora que esté alimentando con el sonido del ventilador debido a que éste siempre está en funcionamiento para evitar un sobrecalentamiento en los circuitos.
6. Encender el PIA y el guardamotor.

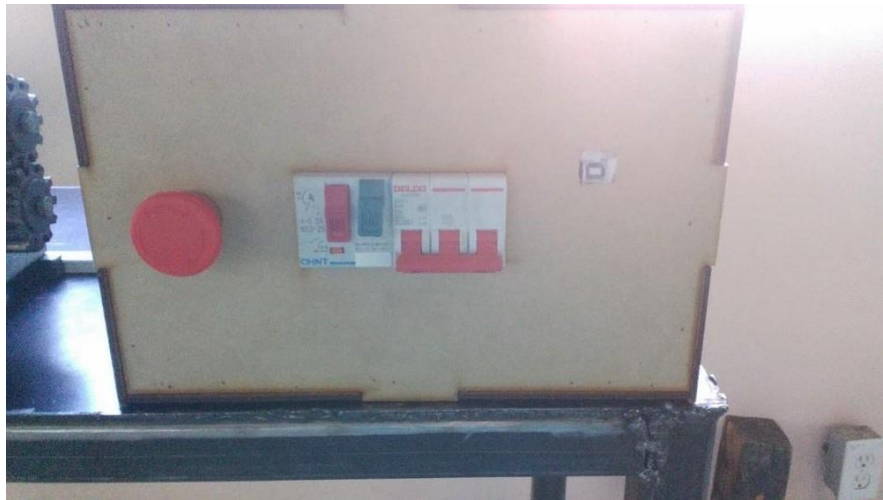


Figura 4.35. Botón de paro de emergencia electrónico, guardamotor, PIA y puerto para Arduino. (De izquierda a derecha respectivamente).

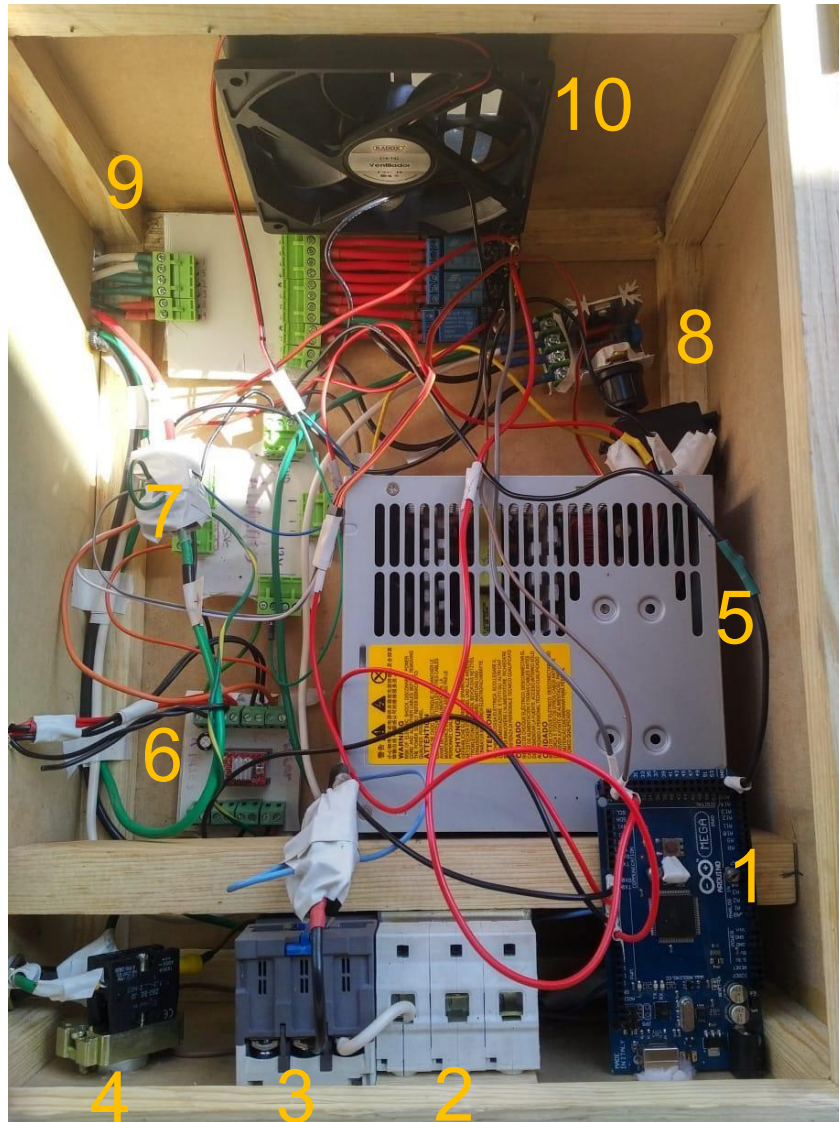


Figura 4.36. Circuitería

En la figura 4.36 se muestran las partes del sistema eléctrico y electrónico que conforma la máquina y se desglosa en:

1. Arduino Mega
2. PIA
3. Guardamotor
4. Paro de emergencia electrónico
5. Fuente de alimentación electrónica
6. Controlador de motor a pasos
7. Circuito de distribución de alimentación

8. Control de velocidad
9. Control de cambio de giro
10. Ventilador de circuitería.

El sistema integrado consta de la laminadora, el motorreductor, el acoplamiento de los ejes de la laminadora y el reductor, el motor a pasos que permite la automatización de la apertura de los rodillos, los elementos electrónicos para el cambio de giro, control de velocidad, y el control del motor a pasos además de la parte de seguridad (paros de emergencia), tanto electrónicos como eléctricos, así como la mesa de soporte de todo lo anterior tal como se muestra en la figura 4.37.

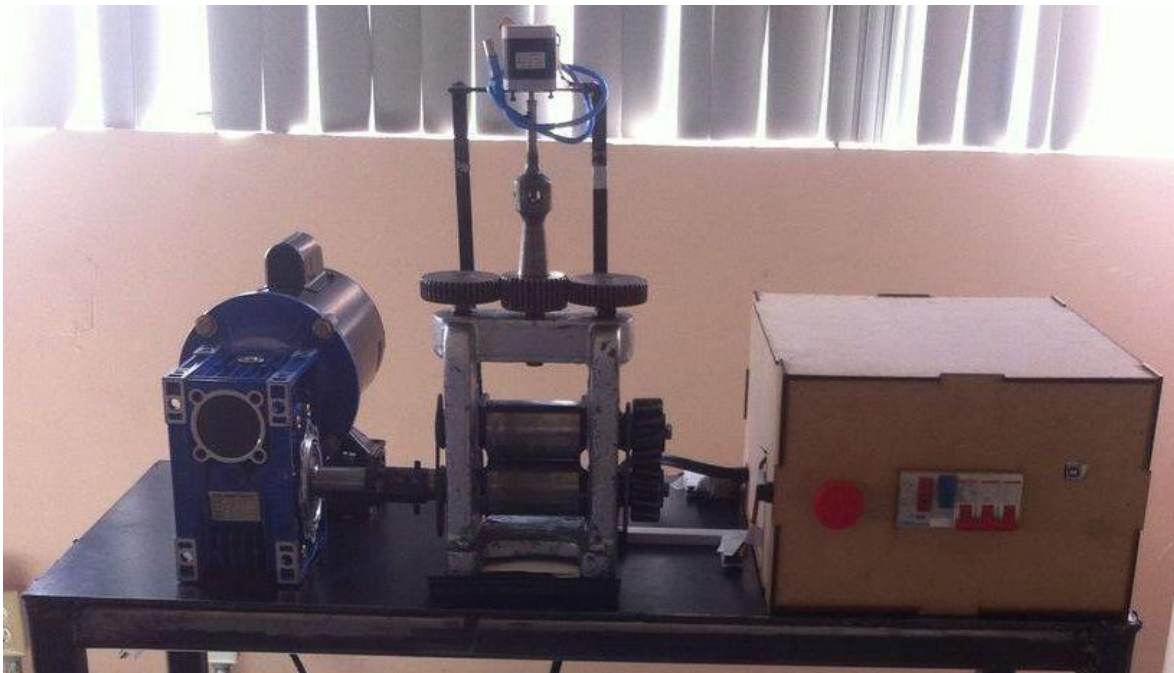


Figura 4.37. Sistema integrado.

Una vez integrado todo el sistema se realizaron pruebas de laminado con probetas de aluminio para comprobar el funcionamiento de la máquina, tal como se muestra en la figura 4.38 donde se visualiza una probeta sin laminar al extremo izquierdo, en seguida a la derecha una probeta laminada en un solo sentido y al extremo derecho una probeta laminada en ambos sentidos.

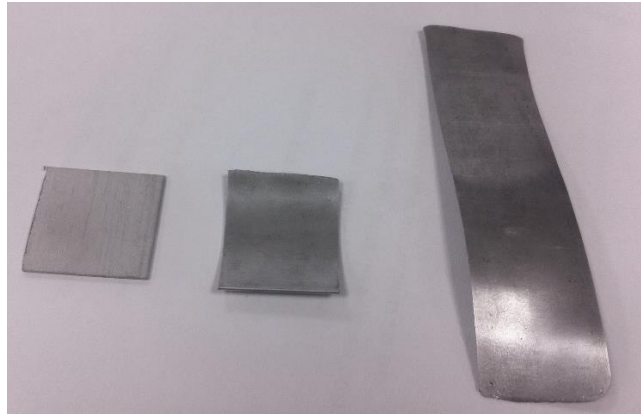


Figura 4.38. Pruebas de laminado.

Las pruebas de laminación fueron hechas en probetas de 12.7 mm de espesor y 25.4 mm de ancho. La primera probeta laminada se le redujo un 10% de espesor, tal como se muestra en la figura 4.39.

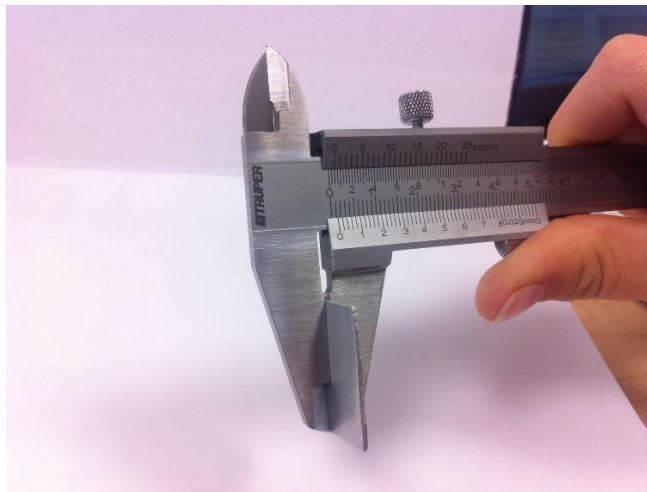


Figura 4.39. Laminación de 10%.

La segunda probeta laminada se redujo el espesor inicial un 25% de un sentido y el otro 25% en otro sentido de rotación del motor principal, dando así el 50% de reducción como se muestra en la figura 4.40.

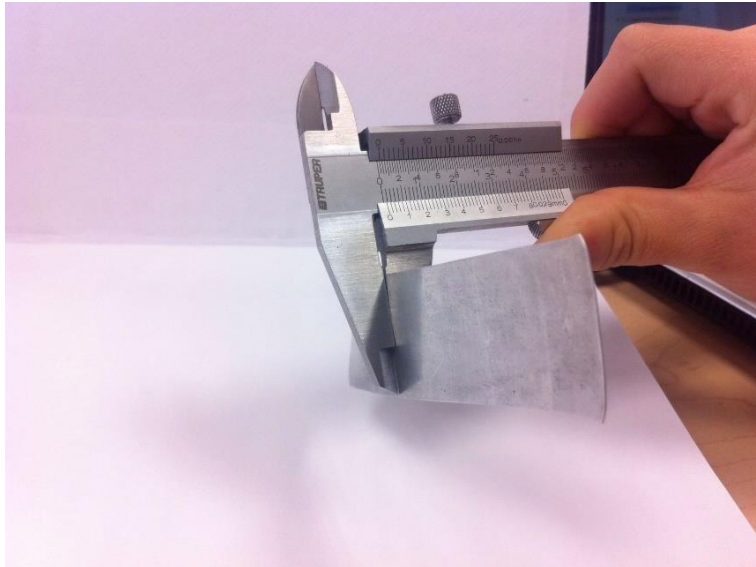


Figura 4.40. Laminación al 50%.

Se hizo una laminación de una placa de espesor inicial de 5.6 mm y se redujo a 2.2 mm , haciendo una reducción total de 39.29% , teniendo como resultado la lámina que se muestra al extremo derecho de la figura 4.41. Al hacer una laminación siempre se obtiene una elongación del material, tal como se muestra en la figura 4.41, donde se tiene en la mitad de la imagen una placa del espesor inicial al que se le hizo la laminación (longitud inicial 15 mm , longitud final 38.33)



Figura 4.41. Prueba de laminación de tercer probeta.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En base a los objetivos específicos y general del proyecto se concluye lo siguiente:

Se diseñó una laminadora de tipo joyero que pudiera maquinar materiales de tipo no ferrosos en base a una extensa revisión bibliográfica, simulaciones e iteraciones con modelos de laminadoras existentes. Con base a los costos estimados se adquirió una laminadora debido a que el costo de está era más barata que el construirla, además de que se adaptaba al diseño realizado.

Se diseñó una transmisión de potencia electrónica debido al tipo de motor que se pretendía utilizar. Debido a que los modelos teóricos no resultan igual en la práctica se optó por utilizar una transmisión más sobrada sin alterar la alimentación del motor, por lo cual se adquirió un motorreductor de corriente alterna que permitiera más esfuerzos de los calculados para no acortar el tiempo de vida del motor.

Se diseño una interfaz gráfica que permita modificar los datos de apertura de rodillos, velocidad de rodillos y el sentido de giro del motor, así como que muestrea la velocidad a la cual se está utilizando la laminadora.

Se imprimieron en 3D los testigos de calibración de los rodillos a una apertura de $\frac{1}{4}$ in con PLA.

La supervisión controlada de: la velocidad se da por medio del dimmer; y de la presión por medio del motor a pasos que controla la apertura de los rodillos.

5.2 Recomendaciones

Se debe de mantener bien lubricada la máquina para un adecuado rendimiento y evitar el sobrecalentamiento de las partes del sistema.

El uso continuo de más de 45 min no es recomendable debido a la cantidad de esfuerzos al que es sometido el sistema, como empíricamente se comprobó en las pruebas del sistema.

5.3 Trabajo a futuro

Considerando que la máquina se utilizará para investigación de materiales se pueden adecuar sensores de fuerza, velocidad y temperatura para analizar los materiales laminados.

Se puede hacer un juego de rodillos que soporte la laminación en caliente con base en los planos realizados, pero con un tratamiento térmico que permita este tipo de procesos.

Para mejorar la laminación de placas de materiales no ferrosos a láminas, se puede hacer un nuevo juego de engranes de transmisión entre los rodillos para poder tener más apertura en los rodillos.

Fuentes de consulta

- [1] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [2] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología., México: Pearson Educación, 2008.
- [3] E. G. R Jácome y A. D. G. Anaguano, «Rediseño y optimización de la laminadora de aluminio del laboratorio de metalografía de la facultad de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional,» Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2016.
- [4] C. A. P. Andrade y D. M. T. Vitaña, «Diseño y construcción de laminadora de cuatro rodillos para laminar tiras de aluminio,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [5] Mecaner.com, «Mecaner.com,» [En línea]. Available: <http://www.mecaner.com.ar/nueva/laminadoraultrasuper.html>. [Último acceso: 24 08 2017].
- [6] Cocinista.es. [En línea]. Available: <https://www.cocinista.es/web/recetas/hazlo-tu-mismo/hacer-pan-y-pasta/masa-para-pasta.html>. [Último acceso: 24 08 2017].
- [7] [En línea]. Available: <http://www.rosse.cl/wp-content/uploads/2017/07/AGILE-1.png>. [Último acceso: 06 06 2018].
- [8] L. V. Briseño, Formado de metales, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2015.
- [9] A. Malishev, G. Nikolaiev y Y. Shuvalov, Tecnología de los metales, Mexico: Editorial Limusa/Grupo Noriega, 1994.
- [10] «<https://www.russula.com/en/solutions/rolling-mill-control.html>,» RUSSULA, [En línea]. Available: <https://www.russula.com/en/solutions/rolling-mill-control.html>. [Último acceso: 25 08 2017].
- [11] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, New York: McGraw-Hill, 2008.

- [12] [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Transmisi%C3%B3n_mec%C3%A1nica. [Último acceso: 18 4 2018].
- [13] [En línea]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>. [Último acceso: 18 4 2018].
- [14] [En línea]. Available: <http://ilp.com.do/955-2/>. [Último acceso: 26 05 2018].
- [15] L. V. V. Useche. [En línea]. Available: blog.utp.edu.com/lvanegas/files/2011/08/Cap8.pdf. [Último acceso: 26 05 2018].
- [16] [En línea]. Available: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. [Último acceso: 30 05 2018].
- [17] [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/tag/raspberry-pi>. [Último acceso: 15 04 2018].
- [18] «Raspberry,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>. [Último acceso: 11 05 2018].
- [19] [En línea]. Available: <https://carlosazaustre.es/tessel-el-microcontrolador-programable-en-javascript/>. [Último acceso: 15 4 2018].
- [20] «Sparkfun,» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13841?ref=tessel.io>. [Último acceso: 11 05 2018].
- [21] [En línea]. Available: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>. [Último acceso: 14 4 2018].
- [22] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-adk-rev3>. [Último acceso: 11 05 2018].
- [23] [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/msp430-launchpad-programador-de-microcontroladores-texas-instrumets/>. [Último acceso: 15 4 2018].
- [24] «Texas Instruments,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/tool/MSP-EXP430G2#1>. [Último acceso: 11 05 2018].
- [25] C. M. Expósito, «Interfaz Gráfica de Usuario,» *Aproximación semiótica y cognitiva*, vol. 1, p. 42, 2006.

- [26] «RAE,» [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=sensor>. [Último acceso: 26 05 2018].
- [27] «Mecánica y motores,» [En línea]. Available: <http://www.mecanicaymotores.com/que-es-un-tacometro.html>. [Último acceso: 27 05 2018].
- [28] [En línea]. Available: http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/11663-10511181.jpg. [Último acceso: 27 05 2018].
- [29] «De máquinas y herramientas,» [En línea]. Available: <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/encoder-tipos>. [Último acceso: 27 05 2018].
- [30] [En línea]. Available: <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>. [Último acceso: 26 05 2018].
- [31] [En línea]. Available: http://cdn-tienda.bricogEEK.com/1819-thickbox_default/motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.jpg. [Último acceso: 27 05 2018].
- [32] [En línea]. Available: <https://www.energiaccontrolada.com/faq/Que-es-un-motorreductor>. [Último acceso: 27 5 2018].
- [33] [En línea]. Available: <http://selectromin.com/wp-content/uploads/2016/12/MOTORREDUCTOR-SUMITOMO.jpg>. [Último acceso: 27 05 2018].
- [34] [En línea]. Available: <http://www.tecnijoy.net/images/LLD100-EL.jpg>. [Último acceso: 18 09 2017].
- [35] [En línea]. Available: <http://maquijoy.com/wp-content/uploads/2009/09/TD-1401.jpg>. [Último acceso: 12 09 2017].
- [36] [En línea]. Available: http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_1050_aluminio.pdf. [Último acceso: 09 04 2018].
- [37] [En línea]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Plomo.html>. [Último acceso: 12 04 2018].
- [38] [En línea]. Available: <http://www.phase2plus.com/hardness-tester/conversion-charts.html> . [Último acceso: 20 04 2018].

- [39] ASM International Handbook Committee, ASM Handbook, Volume 1, Properties and selection: Irons, Steels, and high performance Alloys, ASM International, 1990.
- [40] [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3891/34039-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>. [Último acceso: 26 05 2018].
- [41] SUMINDU. [En línea]. Available: www.sumindu.com/especificaciones/17-%201040.pdf. [Último acceso: 26 05 2018].
- [42] arteytecnica.com. [En línea]. Available: <http://www.arteytecnica.com.ar/laminadoras.html>. [Último acceso: 24 08 2017].
- [43] [En línea]. Available: <https://unicrom.com/multiplexor-mux/>. [Último acceso: 17 4 2018].
- [44] S. Noriega, «Multiplexers. Demultiplexers. Decodificadores. Codificadores. Llaves analógicas.,» 2003. [En línea]. Available: <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/islyd/apuntes/muxdemux2003.pdf>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [45] techlandia. [En línea]. Available: https://techlandia.com/pantalla-tactil-tft-hechos_98790/. [Último acceso: 12 04 2018].
- [46] «Ruta 401,» [En línea]. Available: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/conexion-motores-monofasicos>. [Último acceso: 14 5 2018].
- [47] «coparoman,» 8 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <http://coparoman.blogspot.mx/2015/11/motor-monofasico-de-fase-partida-con.html>. [Último acceso: 13 04 2018].
- [48] «Robodacta,» [En línea]. Available: <https://store.robodacta.mx/motores/motores-a-pasos/motor-a-pasos-4v-1.2a-nema-17/>. [Último acceso: 23 05 2018].
- [49] «Carrod,» [En línea]. Available: <https://www.carrod.mx/products/motor-paso-a-paso-de-6-hilos-57bygh420>. [Último acceso: 23 05 2018].
- [50] «Carrod,» [En línea]. Available: <https://www.carrod.mx/products/motor-paso-a-paso-de-4-hilos-42byghm809>. [Último acceso: 23 05 2018].

- [51] «AliExpress,» [En línea]. Available:
https://es.aliexpress.com/store/product/220-V-AC-400-W-regulado-monofasico-motor-de-engranaje-de-la-velocidad-400-W/1209624_32872273479.html?spm=a219c.search0104.3.64.1e7b26936pkT1c&ws_ab_test=searchweb0_0%2Csearchweb201602_1_10152_10151_10065_1034_4_10068. [Último acceso: 25 05 2018].
- [52] «AliExpress,» [En línea]. Available:
https://es.aliexpress.com/store/product/Toauto-AC-Acero-inoxidable-motor-de-vibracion-asincronica-monofasico-a-prueba-de-agua/3212075_32837836727.html?spm=a219c.search0104.3.93.3b7b46571hxKmC&ws_ab_test=searchweb0_0%2Csearchweb201602_1_10152_10151_10065_1. [Último acceso: 25 05 2018].
- [53] «Mercado Libre,» [En línea]. Available:
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-608098402-motor-monofasico-de-1-12-hp-siemens-oferta-especial-_JM. [Último acceso: 25 05 2018].
- [54] «Mercado Libre,» [En línea]. Available:
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-587892856-motor-electrico-monofasico-2-hp-weg-12165929-1735-rpm-_JM. [Último acceso: 25 05 2018].
- [55] «Mercado Libre,» [En línea]. Available:
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-563069305-motorreductor-33-rpm-14-hp-25-amp-rpm-1750-90-v-dc-baldor-_JM#questions. [Último acceso: 26 05 2018].
- [56] «Mercado Libre,» [En línea]. Available:
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-563049497-motorreductor-baldor-115-hp-90-vdc-ratio-6001-4rpm-175inlb-_JM. [Último acceso: 26 05 2018].

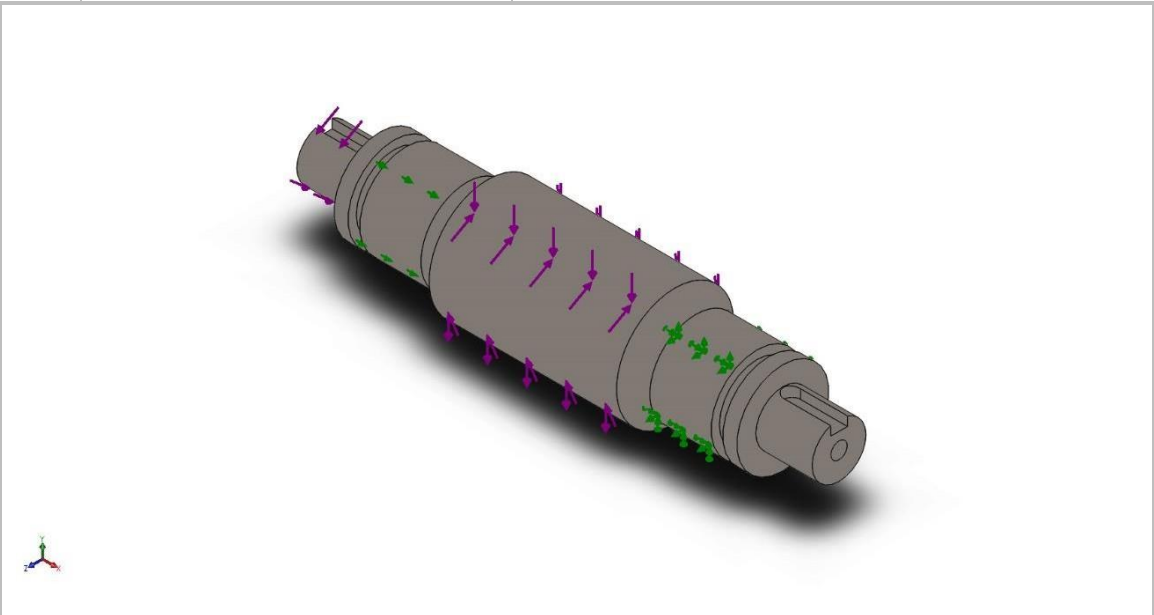
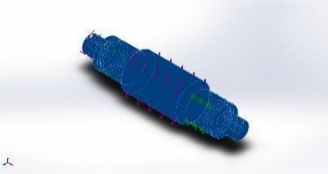
Anexos

Anexo 1. Código de cálculo de cortante y momento simples

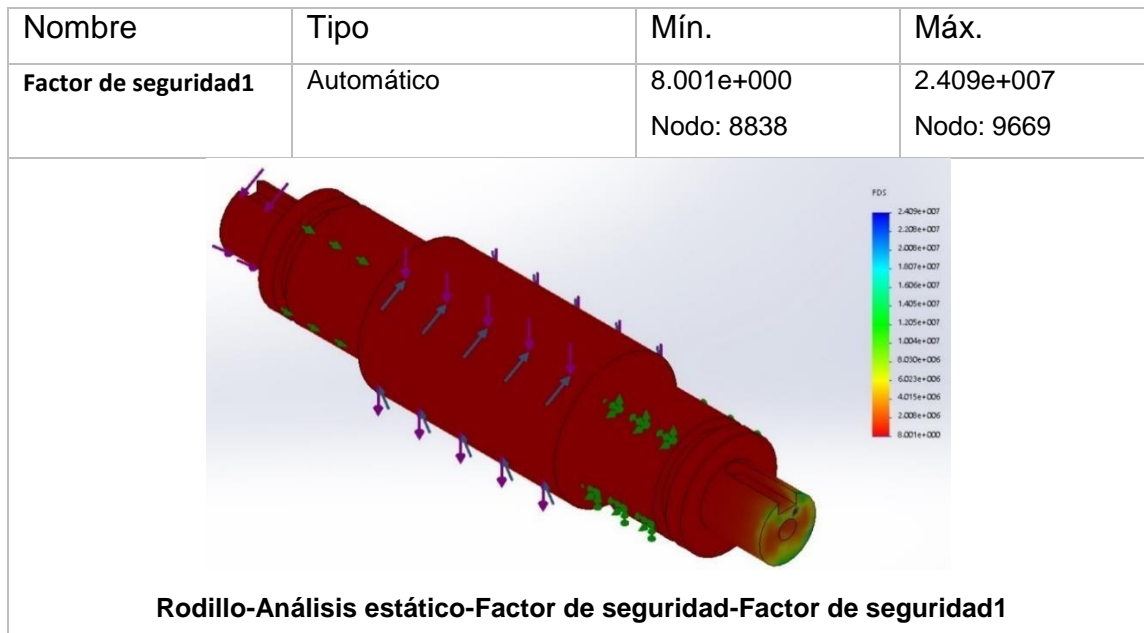
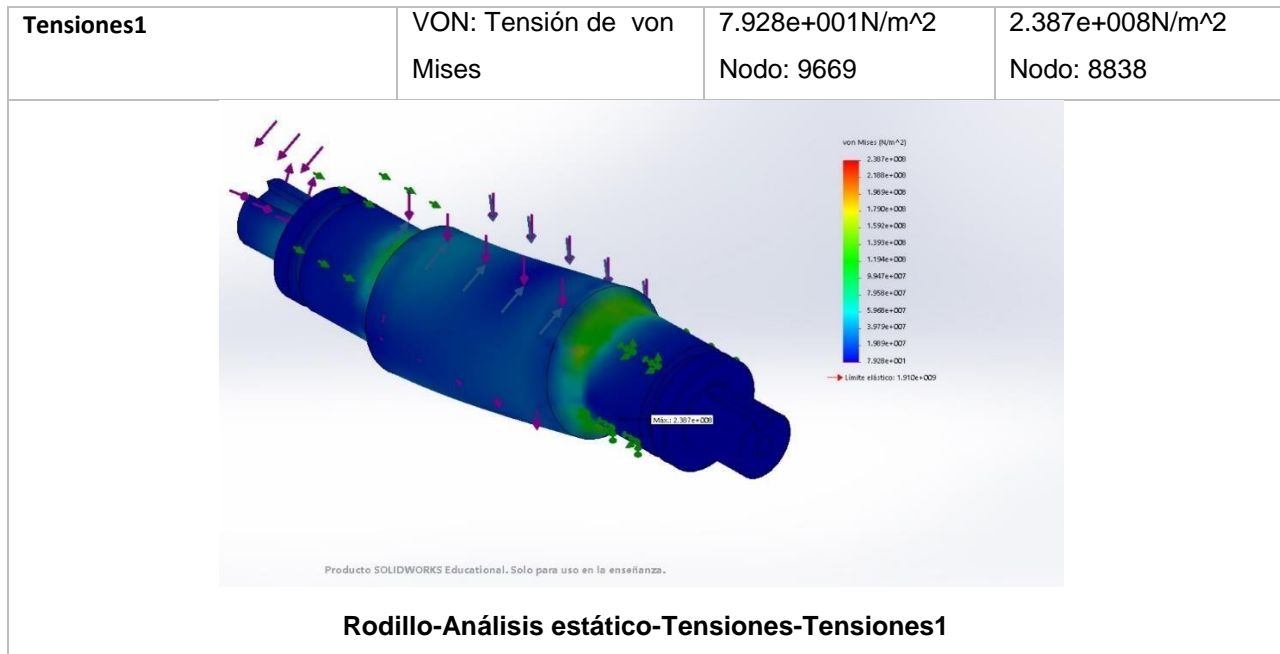
```
// Define el cortante y el momento de flexion simples
function y=u(t, a, n) // u(variable, donde empieza, exponente)
    y=(t-a>=0).*(t-a).^n;
endfunction
A=%pi*((25)^2);
F=698;
R=25*F;
L0 =0052.5;    // Ray
L1 =0085;      // Inicio de carga
L2 =0135;      // Fin de carga
L3 =0167.5;    // Roy
L4 =0220;
x0=0:L0/9:L0;
x1=L0:(L1-L0)/9:L1;
x2=L1:(L2-L1)/9:L2;
x3=L2:(L3-L2)/9:L3;
x4=L3:(L4-L3)/9:L4;
x=[x0,x1,x2,x3,x4];
v= -F*u(x,L1,1) +F*u(x,L2,1) +R*u(x,L3,0)+R*u(x,L0,0);
m= -F*u(x,L1,2)/2+F*u(x,L2,2)/2+R*u(x,L3,1)+R*u(x,L0,1);
///subplot(2,1,1)
//xlabel("Distancia(mm)");
//ylabel("Esfuerzo cortante (N)");
//plot(x,v)
//subplot(2,1,2)
xlabel("Distancia(mm)");
ylabel("Momento flexionante (N*mm)");
plot(x,m)
a1=max(v);
a2=max(m);
tao_v=4*(v)/(3*(A));
sig_f=32*(m)/(A^25);
a3=max(tao_v);
a4=max(sig_f);
```

Anexo 2. Análisis estático de rodillo inferior

Información de modelo

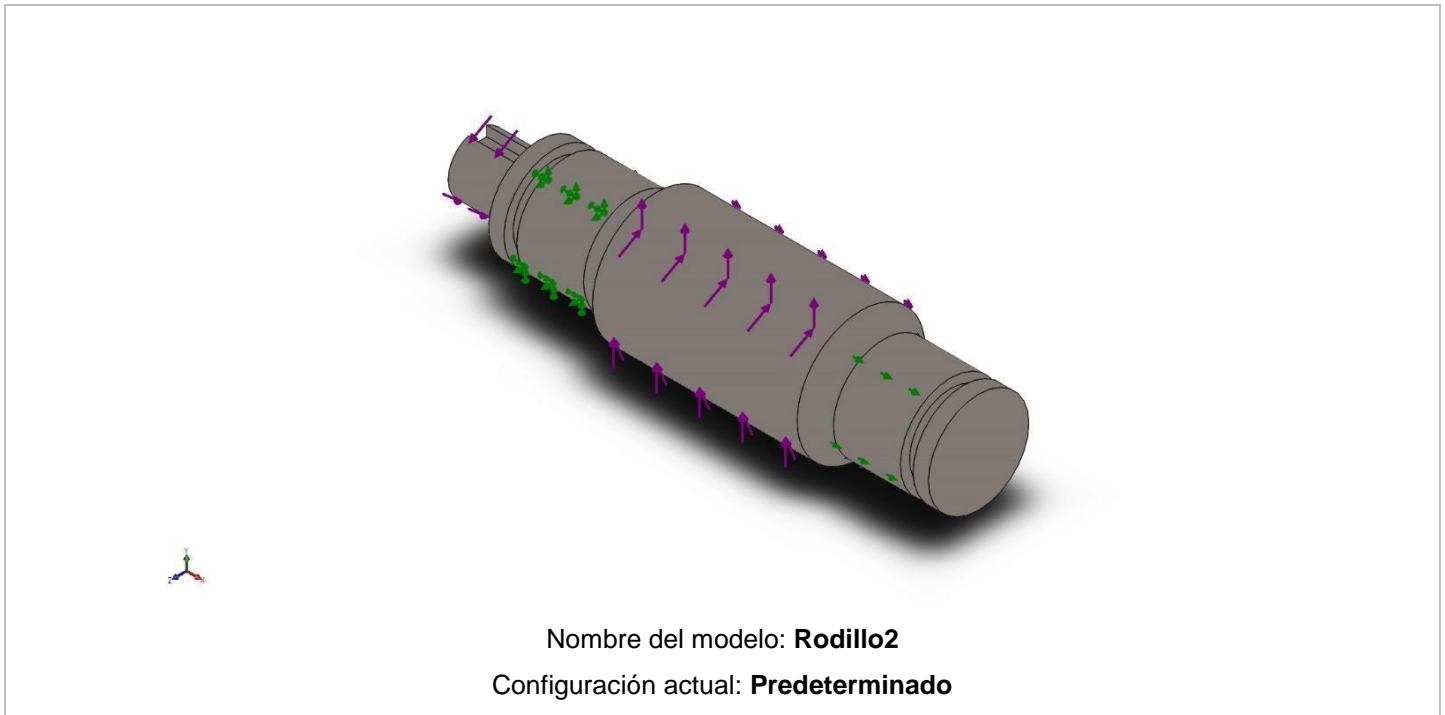
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
	 <p data-bbox="656 1083 992 1115">Nombre del modelo: Rodillo</p>		
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Fecha de modificación
<p data-bbox="191 1278 383 1310">Cortar-Extruir3</p> 	<p data-bbox="578 1278 662 1310">Sólido</p>	<p data-bbox="881 1278 1073 1310">Peso:21.7668 N</p>	<p data-bbox="1222 1278 1495 1310">May 19 18:39:04 2018</p>

Resultados del estudio




Anexo 3. Análisis estático de rodillo superior

Información de modelo

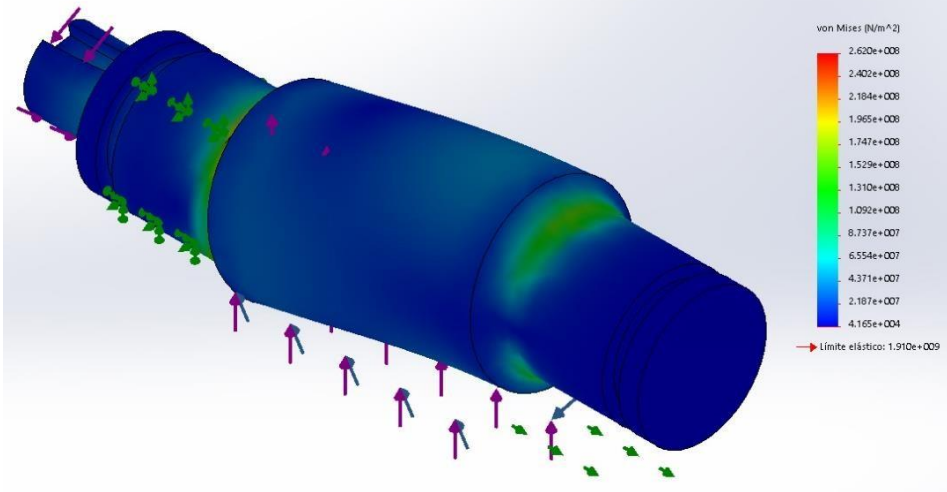


Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Fecha de modificación
Rosca1 	Sólido	Peso:21.1483 N	May 19 13:34:04 2018

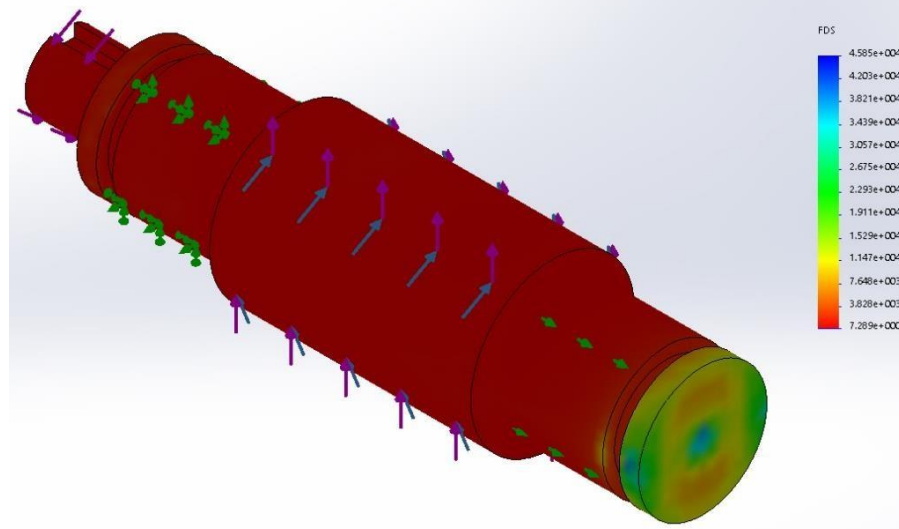
Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	4.165e+004N/m ² Nodo: 5746	2.620e+008N/m ² Nodo: 14153



Rodillo2-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	7.289e+000 Nodo: 14153	4.585e+004 Nodo: 5746



Rodillo2-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad1

Anexo 4. Plano de rodillo superior

Anexo 5. Plano de rodillo inferior

Anexo 6. Plano de tornillo de desplazamiento vertical

Anexo 7. Plano de base de motor a pasos

Anexo 8. Plano de cople

Anexo 9. Plano de bases de motor principal y laminadora

Anexo 10. Plano de caja para circuitería

Anexo 11. Plano de mesa de laminadora

Anexo 12. Vista explosionada de sistema

Anexo 13. Datos de motorreductor

MODEL: N.5018OS1PA56C		12165981		WEG		
ARRANQUE POR CAPACITOR						
15AGO18	~1	W56C	kW (CP) 0.373 (1/2)			
	min^{-1} 1740		SERVICIO S1			
	127/220 V		60 Hz	FS 1.25		
	10.8/4.6 A	AISL CL B	AMB MAX 40°C			
	AFS11.2/4.9 A	ABIERTO	CLAVE KVA/CP P	T1 Azul	T2 Blanco	T3 Naranja
	η_{127} 57.5%	MODELO MSL1J		T4 Amarillo	T5 Negro	T8 Rojo
PARA ALTERAR LA ROTACIÓN CAMBIAR T5 POR T8						
PRECAUCIÓN						
EL MOTOR DEBE SER ATERRIZADO DE ACUERDO CON LAS NORMAS NACIONALES PARA PREVENIR CHOQUE ELECTRICO. IMPORTANTE LEER EL INSTRUCTIVO DE INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SU MOTOR.						

WORM SPEED REDUCER	
Model:	NMRV
Spec:	63
Ratio:	1:100
Code:	18 03