



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA
TREFILADORA CON SISTEMA REBOBINADOR DE ALAMBRE
CONTINUO PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE
MANUFACTURA**

**AUTORES: CHICAIZA ROCHA, MAGALY NOEMÍ
MORALES IZA, CARLOS LUIS**

DIRECTOR: MG. CORTEZ PAZMIÑO, BYRON HERNÁN

SANGOLQUÍ

2019



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TREFILADORA CON SISTEMA REBOBINADOR DE ALAMBRE CONTINUO PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA”***, fue realizado por los señores ***CHICAIZA ROCHA, MAGALY NOEMÍ*** y ***MORALES IZA, CARLOS LUIS***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizando por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de junio de 2019



Mg. Cortéz Pazmiño, Byron Hernán

DIRECTOR

CC: *174471021*



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CHICAIZA ROCHA, MAGALY NOEMÍ** y **MORALES IZA, CARLOS LUIS**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TREFILADORA CON SISTEMA REBOBINADOR DE ALAMBRE CONTINUO PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 04 de julio de 2019

Firman:

Chicaiza Rocha

Magaly Noemí

CC. 1727500173

Morales Iza

Carlos Luis

CC. 1723034904



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *CHICAIZA ROCHA, MAGALY NOEMÍ* y *MORALES IZA, CARLOS LUIS*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TREFILADORA CON SISTEMA REBOBINADOR DE ALAMBRE CONTINUO PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 04 de julio de 2019

Firman:

Chicaiza Rocha

Magaly Noemi

CC. 1727500173

Morales Iza

Carlos Luis

CC. 1723034904

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres Enma y Luis quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional me permitieron cumplir una meta más en mi vida. A mis hermanos, Maritza, Sonia y Alexander, que me dieron ánimo y fortaleza para seguir adelante. A mi familia por haberme apoyado en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Magaly Chicaiza

A Dios:

Que me brindo toda la armonía, sabiduría e inteligencia para realizar con trabajo y firmeza este logro, y lo recibo con humildad e inmensa alegría.

A mis Padres:

Como testimonio de gratitud y eterno agradecimiento por mi existencia, porque sin escatimar esfuerzos se han sacrificado para educarme, formarme y darme su amor en abundancia, y así, poder culminar con éxito esta nueva etapa de mi vida.

A mi hija Camilita:

Que me brindo un amor distinto, un amor genuino el cual no tiene condición y siempre recordarme el camino que tenía que atravesar para alcanzar este logro.

A mi Familia y Amigos:

Decirles que mi triunfo es también vuestro.

Carlos Morales

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, quien como guía estuvo presente en mi caminar, bendiciéndome y dándome fuerzas para culminar una etapa más de mi vida.

Agradezco a mis padres, por su ayuda tanto económica como emocional. Gracias por sus consejos y regaños porque ellos fueron los que me hicieron ser mejor persona.

A mis hermanos y sobrino por brindarme cada día una sonrisa que me motivaron a esforzarme y cumplir con este sueño.

A Andrés por haber sido mi apoyo cuando más lo necesitaba.

A mis amigos y compañeros por todos los momentos de alegrías y tristezas.

De igual manera al ingeniero Byron Cortez, director de tesis, por motivarnos y brindarnos su conocimiento en el desarrollo de este proyecto.

Magaly Chicaiza

A Dios:

Quien ha prometido estar conmigo en todo tiempo y lo ha cumplido, quien me ha dado las fuerzas necesarias para cumplir uno de mis sueños, quien me ha sostenido firme en cada decisión de mi vida.

A mis padres, Jaime y María:

Los cuales desde el inicio de este sueño han dado lo mejor y han hecho hasta lo imposible por verme salir adelante, por enseñarme que para alcanzar un sueño demanda de mucho sacrificio, pero hay que ser constante, perseverante, pero sobre todo humilde.

A mi esposa, Victoria:

Por su apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo tiernas y firmes a la vez, por soportar esta larga travesía llena de limitaciones y enseñarme que el amor todo lo puede y todo lo soporta.

A mis hermanos, Jorge, Yesenia, Jaime, Mayra, Kevin y Janeth

Por su apoyo incondicional hacia mi hija, sus cuidados y consentimientos cuando no tenía los recursos para hacerlo, por enseñarme que una familia unida siempre estará ahí para ayudarte.

A los ingenieros, Byron Cortéz, Byron Guerrero, Lenin Abatta:

Quienes fueron soporte en el desarrollo de esta tesis, pues con sus conocimientos y experiencia solventaron nuestras inquietudes.

A las empresas, Incorea S.A., Filtros del valle, Andesupply:

Quienes han contribuido con su experiencia.

Carlos Morales

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación e importancia	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 Alcance	4
1.6 Contenido del documento.....	5
ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Generalidades del proceso de conformado.....	7
2.2 Deformación volumétrica.....	7

2.3	Proceso de Trefilado.....	8
2.3.1	Parámetros de Trefilado	9
2.3.2	Dados para trefilado	15
2.3.3	Sistema de Lubricación	15
2.4	Resumen	19
CAPÍTULO III.....		21
METODOLOGÍA Y SELECCIÓN.....		21
3.1	Casa de la Calidad	21
3.1.1	Voz del usuario.....	21
3.1.2	Voz del ingeniero	21
3.1.3	Resultados	22
3.2	Análisis funcional.....	23
3.2.1	Definición de las funciones primarias y secundarias	23
3.2.2	Determinación modular.....	25
3.2.3	Solución modular	26
3.2.4	Módulo 1 – Preparación de alambre	26
3.2.5	Módulo 2 – Abastecimiento de alambre	28
3.2.6	Módulo 3 – Sistema de control	29
3.2.7	Módulo 4 – Sistema de Lubricación	30
3.2.8	Módulo 5 – Cámara de trefilado	36
3.2.9	Módulo 6 – Materia prima y herramienta	38
3.3	Resumen	44
CAPÍTULO IV		45
DISEÑO.....		45

4.1	Diseño mecánico	45
4.1.1	Parámetros de diseño.....	46
4.1.2	Cálculo de diámetros de los dados	48
4.1.3	Cálculo de potencia de motor.....	48
4.1.4	Cálculo de velocidad de trefilado.....	51
4.1.5	Cálculo de diámetros de las poleas	52
4.1.6	Diseño de ejes.....	53
4.1.7	Selección de las chumaceras	60
4.1.8	Diseño de sistema de lubricación	62
4.1.9	Diseño estructural.....	68
4.2	Diseño electrónico	69
4.3	Resumen	71
CAPÍTULO V		73
CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS		73
5.1	Construcción de maquina trefiladora.....	73
5.2	Pruebas y resultados	76
5.2.1	Aspecto de material.....	79
5.2.2	Medición de diámetro final del alambre	79
5.2.3	Ensayo de tensión de alambre	80
5.2.4	Ensayo de dureza.....	82
5.2.5	Velocidad de proceso	82
5.2.6	Longitud final de alambre	83
5.3	Resumen	83
CAPÍTULO VI		85

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
6.1 Conclusiones	85
6.2 Recomendaciones.....	86
6.3 Trabajos futuros.....	87
BIBLIOGRAFÍA	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Sistemas de proceso de trefilado.</i>	4
Tabla 2 <i>Ventajas y desventajas del conformado en frío</i>	8
Tabla 3. <i>Ángulo de reducción de dado de trefilado</i>	15
Tabla 4. <i>Alternativas para reducir diámetro de alambre manualmente.</i>	27
Tabla 5. <i>Alternativas para abastecer alambre al proceso.</i>	28
Tabla 6. <i>Alternativas para definir el lubricante a emplear en el proceso de trefilado.</i>	31
Tabla 7. <i>Matriz de Hales para selección del lubricante</i>	31
Tabla 8. <i>Alternativas para definir la bomba a emplear en el proceso de trefilado.</i>	33
Tabla 9. <i>Matriz de Hales para selección de bomba para la recirculación de lubricante.</i>	34
Tabla 10. <i>Alternativas para definir la configuración de la máquina trefiladora</i>	36
Tabla 11. <i>Matriz de Hales para selección de sistema de trefilado</i>	37
Tabla 12. <i>Alternativas para definir la materia prima a trefilar</i>	38
Tabla 13. <i>Matriz de Hales para selección del material a trefilar</i>	40
Tabla 14. <i>Alternativas para definir el material de los dados</i>	41
Tabla 15. <i>Matriz de Hales para selección de material para los dados</i>	42
Tabla 16. <i>Características de motorreductor Transtecno</i>	46
Tabla 17. <i>Parámetros iniciales de diseño</i>	47
Tabla 18. <i>Diámetro de dados de carburo de tungsteno a adquirir</i>	48
Tabla 19. <i>Cálculo de Fuerza requerida para trefilar alambre de aluminio 1350</i>	50
Tabla 20. <i>Cálculo de diámetro de eje M</i>	57
Tabla 21. <i>Cálculo de diámetro de eje C</i>	59
Tabla 22. <i>Datos del fluido lubricante</i>	63
Tabla 23. <i>Tabla de NPS, espesor y cédula de tubería</i>	64

Tabla 24. <i>Coeficientes de perdida de carga en accesorios.</i>	66
Tabla 25. <i>Descripción de funciones de los componentes electrónicos</i>	70
Tabla 26. <i>Características de variador de frecuencia Sinamics G110</i>	71
Tabla 27. <i>Actividades realizadas para la construcción de la máquina.</i>	73
Tabla 28. <i>Mediciones tomadas en 5 metros de longitud de alambre trefilado.</i>	79
Tabla 29. <i>Resultados de ensayo a tracción, alambre sin trefilar</i>	81
Tabla 30. <i>Resultados de ensayo a tracción, alambre trefilado diámetro 4.02 mm</i>	81
Tabla 31. <i>Resultados de ensayo de dureza</i>	82
Tabla 32. <i>Velocidad con carga - Alambre trefilado diámetro final 4.02 mm</i>	82
Tabla 33. <i>Resultados de ensayo a tracción, alambre sin trefilar</i>	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Trefiladora inhabilitada, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.</i>	2
Figura 2. <i>Sistema de abastecimiento</i>	4
Figura 3. <i>Sistema de trefilado</i>	4
Figura 4. <i>Sistema de rebobinado</i>	5
Figura 5. <i>Proceso de trefilado</i>	9
Figura 6. <i>Propiedades de los materiales vs. Trabajo en frío.</i>	10
Figura 7. <i>Diagrama de cuerpo libre de proceso de trefilado</i>	11
Figura 8. <i>Ilustración: (a) Trabajo uniforme, (b) por fricción, (c) no uniforme.</i>	12
Figura 9. <i>Terminología de un dado para trefilado</i>	15
Figura 10. <i>Sistema de lubricación</i>	16
Figura 11. <i>Matriz QFD</i>	22
Figura 12. <i>Nivel 0. Diagrama funcional primario</i>	24
Figura 13. <i>Nivel 1. Diagrama funcional 1</i>	24

<i>Figura 14.</i> Nivel 2. Diagrama funcional 2.....	25
<i>Figura 15.</i> Nivel 2. Detalle de diagrama funcional 2	26
<i>Figura 16.</i> Sacapuntas de alambre	27
<i>Figura 17.</i> Limado de alambre	27
<i>Figura 18.</i> Equipo de estirado de alambre.....	28
<i>Figura 19.</i> Torre guía de abastecimiento de alambre.	28
<i>Figura 20.</i> Rodillos seguidores.....	29
<i>Figura 21.</i> Control lazo abierto de máquina trefiladora de alambre	29
<i>Figura 22.</i> Bomba de DP, engranajes externos helicoidales.....	33
<i>Figura 23.</i> Bomba de DP, de lóbulo rotatorio.	34
<i>Figura 24.</i> Bomba de DP rotatoria de paletas.	34
<i>Figura 25.</i> Trefiladora con sistema múltiple continuo	36
<i>Figura 26.</i> Trefiladora con sistema múltiple de acumulación	36
<i>Figura 27.</i> Trefiladora con sistema múltiple compensado	37
<i>Figura 28.</i> Alambre de acero recocido	39
<i>Figura 29.</i> Alambre de Aluminio 99%	39
<i>Figura 30.</i> Alambre de Cobre 99.9%	39
<i>Figura 31.</i> Barras de latón	39
<i>Figura 32.</i> Dados de carburo de tungsteno.....	41
<i>Figura 33.</i> Dados e insertos de diamante policristalino	42
<i>Figura 34.</i> Acero K100.....	42
<i>Figura 35.</i> Diseño preliminar	44
<i>Figura 36.</i> Diseño a detalle de máquina trefiladora.	45
<i>Figura 37.</i> Cámara de trefilado.....	51

Figura 38. Ejes A y B con poleas principales	52
Figura 39. Esquema de cámara de trefilado.....	53
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de eje B	53
Figura 41. Diagrama de momentos de eje B	54
Figura 42. Esquema de eje a la salida del motorreductor	56
Figura 43. Diagrama de cuerpo libre de eje M.....	57
Figura 44. Diagrama de momentos de eje M	57
Figura 45. Esquema de eje de motor	58
Figura 46. Esquema de ejes guía.....	58
Figura 47. Diagrama de cuerpo libre de eje C	59
Figura 48. Diagrama de momentos de eje C	59
Figura 49. Selección de chumacera de pared.....	61
Figura 50. Selección de chumacera de pared.....	62
Figura 51. Tuberías válvulas y accesorios del sistema hidráulico	63
Figura 52. Dimensionamiento de sistema de lubricación	65
Figura 53. Pendiente para evacuación de lubricante	68
Figura 54. Estructura base de máquina trefiladora.....	68
Figura 55. Resultado de análisis de la estructura utilizando elementos finitos.....	69
Figura 56. Detalle de diseño electrónico de máquina trefiladora de alambre	70
Figura 57. Diseño a detalle de máquina trefiladora	71
Figura 58. Máquina trefiladora de alambre lista	76
Figura 59. Primer paso en el proceso de trefilado.....	76
Figura 60. Pasos para trefilar alambre.....	78
Figura 61. Aspecto del alambre luego del proceso de trefilado	79

Abreviaturas

$\%TF$	→	Porcentaje de trabajo en frío
A_o	→	Área inicial
A_f	→	Área final
r	→	Porcentaje de deformación en el material
D_o	→	Diámetro al ingreso del dado
D_f	→	Diámetro a la salida del diámetro
σ_T	→	Esfuerzo de trefilado final
W_u	→	Trabajo uniforme
W_r	→	Trabajo redundante
W_f	→	Trabajo por fricción
σ_p, Y_f	→	Esfuerzo de fluencia promedio
ϕ	→	Factor de redundancia o de no homogeneidad
D_p	→	Diámetro promedio del alambre durante el trefilado
L_c	→	Longitud de contacto entre el dado y el alambre
μ	→	Coefficiente de fricción entre la pieza de trabajo y el dado
ε	→	Deformación real
α	→	Semiángulo del dado de trefilado
F_t	→	Fuerza necesaria para trefilar
$\%red$	→	Porcentaje de reducción de alambre
P_t	→	Potencia total
P_N	→	Potencia Neta
e	→	Eficiencia
T	→	Torque
P	→	Potencia
M	→	Momento, Nm
W	→	Velocidad angular (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5)
v	→	Velocidad lineal (v_1, v_2, v_3, v_4)
r_p	→	Radio de polea
Se'	→	Límite de resistencia a fatiga
S_y	→	Esfuerzo de fluencia
S_{ut}	→	Esfuerzo último
Se	→	Límite de resistencia a fatiga corregido
K_f	→	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga
K_{ts}	→	Factor de concentración de esfuerzos por torsión
N_f	→	Factor de seguridad
M_C	→	Momento crítico
d_A	→	Diámetro de eje A
C_{10}	→	Carga nominal dinámica
F_D	→	Carga radial aplicada a la chumacera
n_D	→	Velocidad deseada en rpm
L_D	→	Vida deseada en horas
L_{10}	→	Vida nominal
a	→	Factor constante
V	→	Velocidad del fluido
D	→	Diámetro hidráulico de la tubería

h_L	→	Alturas de pérdidas por fricción
f	→	Factor de fricción de la tubería
g	→	Aceleración gravitacional
K_L	→	Coefficientes de pérdidas en distintos accesorios o válvulas.
Re	→	Número de Reynolds
TDH	→	Cabeza Total de descarga
P_2	→	Presión del fluido a la salida de la bomba
P_1	→	Presión del fluido a la entrada de la bomba
Δp_f	→	Presión por pérdidas de fricción
v_1	→	Velocidad del fluido al ingreso de la bomba
v_2	→	Velocidad del fluido a la salida de la bomba
$NPSH_a$	→	Cabeza neta de succión disponible
p_{vp}	→	Presión de vapor de fluido
h_1	→	Altura de fluido respecto a un punto de referencia
h_{succ}	→	Altura de línea de centros de la boca de succión de la bomba
ρ	→	Densidad del fluido
μ	→	Viscosidad dinámica
ν	→	Viscosidad cinemática
D	→	Diámetro exterior
d	→	Diámetro interior
e	→	Espesor de tubería
L	→	Longitud de tramo de tubería recta
$h_{L, mayor}$	→	Pérdidas mayores de fricción
$h_{L, menor}$	→	Pérdidas menores de fricción
τ_{adm}	→	Esfuerzo cortante admisible
F	→	Fuerza
L_0	→	Longitud inicial

RESUMEN

La necesidad de mostrar uno de los procesos de conformado en frío en el Laboratorio de procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, hizo que se plantee diseñar y construir una máquina trefiladora de alambre que cuente con un sistema de rebobinado continuo, la materia prima a utilizarse es alambre de aluminio por ser un material bastante flexible y muy usado en la fabricación de cables eléctricos. Uno de los componentes principales es el dado o matriz, el cual fue adquirido de carburo de tungsteno, con un semiángulo de ataque de 20°. El lubricante seleccionado es aceite SAE 40 dando buenos resultados al obtener como producto final, alambre brillante y de superficie lisa sin porosidades. El equipo diseñado puede trefilar alambre de aluminio 1350 de diámetro de 4.85 mm hasta 3.1 mm utilizando dos juegos de dados; con el primer par se reduce hasta un 25 % y el segundo caso un 26% de sección. Además, consta de un sistema de recolección capaz de enrollar 100 metros de alambre con un rango de velocidad de 1.678 m/min a 9.987 m/min. Finalmente, se comprobó que luego de pasar por la máquina trefiladora, el alambre presenta un incremento en el esfuerzo de fluencia y en la dureza.

PALABRAS CLAVE:

- **TREFILADO**
- **CONTROL**
- **REBOBINADO**
- **LUBRICACIÓN**

ABSTRACT

The need to show one of the cold shaping processes in the Manufacturing Process Laboratory of the Armed Forces University “ESPE”, led to the idea of designing and building a wire drawing machine. It has a continuous rewinding system, the raw material is aluminum wire because it is a very flexible material and widely used in the manufacture of electric cables. One of the main components is die or matrix, it was acquired from tungsten carbide material, and the attack angle is 20° . The selected lubricant is SAE 40 oil giving good results as shiny wire, smooth surface and without porosities. The designed equipment can wire drawing 1350 aluminum wire diameter from 4.85 mm up to 3.1 mm using two sets of dies; in the first pair, it is reduced up to 25% and the second case a 26% section. In addition, it consists of a collection system capable of winding 100 meters of wire with a speed range of 1,678 m/min to 9,987 m/min. Finally, it was proved that after wire drawing, the wire changes its mechanical properties. The tension and hardness increase.

KEYWORDS:

- **THREADED**
- **CONTROL**
- **REWIND**
- **LUBRICATION**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El capítulo pretende explicar la necesidad de diseñar y construir una máquina trefiladora. En el contexto se justifica la importancia que tiene para el Laboratorio de Procesos de Manufactura y se plantea el problema que conlleva a su construcción, los objetivos y alcance del proyecto.

1.1 Planteamiento del problema

Los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica requieren conocer de los procesos de conformado en frío; de forma teórica y práctica. Uno de ellos es el trefilado, el cual es aplicado en la industria dentro del país.

El Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” no cuenta con una máquina trefiladora de alambre, que permita mostrar de forma práctica la deformación volumétrica en materiales no ferrosos. Por estos motivos se ha visto necesario diseñar y construir una máquina que trefile continuamente alambre y permita realizar reducción de diámetro de alambre, utilizando dos dados con un mismo estirado. Con la máquina habilitada se podrá realizar prácticas de trefilado variando la velocidad.

1.2 Antecedentes

El departamento de Energía y Mecánica tiene como visión proporcionar e implantar alternativas de solución a los problemas de la colectividad en lo referente a las áreas de energía, Mecánica y Mecatrónica. Para ello dispone del Laboratorio de Procesos de Manufactura, en el cual se realizan prácticas académicas de procesos como soldadura y mecanizado.

Debido al acelerado avance tecnológico, obliga a que la preparación de los estudiantes sea cada vez más integral, razón por la cual los señores Juan Guachamín y Gabriel Betancourt (Guachamín & Betancourt, 2014), en el año 2014 plantearon diseñar y construir un equipo de trefilado de materiales no ferrosos (ver *Figura 1*), con el propósito de mejorar la formación

profesional de los estudiantes y así reforzar de una forma práctica los conocimientos adquiridos teóricamente. El equipo trefila en frío metales no ferrosos, reduciendo la sección transversal de una barra, al tirar del material al introducirlo en un dado o hilera.



Figura 1. Trefiladora inhabilitada, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Fuente: (Guachamín & Betancourt, 2014)

A nivel nacional, no se han desarrollado diseños, ni construcciones de máquinas trefiladoras, pero se ha logrado identificar la existencia de algunas investigaciones efectuadas sobre el proceso de trefilado mencionado a continuación:

Wilson Alberto León Qilli (León Quili, 2011) en su proyecto de tesis describe por medio de documentos fotográficos el tipo de fallas superficiales de no conformidad del producto, donde se halló que la causa principal para inducir las fallas estaban relacionadas con las deficiencias del uso del aceite lubricante, sin poder realizar o efectuar prueba alguna en la máquina trefiladora, se utilizó una laminadora de laboratorio para simular el proceso de trefilación, ensayando cambios en los parámetros de laminación, posteriormente se ensayaron tipos de lavado y se tuvieron probetas planas de aspecto impecable. En base a la investigación se recomendó un nuevo esquema de producción basados en la utilización de una caja de lavado, ubicada entre la trefiladora y el horno de recocido, así también recurrir a las técnicas de laboratorio que ha desarrollado la Empresa Intramet, donde se realizó la Investigación.

Por otra parte, en la empresa Andec S.A. Jorge Luis Regalado Quimis (Regalado Quimis, 2010), realizó su proyecto de grado en el cual concluye que el problema predominante, es el

desaprovechamiento de la capacidad instalada, en los márgenes de producción. Lo anterior se debe a la limitación que se presenta por las características de los rollos de alambón, cuya relación con el crecimiento de la demanda, demostraba un distanciamiento considerable que evidenciaba un desequilibrio entre las aspiraciones y metas de la parte comercial con la capacidad de respuesta del área en cuestión.

1.3 Justificación e importancia

Considerando que el Laboratorio de Procesos de Manufactura no cuenta con un equipo de trefilado funcional que permita a los estudiantes realizar prácticas que refuercen los conocimientos de procesos de conformado en frío empleados en la industria. Se proyecta diseñar y construir un equipo de trefilado con sistema recolector de alambre continuo semejante a las máquinas utilizadas en la producción industrial de alambre.

Se tiene como base teórica, el proyecto de Tesis realizado por Juan Guachamín y Luis Betancourt (Guachamín & Betancourt, 2014). La máquina realizaba de manera didáctica, la reducción de diámetro de alambre en un solo paso con determinada longitud y operando a diferentes velocidades con o sin carga, en función del tipo de material a trefilar. Esta máquina en la actualidad se encuentra fuera de uso.

Así también, con el desarrollo de este proyecto se pretende generar interés en la sociedad de invertir en industrias manufactureras dedicadas a la trefilación de alambre, dando paso al progreso industrial del mismo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir una máquina trefiladora con sistema rebobinador de alambre continuo para el laboratorio de Procesos de Manufactura

1.4.2 Objetivos Específicos

Se presenta a continuación, los objetivos específicos que ayudarán a cumplir en su totalidad el objetivo principal:

- Elaborar el diseño mecánico y electrónico del sistema de trefilado, abastecimiento y recolección del alambre.
- Construir la máquina trefiladora en base al diseño previamente elaborado.
- Realizar pruebas de funcionamiento de la maquinaria construida.
- Analizar mediante un ensayo de tensión la resistencia del producto antes y después del proceso de trefilado en la máquina construida.

1.5 Alcance

El presente proyecto plantea diseñar y construir una máquina trefiladora de materiales no ferrosos (como aluminio, cobre, etc.), y que conste de los siguientes sistemas: sistema de abastecimiento de alambre, sistema de trefilado y sistema rebobinador de alambre continuo, sus características se describen en la *tabla 1*.

Tabla 1.

Sistemas de proceso de trefilado.


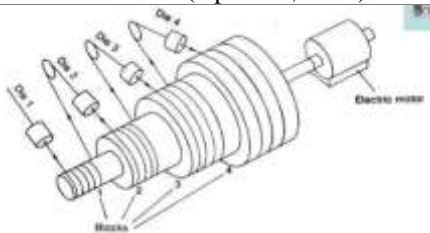
SISTEMA	DETALLE	DESCRIPCIÓN
De Abastecimiento		Se realizará la selección más óptima que permita la adecuada alimentación de alambre al sistema de trefilado.
De Trefilado		Para su construcción se elaborará el diseño del sistema considerando que el equipo conste de un conjunto de seguidores o poleas y dados ubicados estratégicamente en una cámara trefiladora, debiendo existir un sistema de lubricación que permita disminuir el rozamiento entre los dados y el material no ferroso (aluminio o cobre).

Figura 2. Sistema de abastecimiento

Fuente: (Oposinet, 2016)

Figura 3. Sistema de trefilado

Fuente: (Atienza Riera, 2001)

Continúa →

Rebobinador



El sistema recolector de alambre será realizado bajo un diseño que permita enrollar el alambre trefilado de manera continua en un carrete transportable.

Figura 4. Sistema de rebobinado

Fuente: (Group, s.f.)

El producto final será un equipo de trefilado semiautomático que rebobina alambre continuamente. También se elaborará una guía de práctica y un manual de usuario que incluye un plan de mantenimiento general permitiendo que la máquina opere en óptimas condiciones por un largo periodo.

Con la máquina se realizarán prácticas de trefilado cambiando dados, usando diferentes materiales no ferrosos (como cobre, aluminio, etc.), se analizará la carga que requiere para reducir un determinado diámetro de alambre, la velocidad del motor, porcentaje de reducción entre otros. El alambre trefilado podrá ser caracterizado mediante ensayos metalúrgicos, de tensión y de dureza.

1.6 Contenido del documento

El documento se compone de seis capítulos, en los cuales se describirá y mostrará a manera de resumen los pasos desarrollados para el diseño y construcción de la máquina de trefilado.

El capítulo II se mostrará generalidades del proceso de trefilado, como: velocidad de trefilado, ángulo de entrada y salida en los dados, ecuaciones que permiten determinar la carga total de trefilado y sistema de lubricación.

En el capítulo III en base a la metodología de Diseño Concurrente, de forma modular, se seleccionará los componentes necesarios para diseñar y construir una máquina trefiladora. Entre otros componentes se mencionará: lubricante, bomba, material para los dados, estructura y alambre.

El capítulo IV cubrirá el diseño mecánico de cada uno de los sistemas seleccionados que conforman la máquina de trefilado. También se detallará la distribución de control electrónico, teniendo en cuenta el diseño, se realizarán los planos de construcción.

El capítulo V abarcará la construcción de la máquina trefiladora y las pruebas de funcionamiento. Con el alambre trefilado se caracterizará los resultados realizando ensayos mecánicos.

Por último, en el capítulo VI, se analizarán los resultados de las pruebas, detallándolos en conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades del proceso de conformado

Una característica importante de los metales es la ductilidad, ya que mediante procesos de conformado permite obtener piezas de geometría distinta. El proceso de conformado usa como herramienta principal un dado de conformación, el cual ejerce esfuerzos sobre el material haciendo que tome la forma del dado, esto se debe a que el material es sometido a una deformación plástica, que hace que cambie su forma de manera permanente.

El conformado de metales se puede clasificar de tres formas: considerando la geometría del metal, mediante procesos de formado o preformado de láminas de metal y procesos de deformación volumétrica; tomando en cuenta la temperatura del proceso, en trabajo en frío o caliente y dependiendo de la etapa en la que se halle el material, en proceso primario y secundario. Todos estos métodos de clasificar el conformado pueden relacionarse entre sí, acorde a la materia prima y producto final que se desee obtener.

En este proyecto se considerará el conformado de metales realizando un trabajo en frío, y deformando volumétricamente alambre.

Hay que tener en cuenta al momento de elegir un material para conformar, que éste debe poseer bajo límite de fluencia y alta ductilidad.

2.2 Deformación volumétrica

En general los procesos de deformación volumétrica provocan deformaciones significativas en la geometría de los metales. La materia prima en un inicio presenta forma más voluminosa que laminar.

Los procesos básicos que permiten deformar volumétricamente un material son: laminado, forja, extrusión y trefilado. Estos procesos pueden ser operados en frío o en caliente, teniendo en cuenta lo siguiente:

Trabajo en frío: Se puede realizar a temperaturas iguales o menores a la temperatura ambiente, con lo que se tendrá mayor precisión, mejor acabado superficial y de igual forma control de las propiedades mecánicas. Otras de las características de esta operación se detallan en la *tabla 2*.

Tabla 2
Ventajas y desventajas del conformado en frío

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mejor precisión al elaborar las piezas. • Mínimas tolerancias. • Excelentes acabados superficiales. • Menor consumo de energía • Aumento de propiedades de resistencia y dureza • Posibilidades de obtener propiedades de dirección deseadas en el producto final. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de mayor fuerza y potencia. • Disminuye la ductilidad del material. • Incrementa la resistencia a la tensión.

Fuente: (Askeland)

Trabajo en caliente: Se trabaja con temperaturas sobre la recristalización del material, consiguiendo con esto grandes deformaciones al aplicar menores cargas.

2.3 Proceso de Trefilado

Consiste en hacer pasar alambrón (alambre de alta resistencia que proviene de un proceso de laminado en caliente) por una serie de hileras de diámetros progresivamente inferiores hasta alcanzar el diámetro final deseado, generalmente se trabaja en frío. En cada paso de trefilado, el material se estira plásticamente aumentando la carga de rotura y la estricción, como se muestra en la *Figura 5*. (Aguilar, Hernandez, & Vicente, 2016)

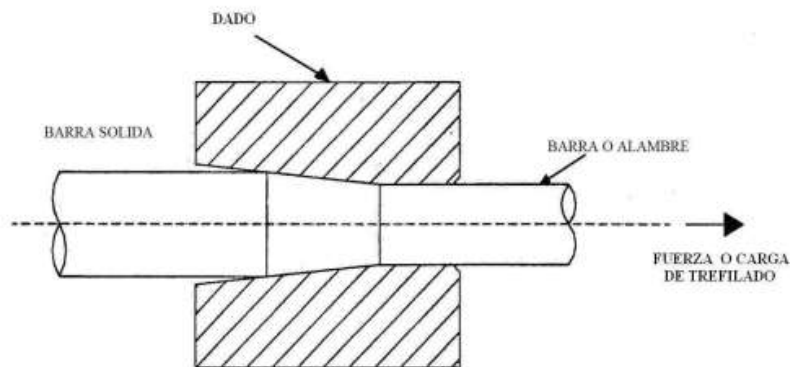


Figura 5. Proceso de trefilado
Fuente: (Morales, Ortiz, & H. Jacobo, 2008)

2.3.1 Parámetros de Trefilado

El éxito del trefilado se encuentra en la selección adecuada de parámetros que intervienen en el proceso, como son:

- Porcentaje de deformación de material
- Porcentaje de trabajo en frío
- Porcentaje de reducción de área del alambre
- Fuerza necesaria para trefilar.
- Velocidad de trefilado.
- Ángulo de ataque o semiángulo del dado
- Coeficiente de fricción entre superficies de contacto. (Porrello, 2014)

2.3.1.1 Porcentaje de deformación del material:

Para trefilar alambre se considera el porcentaje máximo de deformación del material, que se calcula con la Ecuación 1:

$$r = 1 - \frac{Df^2}{Do^2} \quad (1)$$

Donde:

r = Porcentaje de deformación en el material

D_o = Diámetro al ingreso del dado

D_f = Diámetro a la salida del diámetro

Según Schey, en materiales como cobre o aluminio el valor oscila entre 10% a 25%.

2.3.1.2 Porcentaje de trabajo en frío

Para el trabajar en frío se debe considerar que debe existir un incremento del esfuerzo de fluencia, pero sin llegar al punto de rotura. El porcentaje de trabajo en frío, se calcula mediante la Ecuación 2:

$$\%TF = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (2)$$

En la figura 6, se indica la relación existente entre el limite elástico, el porcentaje de alargamiento y la resistencia a la tensión. Todo esto sirve para definir hasta que porcentaje puede trabajar en frío un material, sin llegar a la rotura.

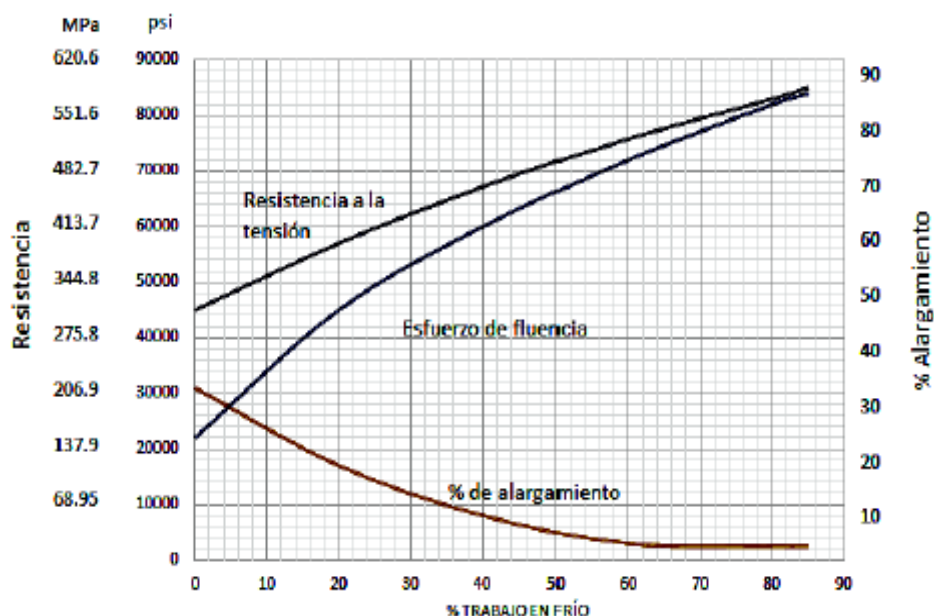


Figura 6. *Propiedades de los materiales vs. Trabajo en frío.*

Fuente: (Askeland)

2.3.1.3 Porcentaje de reducción del área transversal

Al trefilar alambre se tiene hasta un 45% de reducción, pero cuan menor sea el diámetro a reducir este porcentaje disminuirá de la misma manera, es por ello que para el caso de alambres finos (diámetro < 6 mm) se establece una reducción de 10% a 25% y para alambres gruesos (diámetro > 6 mm) entre 20% a 45%. Si se llegase a sobrepasar el 45% se tendría un mal acabado superficial. (Schey, 2001)

Para trefilar secciones transversales grandes se puede trabajar a temperaturas elevadas para disminuir los esfuerzos.

2.3.1.4 Fuerza necesaria para trefilar

Para definir la carga con la cual va a ser sometido el alambre se indica en la *Figura 7*, las fuerzas que intervienen en el proceso de trefilado.

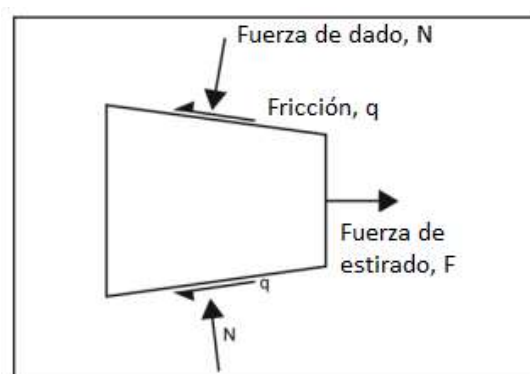


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de proceso de trefilado

Fuente: (S/A, Semantic Scholar, 2007)

Se estima que la energía consumida durante el proceso se debe al porcentaje de reducción y al material a trefilar. Se debe considerar que los ángulos del dado hacen que ésta se incremente debido a que generan ineficiencias en la deformación. (S/A, Semantic Scholar, 2007)

Si tenemos en cuenta lo anterior, en el proceso de trefilado existirá la acción del trabajo uniforme (W_u), no uniforme o también denominado redundante (W_r) y el trabajo por fricción (W_f) sobre un determinado alambre, como se muestra en la *Figura 8*.

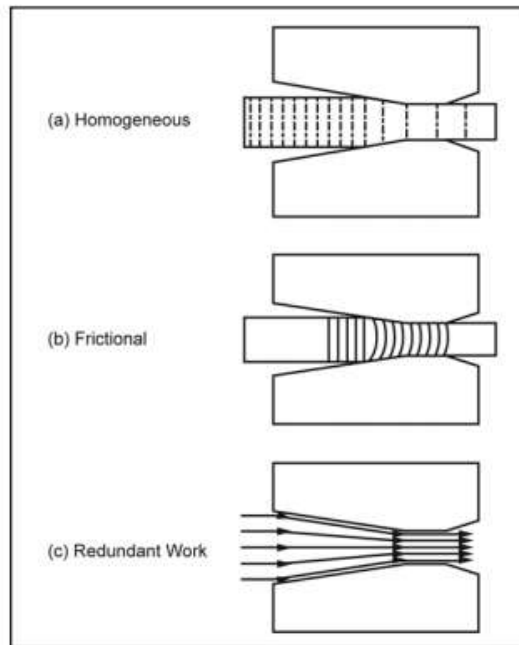


Figura 8. Ilustración: (a) Trabajo uniforme, (b) por fricción, (c) no uniforme.
Fuente: (S/A, Semantic Scholar, 2007)

Por lo que, el esfuerzo total ejercido al trefilar alambre, se calcula con la Ecuación 3

$$\sigma_T = W_u + W_r + W_f \quad (3)$$

- **Trabajo uniforme**

El trabajo uniforme es aquel trabajo realizado para disminuir el diámetro, sin considerar los efectos de fricción del dado sobre la superficie del alambre. Se expresa matemáticamente como el producto del esfuerzo de fluencia promedio en el alambre σ_p y la deformación real ϵ durante el proceso de trefilado, las ecuaciones que permiten determinar su valor son 4, 5, 6:

$$W_u = Y_f \left[\ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \right] \quad (4)$$

$$Y_f = \frac{K(\epsilon)^n}{1+n} \quad (5)$$

$$\epsilon = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (6)$$

Donde:

Y_f = Esfuerzo de fluencia promedio, MPa

K = Esfuerzo de fluencia, MPa

n = Coeficiente de rozamiento

A_o = Área inicial, mm²

A_f = Área final, mm²

r = Relación de deformación plástica

- **Trabajo redundante**

Es aquel que se genera cuando el alambre pasa por el dado produciendo cizallamiento entre superficies y se calcula con la Ecuación 7:

$$W_r = Y_f(\varphi - 1) \left[\ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \right] \quad (7)$$

El trabajo redundante existe cuando el valor del factor de redundancia (φ) es mayor a 1, la Ecuación 8 permite determinar su valor.

$$\varphi = 0.8 + 0.12 \left(\frac{D_p}{L_c} \right) \quad (8)$$

Para el caso de trabajar con una sección transversal redonda, los valores de D_p y L_c se obtienen aplicando las ecuaciones 9 y 10 respectivamente.

$$D_p = \frac{D_o + D_f}{2} \quad (9)$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2\sin(\alpha)} \quad (10)$$

Donde:

D = Diámetro promedio del alambre durante el trefilado, mm

L_c = Longitud de contacto entre el dado y el alambre, mm

α = Semiángulo de ataque del dado

- **Esfuerzo de fricción**

Según la teoría de Schey, el esfuerzo de fricción se calcula con la Ecuación 11

$$\sigma_{fr} = \left(1 + \frac{\mu}{\tan(\alpha)}\right) \quad (11)$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción entre el alambre y el dado

α = Semiángulo de ataque del dado

- **Fuerza final de trefilado**

La carga para trefilar alambre en una pasada, es aquella en la cual intervienen los efectos de fricción, uniformidad y redundancia, obteniendo la siguiente expresión, mostrada en la Ecuación 12. (Schey, 2001)

$$F_t = A_f \times Y_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan(\alpha)}\right) \varphi \left[\ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \right] \quad (12)$$

Por lo tanto, la fuerza total para trefilar un alambre a través de un conjunto de dados es la suma de todas las cargas que permiten disminuir en una pasada el diámetro del alambre, como se muestra en la Ecuación 13, de acuerdo a la configuración de la máquina.

$$F_T = F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + \dots + F_{tn} \quad (13)$$

2.3.1.5 Velocidad de trefilado

Depende del material y de la reducción del área transversal. Para alambres con diámetros grandes, que van desde 7 mm o más, pueden variar de 1 a 2.5 m/s, y para alambres muy finos, menores a 7 mm, hasta 50 m/s. Al trabajar con velocidades elevados hace que el material no

tenga suficiente tiempo para disipar el calor generado, perjudicando la calidad del producto. (Schey, 2001)

2.3.2 Dados para trefilado

El dado se fabrica de un material más resistente que el material a trefilar, generalmente se utiliza acero de herramientas, aleaciones de cobalto, compuestos a base de tungsteno y diamante. Los dados de diamante se utilizan para diámetros súper finos que van desde 2 μ m a 1.5mm. Los dados de carburo y de diamante tienen baja resistencia a la tensión y baja tenacidad por lo cual necesitan de un porta inserto de acero.

Los ángulos que forman parte de un dado se muestran en la *Figura 9*.



Figura 9. Terminología de un dado para trefilado

Fuente: (Singh; Schey, 2001)

El ángulo principal conocido como semiángulo de ataque, de acuerdo al diámetro del alambre varía de 16° a 20° (Schey, 2001), como se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3.

Ángulo de reducción de dado de trefilado

Calibre	Ángulo de reducción (2α)
4/0 – 5 AWG	20°
6 – 8	18°
9 – 42	16°

Fuente: (Aguilar, Hernandez, & Vicente, 2016)

2.3.3 Sistema de Lubricación

Una máquina trefiladora cuenta con un sistema de lubricación, debido a que la fricción entre el dado y el alambre provoca elevadas temperaturas; un calentamiento excesivo puede provocar un desgaste elevado del material llevándolo a la zona de fractura. Los componentes básicos de un sistema de lubricación son: lubricante, bomba y depósito, como se muestra en la *Figura 10*.

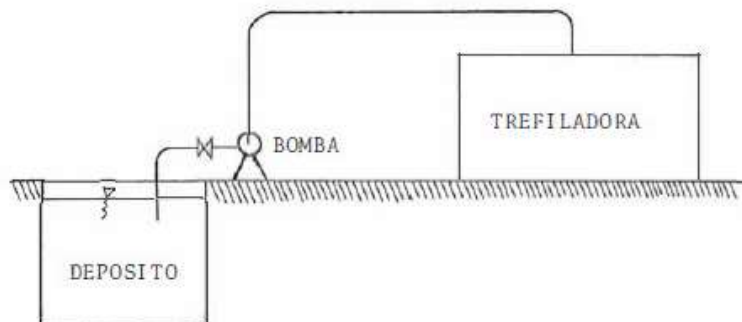


Figura 10. Sistema de lubricación

Fuente: (Dávila, 1988)

2.3.3.1 Lubricante

Los lubricantes empleados en el proceso de trefilado, tienen propiedades específicas de acuerdo al tipo de alambre y a la configuración del proceso, considerando que debe cumplir con las siguientes funciones:

- Impedir el contacto directo entre el dado y el alambre
- Reducir la resistencia de rozamiento entre las superficies, alambre-dado.
- Alargar la vida útil de los dados
- Evitar que se empaste el alambre en los dados.
- Dar mejor superficial al alambre
- Reducir el consumo de energía
- Reducir cortes

Para trefilar alambre se emplean dos tipos de lubricantes: líquidos y húmedos.

- **Lubricante líquido.** - Los dados y el alambre se sumergen por completo en el lubricante. Existen los emulsionados en agua o en aceite.
- **Lubricante seco.** - La superficie a estirar se recubre al cruzar por una caja de aditivos, los cuales pueden ser, solubles e insolubles en agua.

2.3.3.2 Análisis hidráulico

Para el análisis hidráulico se utilizan las siguientes ecuaciones:

Para evaluar la velocidad del fluido se utiliza la ecuación de continuidad descrita en la Ecuación 14.

$$Q = V \times \frac{\pi D^2}{4} \quad (14)$$

Donde

V = velocidad del fluido

Q = flujo volumétrico

D = diámetro hidráulico de la tubería

Por otro lado, las pérdidas por fricción mayores (en tramos de tubería recta) y menores (en válvulas y accesorios) se determinan utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach, que se representa en la Ecuación 15:

$$h_{L,total} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (15)$$

Donde:

h_L = Altura de pérdidas por fricción

f_i = Factor de fricción de la tubería

V_i = Velocidad del fluido

D_i = Diámetro hidráulico de la tubería

g = aceleración gravitacional

$K_{L,i}$ = Coeficientes de pérdidas en distintos accesorios o válvulas

El único término que representa una complicación en el cálculo es el factor de fricción f en caso de que el flujo sea turbulento. Este puede ser calculado utilizando el diagrama de Moody de manera gráfica, o se puede resolver la ecuación implícita, Ecuación 16 de Colebrook de manera iterativa utilizando el método numérico de Newton-Raphson.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Pero si el flujo es laminar, el factor de fricción f se calcula mostrando la Ecuación 17.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (17)$$

Para determinar la presión que requiere elevar una bomba, se realiza un balance de energía donde se utiliza la Ecuación 18 de Bernoulli.

$$\frac{dE_M}{dt} = \phi_{m,in} \left\{ \frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 \right\}_{in} - \phi_{m,out} \left\{ \frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 \right\}_{out} + \phi_W - \phi_{Mefr} \quad (18)$$

Al trabajar en estado estacionario, la Ecuación 18 se reduce a 19.

$$\left\{ \frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 \right\}_1 = \left\{ \frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 \right\}_2 \quad (19)$$

Al realizar el balance de energía antes y después de la bomba, se obtienen las ecuaciones de la cabeza total de descarga (TDH) mostrada en la Ecuación 20, y de la cabeza neta de succión disponible (NPSH_a) mostrada en la Ecuación 21.

$$TDH = \frac{p_2 - p_1 + \Delta p_f}{\rho g} + (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (20)$$

Donde:

P_2 = Presión del fluido a la salida de la bomba.

P_1 = Presión del fluido a la entrada de la bomba.

Δp_f = Presión por pérdidas de fricción

$h_2 - h_1$ = Diferencia de alturas entre la salida y entrada de la bomba.

v_1 = Velocidad del fluido al ingreso de la bomba.

v_2 = Velocidad del fluido a la salida de la bomba.

$$NPSH_a = \frac{p_1 - p_{vp} - \Delta p_f}{\rho g} + (h_1 - h_{succ}) \quad (21)$$

Donde:

p_{vp} = Presión de vapor de fluido.

P_1 = Presión del fluido a la entrada de la bomba.

Δp_f = Presión por pérdidas de fricción.

h_1 = Altura de fluido respecto a un punto de referencia.

h_{succ} = Altura de la línea de centros de la boca de succión de la bomba.

2.4 Resumen

El conformado de metales se puede clasificar de tres formas: considerando la geometría del metal, mediante procesos de formado o preformado de láminas de metal y procesos de deformación volumétrica; tomando en cuenta la temperatura del proceso, en trabajo en frío o

caliente y dependiendo de la etapa en la que se halle el material, en proceso primario y secundario.

Uno de los procesos de deformación volumétrica es el trefilado, el cual consiste en hacer pasar alambres (alambre de alta resistencia que proviene de un proceso de laminado en caliente) por una serie de hilas de diámetros progresivamente inferiores hasta alcanzar el diámetro final deseado, generalmente se trabaja en frío. En cada paso de trefilado, el material se estira plásticamente aumentando la carga de rotura y la estricción.

El éxito del trefilado se encuentra en la selección adecuada de parámetros que intervienen en el proceso, como son: porcentaje de deformación de material, de trabajo en frío, de reducción de área del alambre, la fuerza necesaria para trefilar, velocidad de trefilado, ángulo de ataque o semiángulo del dado y coeficiente de fricción entre superficies de contacto, principalmente.

El ángulo de entrada del dado puede definirse de acuerdo al diámetro del alambre que se desea trefilar, va desde 16° a 20° .

El sistema de lubricación de una máquina trefiladora consta de: lubricante, bomba y depósito, generalmente. El lubricante debe ser capaz de reducir la resistencia de rozamiento entre las superficies, alargar la vida útil de los dados y dar mejor acabado superficial.

Para determinar el tipo de bomba que requiere el sistema de lubricación se recurre al análisis de fluidos, determinando el caudal, pérdidas en tuberías, determinación de presión de succión y descargar, entre otros.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y SELECCIÓN

En el capítulo se utilizará la metodología de diseño concurrente, a fin de tener un producto de calidad, de bajo costo de inversión y realizado en el menor tiempo posible. Primero se plantearán las necesidades del producto y mediante la matriz QFD, se determinan las prioridades a considerar en el diseño. Mediante un análisis funcional, se establecen módulos que permiten encontrar la solución más óptima para cada función que realizará la máquina.

3.1 Casa de la Calidad

Para definir las especificaciones técnicas se utilizará una matriz QFD (Quality Function Deployment) o casa de la calidad, la misma que mediante las necesidades del cliente organiza las prioridades de diseño, a fin de satisfacer las propuestas requeridas por el cliente.

3.1.1 Voz del usuario

Según el ingeniero Byron Cortez, Jefe de Laboratorio de Procesos de Manufactura, la máquina debe contar como mínimo con las siguientes características:

- Trefilar continuamente
- De fácil operación
- De bajo costo
- Debe ocupar el menor espacio posible
- De fácil mantenimiento

3.1.2 Voz del ingeniero

Para los requerimientos anteriores se establecerá técnicamente lo siguiente

- Máquina con sistema rebobinar continuo
- Control semiautomático

- Seleccionar adecuadamente la materia prima
- Estructura compacta
- Sistema modular

3.1.3 Resultados

Como se muestra en la *Figura 11*, se ha ponderado del 1 al 5, siendo 1 el valor más bajo, de acuerdo al peso que tiene cada característica para el Jefe de Laboratorio.

			Voz del ingeniero				
			1	2	3	4	5
			12,0%	14,2%	9,2%	12,2%	21,1%
No	Voz del cliente	Peso Ponderado	Sistema de rebobinado continuo	Control semiautomático	Tipo de materia prima	Estructura compacta	Sistema modular
1	Capacidad de trefilar continuamente	5,00	9	3	1	3	1
2	Fácil operación	4,50	1	9		1	9
3	Bajo costo	4,00	1	1	9	1	1
4	Ocupe menor espacio posible	3,00				9	3
5	Fácil mantenimiento	4,00		1		1	9
			Sistema de rebobinado	Control semiautomático	Tipo de materia prima	Estructura compacta	Sistema modular
		Rango relativo	4	2	5	3	1
		Importancia técnica absoluta y relativa	53,5	63,5	41,0	54,5	94,5
			12,0%	14,2%	9,2%	12,2%	21,1%

Figura 11. Matriz QFD

Como resultado del análisis de la casa de la calidad se han identificado los siguientes aspectos, siendo los más importantes y a tomarse en cuenta para el desarrollo del proyecto.

- **Sistema modular:** El mantenimiento de una máquina es de gran importancia, ya que con ello se puede alargar su vida útil. Para diseñar la máquina trefiladora de alambre se

considerará el diseño modular que permite adecuar los componentes de manera que puedan desmontarse cuando así se lo requiera o añadir elementos que permitan realizar una mejora en la misma.

- **Control semiautomático:** Se diseñará con la flexibilidad de maniobrar la máquina a fin de conseguir que el proceso sea continuo. El control básico de la máquina será a base de interruptores, pulsadores y relés.
- **Estructura compacta:** Por ser una máquina trefiladora debe tener una estructura capaz de soportar elevadas cargas. Para su diseño es importante conocer el porcentaje de reducción del alambre y el tipo de material a trefilar.

3.2 Análisis funcional

En esta sección se encontrarán las funciones primarias y secundarias del producto, siendo las primarias las que el cliente solicita para el producto y las secundarias permiten que las primarias existan. Se realizará en base a diagramas de flujo los mismos que están compuestos de niveles empezando por el nivel 0 siendo éste la función general del producto.

3.2.1 Definición de las funciones primarias y secundarias

Nivel 0

La función principal es trefilar alambre, para cumplir con la función de la máquina se requiere: materia prima (flecha color azul), energía (flecha color naranja) y señales de control (flecha color verde), (ver *Figura 12*)

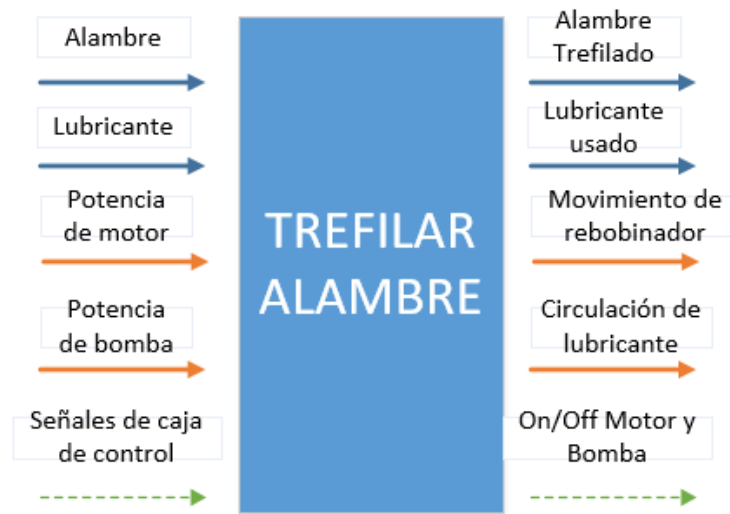


Figura 12. Nivel 0. Diagrama funcional primario

Nivel 1

Para este nivel se especifica de manera general todas las funciones que el producto final; máquina trefiladora; va a realizar, (ver *Figura 13*)

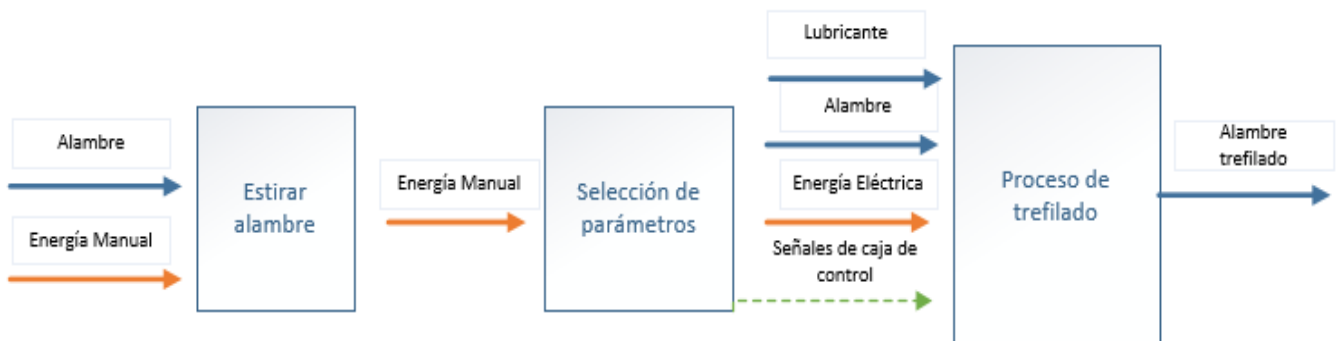


Figura 13. Nivel 1. Diagrama funcional 1

Nivel 2

A continuación, se desglosará aquellas funciones no especificadas anteriormente pero que son de gran importancia para que la máquina funcione adecuadamente, (ver *Figura 14*).

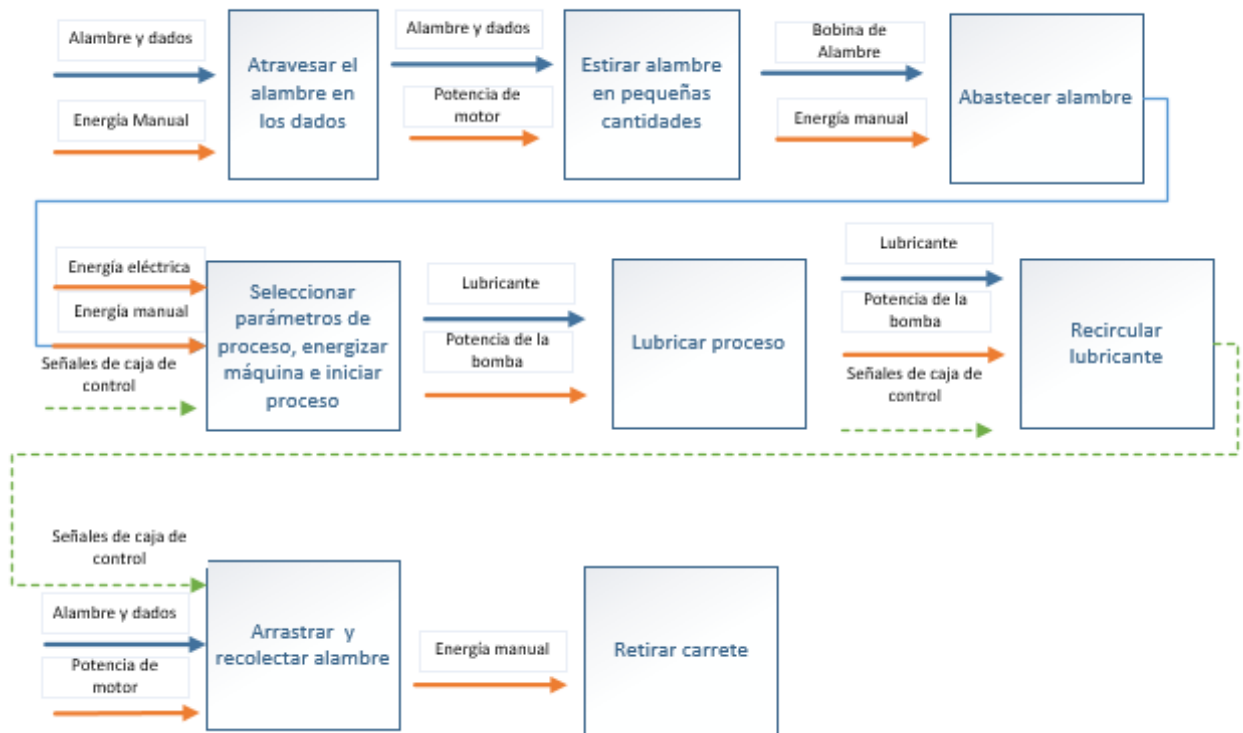


Figura 14. Nivel 2. Diagrama funcional 2

3.2.2 Determinación modular

Para optimizar recursos y costos, facilitar el mantenimiento y obtener un producto de calidad, se utiliza la modularidad, que divide un sistema en módulos funcionales. La máquina trefiladora posee algunas funciones que requieren ser examinadas mediante un análisis modular. A partir del nivel 2 se resuelve considerar 5 módulos, mostrados en la *Figura 15*.

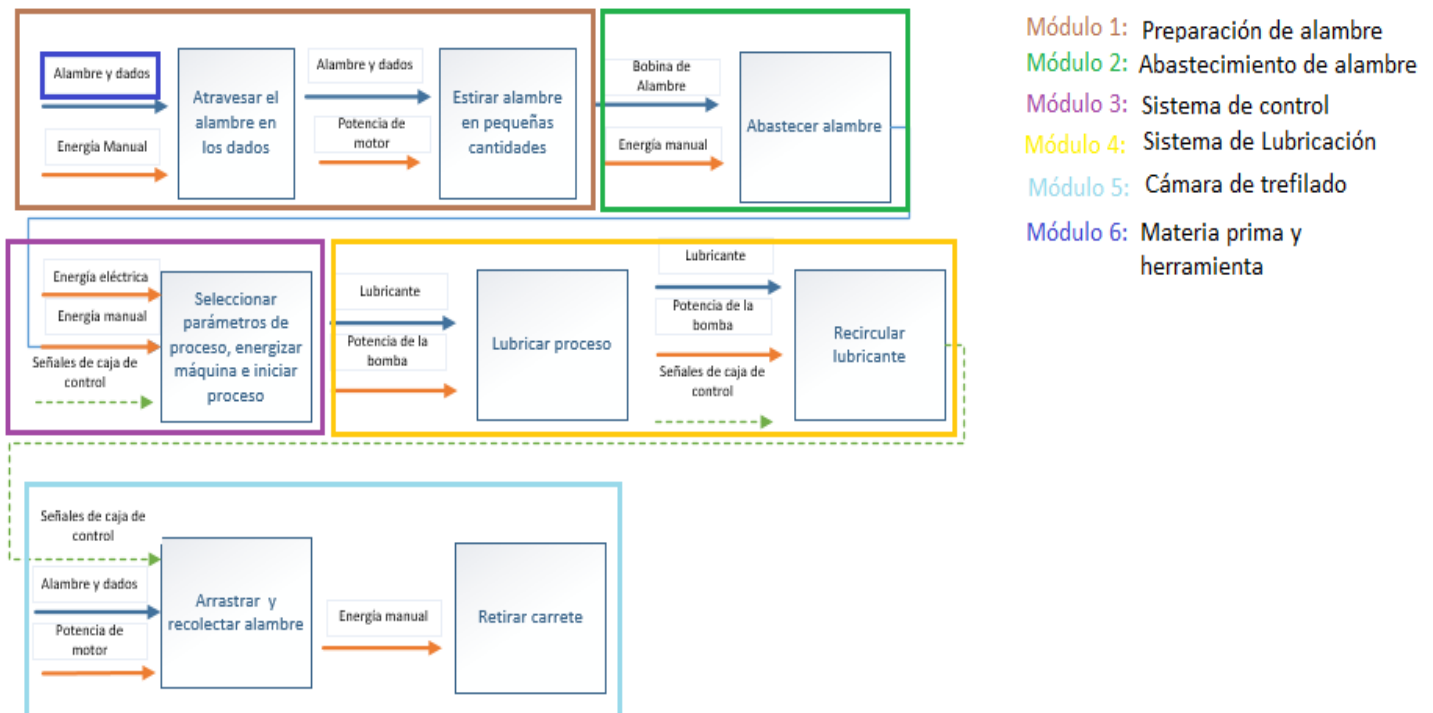


Figura 15. Nivel 2. Detalle de diagrama funcional 2

3.2.3 Solución modular

A continuación, se establecen varias alternativas para cada función con lo cual se dará solución a cada uno de los módulos existentes.

3.2.4 Módulo 1 – Preparación de alambre



El módulo 1 comprende las siguientes funciones:

- Atravesar el alambre en los dados.
- Estirar alambre en pequeñas cantidades.

3.2.4.1 Atravesar el alambre en los dados.

Una pequeña longitud de alambre debe ser reducida para ingresar en un dado de tal manera que la acción del motor pueda generar continuidad en el proceso. A continuación, en la *Tabla 4* se muestran dos posibles soluciones (ver *Figura 16* y *Figura 17*) capaces de lograr la reducción parcial del alambre:

Tabla 4.*Alternativas para reducir diámetro de alambre manualmente.*

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Máquina punteadora</p>  <p>Figura 16. Sacapuntas de alambre Fuente: (Machines, s.f.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Muy usado en la industria • No requiere de gran esfuerzo para reducir diámetro de alambre • Optimiza tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costo de adquisición
<p>2. Lima de metal</p>  <p>Figura 17. Limado de alambre Fuente: (Quintana, 2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Usada previamente para trefilar manualmente alambre de joyería. • Es de muy bajo costo de adquisición 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de mediano esfuerzo manual para conseguir el objetivo • Depende del operador se incrementa el tiempo de trabajo.

Al ser el objetivo principal, diseñar y construir una máquina trefiladora por motivos didácticos no se ve necesario construir o adquirir una máquina punteadora. Por lo tanto, se opta por la alternativa 2.

3.2.4.2 Estirar alambre en pequeñas cantidades

Para trefilar manualmente alambre de joyería se utiliza tres componentes básicos: cadena de estirado, pinza y un motor. Por tanto, siendo el método más frecuente de estirar alambre en pequeñas cantidades, se añadirá como parte de la máquina, el mecanismo solución mostrado en la *Figura 18*, el cual permitirá pasar la variedad de dados que se necesite en el alambre escogido.

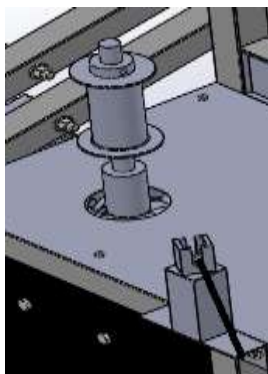


Figura 18. Equipo de estirado de alambre

3.2.5 Módulo 2 – Abastecimiento de alambre

El módulo 2 comprende la siguiente función:

- Abastecer alambre

3.2.5.1 Abastecer alambre

El alambre que va a ingresar a la cámara de trefilado, requiere de un componente que lo guíe de forma adecuada. La desviación de alambre genera esfuerzos que lleva a la rotura del mismo. A continuación, en la tabla 5 se muestran dos posibles soluciones (ver *Figura 19* y *Figura 20*).

Tabla 5.

Alternativas para abastecer alambre al proceso.

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Torre guía</p>  <p>Figura 19. Torre guía de abastecimiento de alambre. Fuente: (Zapopan, 2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Muy usado en la industria • Usado para producción en serie. • Permite abastecer grandes cantidades de alambre 	<ul style="list-style-type: none"> • Son estructuras de gran altura
<p>2. Rodillos seguidores</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Usada para abastecer alambre en producciones bajas • Costo bajo de fabricación 	<ul style="list-style-type: none"> • Limita la capacidad de suministrar alambre.



Figura 20. Rodillos seguidores
Fuente: (AlaMaula, 2019)

La máquina trefiladora de alambre tendrá baja producción. Por lo tanto, se elige la alternativa 2. Los rollos seguidores serán construidos y servirán para abastecer y recoger el alambre.

3.2.6 Módulo 3 – Sistema de control

El módulo 3 comprende las siguientes funciones:

- Seleccionar parámetros de proceso, energizar máquina e iniciar proceso

Las tres funciones describen al sistema de control de la máquina. Se realizará un control de lazo abierto como se muestra en la *Figura 21*, debido a que es de simple construcción, fácil mantenimiento y de bajo costo. (Mírez, 2011).

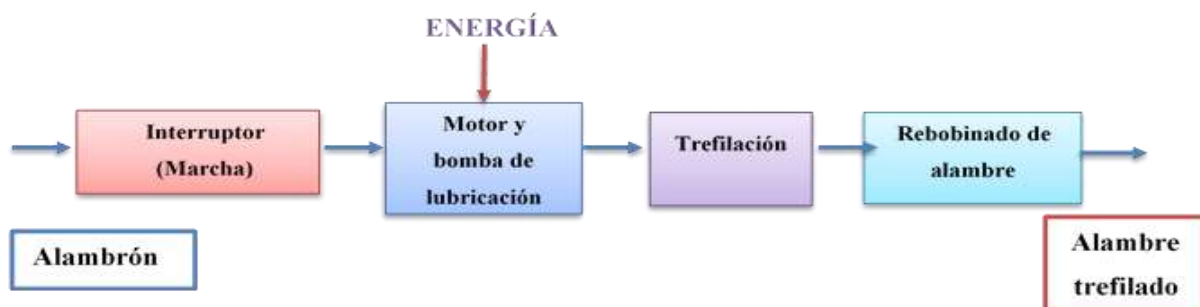


Figura 21. Control lazo abierto de máquina trefiladora de alambre

Como componentes básicos de control se tendrá interruptores, pulsadores, leds indicadores, etc. Para encender o apagar actuadores como: motores y bombas, se utiliza en la industria interruptores simples, de enclavamiento, con indicadores, entre otros, todo depende del equipo a adquirir, de la corriente de trabajo y del voltaje de funcionamiento.

La máquina trefiladora será utilizada con fines didácticos, por lo tanto, el motor debe ser capaz disminuir el diámetro de alambre variando la velocidad del proceso. Un variador de frecuencia, ya sea de corriente alterna (AC) o de corriente directa (DC) mediante el control de la frecuencia de alimentación que es suministrada al motor puede cumplir con el requerimiento.

3.2.7 Módulo 4 – Sistema de Lubricación

El módulo 4 comprende las siguientes funciones:

- Lubricar proceso
- Recircular lubricante

3.2.7.1 Lubricar proceso

Se dispone de cuatro tentativas posibles de alternativas en el área de trefilado de alambre. La primera alternativa (Priamus X255) desarrollado por la empresa Q8 Oils, es un lubricante sintético multiuso para trefilado de cobre en todos los tamaños en todo tipo de máquinas de trefilado. (Q8Oils, Soluciones para trefilado & laminado, 2017).

La segunda y tercera alternativa nos proporcionan la empresa CROMOGENIA DIV. SIDASA, cuyos lubricantes han sido fabricados específicamente para el trefilado continuo, siendo aptos para trefilado de todo tipo de secciones desde alambrón hasta alambre fino, en todo tipo de máquinas de trefilado, especialmente indicado para máquinas multihilo y trefilado en línea. (CROMOGENIA DIV. SIDASA).

La cuarta alternativa es un aceite SAE 40, utilizado para dar mantenimiento a motores de vehículos, y en ciertos casos se ha visto conveniente utilizarlo como aceite lubricante, dando buenos resultados a empresas dedicadas a trefilar a nivel nacional.

En la *Tabla 6* se presenta las ventajas y desventajas que presenta cada alternativa propuesta.

Tabla 6.

Alternativas para definir el lubricante a emplear en el proceso de trefilado.

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Priamus X255</p> <p>v = 255 cSt a 40°C</p> <p>Fuente: (Q8Oils, Soluciones para trefilado & laminado, 2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lubricante sintético multiuso. • Recomendado para trefilado de cobre y aluminio en todos los tamaños. • Compatible con todo tipo de máquina de trefilado múltiple o simple. • Excelentes acabados superficiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costo • Disponibilidad bajo importación.
<p>2. TADAL CU 159</p> <p>v = 159 cSt a 40°C</p> <p>Fuente: (CROMOGENIA DIV. SIDASA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto poder lubricante. • Alto poder detergente. • Menores tasas de rotura. • Recomendado para el trefilado de alambre de cobre • Excelentes acabados superficiales 	<ul style="list-style-type: none"> • No recomendado para el trefilado de aluminio. • Elevado costo. • Disponibilidad bajo importación.
<p>3. TADAL STAR DE 900</p> <p>v = 900 cSt a 40°C</p> <p>Fuente: (CROMOGENIA DIV. SIDASA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta adherencia. • Alto rendimiento y larga vida. • Recomendado para el trefilado de alambre de aluminio y aleaciones. • Excelentes acabados superficiales 	<ul style="list-style-type: none"> • No recomendado para el trefilado de cobre. • Elevada viscosidad. • Elevado costo. • Disponibilidad bajo importación.
<p>4. Aceite SAE 40</p> <p>v = 120 cSt a 40°C</p> <p>Fuente: (MOLY-VEN)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Empleado para el trefilado de cobre y aluminio. • Disponibilidad en el mercado nacional desde la presentación de ¼ de galón. • Bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo corto de vida útil.

3.2.7.2 Selección del lubricante

Para seleccionar adecuadamente se utilizará la matriz de Hales mostrada en la *Tabla 7* y se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo
- Disponibilidad
- Alcance (Aluminio, Cobre, otros)

Tabla 7.

Matriz de Hales para selección del lubricante

a) *Alternativas a evaluar*

Módulo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
--------	---------------	---------------	---------------	---------------

Continúa →

Sistema de lubricación	Priamus X255	Tadal Cu 159	Tadal Star de 900	Aceite SAE 40
-------------------------------	--------------	--------------	-------------------	---------------

b) *Evaluación del peso específico de cada criterio*

Criterio	Costo	Disponibilidad	Alcance	Suma +1	Ponderación	Hitos
Costo		2,5	2,5	6	0,333	2
Disponibilidad	2,5		5	8,5	0,472	1
Alcance	2,5	0		3,5	0,194	3
Total				18		1

c) *Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-*

Criterio Costo

Costo	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		2,5	2,5	0	6	0,176	2
Solución B	2,5		2,5	0	6	0,176	2
Solución C	2,5	2,5		0	6	0,176	2
Solución D	5	5	5		16	0,471	1
Total					34	1	

d) *Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-*

Criterio Disponibilidad.

Disponibilidad	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		2,5	2,5	0	6	0,176	2
Solución B	2,5		2,5	0	6	0,176	2
Solución C	2,5	2,5		0	6	0,176	2
Solución D	5	5	5		16	0,471	1
Total					34	1	

e) *Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-*

Criterio Alcance.

Alcance	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		5	5	2,5	13,5	0,397	1
Solución B	0		5	0	6	0,176	3
Solución C	0	0		0	1	0,029	4
Solución D	2,5	5	5		13,5	0,397	1
Total					34	1	

f) *Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio*

	Costo	Disponibilidad	Alcance	Suma	Prioridad
Solución A	0,059	0,083	0,077	0,219	2
Solución B	0,059	0,083	0,034	0,176	3
Solución C	0,059	0,083	0,006	0,148	4
Solución D	0,157	0,222	0,077	0,456	1
Total				1	

Se concluye que la mejor opción es la alternativa 4 (Aceite SAE 40), debido a las grandes ventajas que presenta con respecto a las demás alternativas inclusive por encima del tema de costos esta la disponibilidad en el mercado nacional. La mayoría de aceites necesitan ser importados, incrementando el tiempo de adquisición.

3.2.7.3 Recircular lubricante


Para poder recircular el lubricante es necesario utilizar una bomba, con la finalidad de elevar la presión del fluido, logrando transportarlo desde el depósito mediante una tubería, válvulas y accesorios hasta la parte más alta, regresando al depósito por efecto de la gravedad.

El Grupo Internacional SYZ, representante de fabricantes industriales de alta calidad, nos recomienda una bomba de desplazamiento positivo y a su vez proporciona esta valiosa información a través de su portal web y catálogos, las mismas que se ha sido utilizadas para la selección de la alternativa más fiable. (SYZ, 2018)

En la tabla 8 se presenta las posibles alternativas recomendadas en la industria (ver *Figura 22, 23 y 24*) de las cuales se seleccionará la más adecuada.

Tabla 8.

Alternativas para definir la bomba a emplear en el proceso de trefilado.

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Bomba de desplazamiento positivo de engranajes externos helicoidales.</p>  <p>Figura 22. <i>Bomba de DP, engranajes externos helicoidales.</i> Fuente: (SYZ Colombia, Descripción, 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Su diseño posee alta eficiencia. • Fácil mantenimiento. • Fricción y vibración son mínimas. • Válvula de alivio integrada para proteger la bomba de sobrepresiones. • Bombeo eficiente de fluidos de baja viscosidad como solventes y gasolinas, hasta fluidos de alta viscosidades por encima de 1'000.000 SSU. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maneja presiones y caudales elevados. • Espacio para su montaje. • No es autocebante. • Requiere de un motorreductor. • Elevado costo.

2. Bomba de desplazamiento positivo de lóbulos rotatorio.



Figura 23. *Bomba de DP, de lóbulos rotatorio.*

Fuente: (SYZ Colombia, Descripción, 2018)

- Manejo de fluidos heterogéneos que presenten cambios súbitos en su viscosidad.
- Servicio en seco hasta por 30 minutos continuos
- Autocebante (hasta 8,5m), no se bloquea ni deteriora en presencia de baches de aire.
- Mantenimiento en sitio.
- Flujo sin pulsaciones, minimizando desgaste por vibración e imprecisión en instrumentos.
- Maneja presiones y caudales elevados.
- Espacio para su montaje.
- Requiere de un motorreductor.
- Elevado costo.
- No posee válvula de alivio integrada.

3. Bomba de desplazamiento positivo rotatoria de paletas



Figura 24. *Bomba de DP rotatoria de paletas.*

Fuente: (PIUSI, s.f.)

- Bombeo de fluido con capacidades de hasta 500 cSt.
- Funcionamiento continuo con succión alta y presión de hasta 6 bar.
- Nivel de ruido inferior a 70 dB.
- Gracias al bypass incluido en la bomba, el sistema queda protegido al momento de parar la transferencia del combustible.
- Fácil mantenimiento.
- Autocebante.
- No posee válvula de alivio integrada.
- Disponibilidad bajo pedido.

3.2.7.4 Selección de la bomba

Para seleccionar adecuadamente se utilizará la matriz de Hales mostrada en la *Tabla 9* y se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo
- Disponibilidad
- Mantenimiento

Tabla 9.

Matriz de Hales para selección de bomba para la recirculación de lubricante.

a) Alternativas a evaluar

Módulo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sistema de lubricación	Bomba de desplazamiento positivo de engranajes externos helicoidales.	Bomba de desplazamiento positivo de lóbulos rotatorio.	Bomba de desplazamiento positivo rotatoria de paletas

Continúa →

b) Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Costo	Disponibilidad	Mantenimiento	Suma +1	Ponderación	Hitos
Costo		2,5	5	8,5	0,472	1
Disponibilidad	2,5		2,5	6	0,333	2
Mantenimiento	0	2,5		3,5	0,194	3
Total				18		1

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

Criterio Costo

Costo	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		0	2,5		3,5	0,194	3
Solución B	5		0		6	0,333	2
Solución C	2,5	5			8,5	0,472	1
Total					18	1	

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

Criterio Disponibilidad

Disponibilidad	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		0	2,5		3,5	0,194	3
Solución B	5		0		6	0,333	2
Solución C	2,5	5			8,5	0,472	1
Total					18	1	

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

Criterio Mantenimiento

Mantenimiento	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		2,5	2,5		6	0,333	2
Solución B	2,5		5		8,5	0,472	1
Solución C	2,5	0			3,5	0,194	3
Total					18	1	

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

	Costo	Disponibilidad	Mantenimiento	Suma	Prioridad
Solución A	0,092	0,065	0,065	0,221	3
Solución B	0,157	0,111	0,092	0,360	2
Solución C	0,223	0,157	0,038	0,418	1
Total				1	

La solución más óptima es la solución C, debido a su costo, tamaño y accesible mantenimiento, además es de tipo Autocebante lo cual resulta muy útil para disminuir el riesgo de cavitación.

3.2.8 Módulo 5 – Cámara de trefilado

El módulo 5 comprende las funciones de arrastrar, recolectar y extraer el alambre. Para dar solución a las funciones que debe realizar la máquina, en la *Tabla 10* se muestran los tipos de máquinas trefiladoras existentes en la industria (ver *Figura 25, 26 y 27*), de las cuales se tomará la configuración más ajustada a las necesidades planteadas.

Tabla 10.

Alternativas para definir la configuración de la máquina trefiladora

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Trefiladora múltiple continua</p>  <p><i>Figura 25.</i> Trefiladora con sistema múltiple continuo Fuente: (Alliec, 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • De estructura compacta y robusta • Usado para producción en serie. • Es capaz de trefilar diámetros de hasta 9mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupa gran espacio • Elevado consumo de energía al contar con varios motores • Requiere de un rebobinador por dado • Alto de costo de fabricación • Sistema de lubricación extenso
<p>2. Trefiladora múltiple acumulada</p>  <p><i>Figura 26.</i> Trefiladora con sistema múltiple de acumulación Fuente: (Moreno, 2009)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Por tener bobinas independientes, por tanto, el proceso no se detiene si existe rompimiento de alambre • Permite disponer de alambre de diámetro intermedio 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupa gran espacio • Elevado consumo de energía • Requiere de guía adicionales para mantener constante la velocidad del proceso • Alto costo de fabricación
<p>3. Trefiladora múltiple compensada</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee un motor principal de arrastre, el cual también puede ser usado para recolectar el alambre • Bajo consumo de energía • Estructura compacta • Ocupa poco espacio, respecto de los anteriores 	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de reducciones que se desea realizar, depende de la potencia que tenga el motor seleccionado. • Costo medio de fabricación

Continúa →

Figura 27. Trefiladora con sistema múltiple compensado
 Fuente: (Caru, 2018)

- El sistema de lubricación depende del tamaño de la máquina

3.2.8.1 Selección de sistema de trefilado

Para seleccionar adecuadamente se utilizará la matriz de Hales mostrada en la *Tabla 11* y se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo de fabricación
- Consumo de potencia
- Espacio de instalación

Tabla 11.

Matriz de Hales para selección de sistema de trefilado

<i>Alternativas a evaluar</i>						
Módulo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3			
Sistema de trefilado	Múltiple continuo	Múltiple de acumulación	Múltiple compensado			
<i>a. Evaluación del peso específico de cada criterio</i>						
Criterio	Costo	Consumo de potencia	Espacio de instalación	Suma +1	Ponderación	Hitos
Costo		2,5	2,5	6	0,333	2
Consumo de potencia	2,5		5	8,5	0,472	1
Espacio de instalación	2,5	0		3,5	0,194	3
Total				18	1	
<i>b. Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-</i>						
<i>Criterio Costo</i>						
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	2
Alternativa 2	2,5		0	3,5	0,194	2
Alternativa 3	5	5		11	0,611	1
Total				18	1	
<i>c. Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-</i>						
<i>Criterio Consumo de Potencia</i>						
Consumo de Potencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	3
Alternativa 2	2,5		2,5	6	0,333	2

Continúa →

Continúa →

Alternativa 3	5	2,5		8,5	0,472	1
Total				18	1	

d. Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-
Criterio Espacio de instalación

Estructura	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	2
Alternativa 2	2,5		0	3,5	0,194	2
Alternativa 3	5	5		11	0,611	1
Total				18	1	

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

	Costo	Consumo de potencia	Espacio de instalación	Suma	Prioridad
Alternativa 1	0,065	0,092	0,038	0,194	3
Alternativa 2	0,065	0,157	0,038	0,260	2
Alternativa 3	0,204	0,223	0,119	0,546	1
Total				1	

Fuente (Propia)

Al realizar el análisis se concluye que la opción más óptima es el sistema múltiple compensado porque es de bajo costo de construcción con respecto a las otras alternativas y es de estructura compacta de bajo consumo energético.

3.2.9 Módulo 6 – Materia prima y herramienta

Los materiales más empleados para conformar mediante trefilado son: acero, cobre, aluminio y los latones, aunque puede aplicarse cualquier metal o aleación dúctil. A continuación, se muestra en la tabla 12, las alternativas de selección para la materia prima considerada para trefilar, ver Figuras 28, 29, 30, 31

Tabla 12.
Alternativas para definir la materia prima a trefilar

Alternativas	Ventajas	Desventajas
1. Acero recocido	<ul style="list-style-type: none"> • Dúctil. • Se ajusta con facilidad a los procesos de producción industrial reduciendo el desperdicio y optimizando el tiempo. • Posee una excelente calidad en su recocido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de un proceso de limpieza conocido como decapado, el cual consiste en eliminar la cascarilla de materiales extraños al material.

Continúa →



Figura 28. Alambre de acero recocido

Fuente: (Prieto, 2017)

- Alta maleabilidad, constante suavidad a lo largo del alambre.
- Menor suciedad al momento de trabajarlo.
- Baja resistencia a la tracción del alambre después del trefilado por lo que requiere obligatoriamente de un tratamiento térmico.
- Requiere mayor fuerza de trefilado.

2. Aluminio 1350



Figura 29. Alambre de Aluminio 99%

Fuente: (MIPSA, s.f.)

- Proporciona dureza con bajo peso.
- Tenaz, dúctil y maleable.
- Resistente a la corrosión.
- Alta conductividad térmica y eléctrica.
- No requiere algún proceso de limpieza.
- Reciclable.
- Buena plasticidad.
- Alto costo de adquisición.
- Alto costo de producción.
- Alto costo de producción.
- Es abrasivo para las herramientas.
- Baja disponibilidad en la presentación de alambre desnudo.

3. Cobre electrolítico 99.9%



Figura 30. Alambre de Cobre 99.9%

Fuente: (International)

- Altamente dúctil y maleable.
- Excelente conductividad eléctrica y térmica.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Fácil conformado.
- Alto costo de adquisición.
- Alto costo de producción.
- Baja disponibilidad en la presentación de alambre desnudo.

4. Latón (Cu70/Zn30)



Figura 31. Barras de latón

Fuente: (CIMSA, s.f.)

- Excelente capacidad para ser mecanizado.
- Elevada resistencia a la corrosión.
- Maleable.
- Resistencia mecánica y durabilidad.
- Baja disponibilidad en forma de alambres.
- Elevada fuerza para trefilar.

3.2.9.1 Selección del material a trefilar

Para seleccionar adecuadamente se utilizará la matriz de Hales mostrada en la *Tabla 13* y se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo
- Disponibilidad
- Menor fuerza requerida

Tabla 13.*Matriz de Hales para selección del material a trefilar**a) Alternativas a evaluar*

Módulo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Materia prima	Acero recocido	Aluminio 1350	Cobre 99.90%	Latón Cu70/Zn30

b) Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Costo	Disponibilidad	Menor Fuerza Requerida	Suma +1	Ponderación	Hitos
Costo		0	2,5	3,5	0,194	3
Disponibilidad	5		2,5	8,5	0,472	1
Menor Fuerza Requerida	2,5	2,5		6	0,333	2
Total				18		1

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

Costo	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		0	2,5	2,5	6	0,176	4
Solución B	5		2,5	2,5	11	0,324	1
Solución C	2,5	2,5		2,5	8,5	0,250	2
Solución D	2,5	2,5	2,5		8,5	0,250	2
Total					34	1	

*d) Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-**Criterio Disponibilidad*

Disponibilidad	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		2,5	2,5	5	11	0,324	2
Solución B	2,5		5	5	13,5	0,397	1
Solución C	2,5	0		2,5	6	0,176	3
Solución D	0	0	2,5		3,5	0,103	4
Total					34	1	

*e) Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-**Criterio Menor Fuerza Requerida*

Menor Fuerza Requerida	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Suma +1	Ponderación	Hitos
Solución A		0	0	0	1	0,029	4
Solución B	5		2,5	5	13,5	0,397	1
Solución C	5	2,5		5	13,5	0,397	2

Continúa →

Solución D	5	0	0		6	0,177	3
Total					34	1	

f) *Tabla de ponderación de alternativas tomando en cuenta el peso específico de cada criterio*

	Costo	Disponibilidad	Menor Fuerza Requerida	Suma	Prioridad
Solución A	0,034	0,153	0,010	0,197	3
Solución B	0,063	0,188	0,108	0,358	1
Solución C	0,049	0,083	0,132	0,264	2
Solución D	0,049	0,049	0,083	0,181	4


La solución más óptima es la alternativa B (Aluminio), debido al bajo costo de adquisición, disponibilidad en el mercado nacional y alta ductilidad.

3.2.9.2 Material para los dados

La función principal de los dados es reducir el diámetro del alambre, éstos son fabricados de metales duros como es el caso del carburo de tungsteno, de diamante policristalino y de acero K100. En la *Tabla 14* se muestran dichos materiales (ver *Figura 32, 33 y 34*), con cada una de sus ventajas y desventajas.

Tabla 14.

Alternativas para definir el material de los dados

Alternativas	Ventajas	Desventajas
<p>1. Dados de carburo de tungsteno</p>  <p><i>Figura 32.</i> Dados de carburo de tungsteno Fuente: (Rivom)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Material que permite trefilar filamentos de tungsteno y alambres eléctricos • Material estable, no tóxico e inerte. • Resistente al desgaste y a la corrosión • Posee alta dureza: 68 a 81 HRC • Abarata su costo de adquisición al realizarse insertos 	<ul style="list-style-type: none"> • No es apto para trefilar aceros, debido a que se acorta su vida útil • Tiene costo medianamente alto
<p>2. Dados de diamante policristalino</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuado para trefilar alambres de acero, acero inoxidable. • Tiene alta dureza y resistencia al desgaste • Posee larga vida útil • Resiste elevadas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Es de alto costo de adquisición • Requiere de polvo de diamante para realizar ajustes en su geometría

Continúa →



Figura 33. Dados e insertos de diamante policristalino
Fuente: (SAS, s.f.)

3. Dados de acero K100



Figura 34. Acero K100
Fuente: (Bohler)

- Tiene mediana resistencia al desgaste
- Tiene poca resistencia a la tenacidad y compresión
- Es utilizado para conformar cerámicos
- Es de bajo costo de adquisición
- Baja vida útil
- Al aplicar grandes cargas puede deformarse
- Requiere de un proceso de recocido para mejorar sus propiedades mecánicas

3.2.9.3 Selección de material para los dados

Para seleccionar adecuadamente se utilizará la matriz de Hales mostrada en la *Tabla 15* y se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo de adquisición
- Vida útil
- Mantenimiento

Tabla 15.

Matriz de Hales para selección de material para los dados

Alternativas a evaluar

Módulo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Material de dados	Carburo de tungsteno	Diamante Policristalino	K100

a. Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Costo	Vida útil	Mantenimiento	Suma +1	Ponderación	Hitos
Costo		5	2,5	8,5	0,472	1
Vida útil	0		2,5	3,5	0,194	3
Mantenimiento	2,5	2,5		6	0,333	2
Total				18	1	

Continúa →

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

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	2
Alternativa 2	2,5		0	3,5	0,194	2
Alternativa 3	5	5		11	0,611	1
Total				18	1	

c. Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio-
Criterio Vida útil

Vida útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	3
Alternativa 2	2,5		2,5	6	0,333	2
Alternativa 3	5	2,5		8,5	0,472	1
Total				18	1	

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

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma +1	Ponderación	Hitos
Alternativa 1		2,5	0	3,5	0,194	2
Alternativa 2	2,5		0	3,5	0,194	2
Alternativa 3	5	5		11	0,611	1
Total				18	1	

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

	Costo	Vida útil	Mantenimiento	Suma	Prioridad
Alternativa 1	0,223	0,092	0,204	0,519	1
Alternativa 2	0,026	0,092	0,019	0,137	3
Alternativa 3	0,223	0,011	0,111	0,345	2
Total				1	

Al realizar el análisis se concluye que la opción más óptima es adquirir los dados para trefilar de carburo de tungsteno porque tienen larga vida útil en producciones bajas de alambre.

Para la construcción de los dados se requiere un material más duro que el material a trefilar, la maquinaria y herramientas son de gran precisión, se decide comprarlos, teniendo la seguridad que los ángulos y los diámetros son los ideales y más adecuados para trefilar.

3.3 Resumen

Habiendo seleccionado los componentes generales de la máquina trefiladora se presenta a continuación en la *Figura 35* el diseño preliminar.

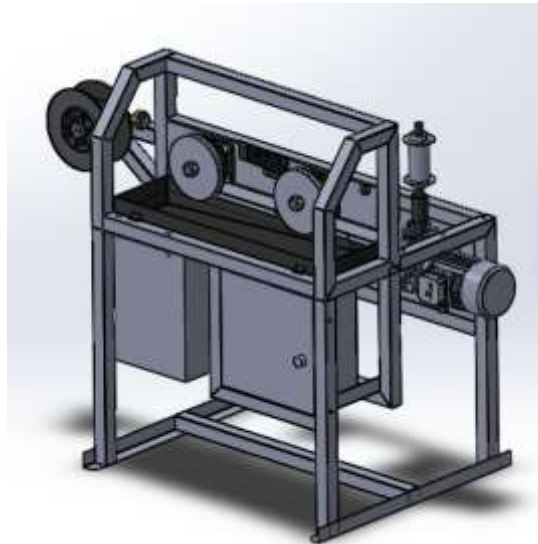


Figura 35. Diseño preliminar

Como resultado de la Casa de la Calidad, la máquina deberá ser diseñada de tal modo que cuente con un sistema modular, de control semiautomático y de estructura compacta. La *Figura 35* muestra la configuración de la máquina tomando en cuenta lo anterior establecido.

La cámara de trefilado cuenta con dos poleas principales guías, un porta dados, una bandeja de recolección de aceite y unos dados de carburo de tungsteno. De acuerdo a la selección, el aceite más óptimo es el SAE 40, la bomba adecuada para circular el aceite es una de desplazamiento positivo rotatorio de paletas y el material que se trefilará será alambre de aluminio.

CAPÍTULO IV

DISEÑO

En el capítulo se muestra el diseño de los ejes, poleas y chumaceras que formarán parte del recorrido del alambre hacia la bobina recolectora de alambre, ya que son los que van a soportar la mayor carga estática y dinámica de estiramiento ejercida por un motor seleccionado a partir de parámetros establecidos. Se determinará el tipo de bomba que será capaz de lubricar a todo el sistema y el control en lazo abierto que permitirá dar inicio al proceso. No se detalla los cálculos del resto de componentes de la máquina, ya que no están sometidos a grandes esfuerzos.

4.1 Diseño mecánico

Una vez se ha definido de manera general los componentes que conforman la máquina se realizó un diseño a detalle, mostrado en la *Figura 36*.



Figura 36. Diseño a detalle de máquina trefiladora.

Una máquina trefiladora requiere de la potencia y torque de un motor que permita realizar el estirado continuo de alambre, como se muestra en la figura 36, de igual forma.

4.1.1 Parámetros de diseño

Considerando que el Laboratorio de Procesos de Manufactura cuenta con un motorreductor de potencia 1 Hp, se ha previsto usarlo en la máquina a construir a fin de optimizar recursos. Primeramente, se realizó un análisis del estado actual del motorreductor (ver Anexo 2), logrando constatar que es apto para ser operado, previo a un mantenimiento. En la *Tabla 16*, se muestra las características principales del motorreductor de marca Transtecno.

Tabla 16.
Características de motorreductor Transtecno

Marca Transtecno 60 Hz					
Potencia	Velocidad de entrada	Velocidad de salida	Torque	Factor de servicio (sf)	Relación de reducción
KW	Rpm	Rpm	Nm		
0.75	1660	20.75	339	1.25	80:1

El diseño del resto de elementos de la máquina será realizado en base al motorreductor existente.

Se calculará la velocidad lineal en el eje del motor, considerando la Ecuación 22 y teniendo en cuenta que la velocidad angular en el motor es 20.75 rpm y que el carrete tiene como diámetro 150 mm (diámetro estándar de carrete en máquinas trefiladoras)

$$v_{Lm} = W_m \times r_c \quad (22)$$

$$v_{Lm} = 0.163 \frac{m}{s}$$

En la salida del motor se tiene de potencia 746 Watts considerando que es usado se reduce su eficiencia a un 85%; la Ecuación 23 permite determinar la potencia final.

$$P_t = P_N \times e \quad (23)$$

$$P_t = 634.1 \text{ Watts}$$

El motorreductor tiene como velocidad angular 20.75 RPM ($\omega=2.1729 \text{ rad/s}$). Con la Ecuación 24 se determinará el nuevo torque en el motor.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (24)$$

$$T = 291.822 \text{ N.m}$$

Conocido el torque y el diámetro del carrete rebobinador de 15 cm; medida estándar de carrete; se calcula la fuerza usando la Ecuación 25.

$$F_m = \frac{T}{r_c} \quad (25)$$

$$F_m = 3890.960 \text{ N}$$

Se ha determinado los nuevos parámetros en el motorreductor, los cuales serán un limitante para el diseño del resto de componentes.

En la *Tabla 17*, se muestran los parámetros necesarios para diseñar los componentes principales que conformarán la máquina trefiladora.

Tabla 17.
Parámetros iniciales de diseño

Parámetros	UNIDAD
Cantidad de dados en una pasada	2
Tipo de alambre	Aluminio 1350 ($k = 140 \text{ MPa}$, $u = 0.25$)
Diámetro inicial de alambre	4.85 mm (<i>Adquirido a nivel nacional</i>)
Rango de porcentaje de reducción	10% – 25%
semiángulo de ataque de dado	20°
Velocidad de trefilado	$\leq 0.152 \text{ m/s}$
Tipo de bomba	De desplazamiento positivo
Tipo de lubricante	SAE 40
Coefficiente de fricción de lubricante	0.1

4.1.2 Cálculo de diámetros de los dados

Para la máquina trefiladora se ha planteado realizar dos reducciones al mismo tiempo. Para calcular el diámetro del dado en la primera pasada se aplicará la Ecuación 26 (Ecuación para determinar el porcentaje de la reducción de área en el proceso trefilar) considerando la menor reducción del rango establecido en la *Tabla 17* y el diámetro inicial del alambre de 4.85 mm

$$\%red = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (26)$$

$$Df = \sqrt{D_o^2 \times \left[1 - \frac{\%red}{100}\right]}$$

$$Df = 4.60 \text{ mm}$$

Para el siguiente paso se reducirá 25% de la sección, considerado el valor máximo de reducción. Al aplicar nuevamente la Ecuación 26, se tiene como diámetro del dado 2, $Df = 4.0 \text{ mm}$. Por motivos didácticos se ha visto necesario adquirir dos pares de dados más, reutilizando el alambre trefilado anteriormente. En la *Tabla 18*, se muestran los diámetros y sus respectivas reducciones.

Tabla 18.

Diámetro de dados de carburo de tungsteno a adquirir

Diámetro final (Do=4.85mm)	% Reducción
4.6	10
4.0	25
3.6	20
3.1	25

4.1.3 Cálculo de potencia de motor

Para determinar la fuerza total de trefilado se suma la fuerza 1 (requerida para disminuir diámetro de 4.85 mm a 4.6 mm) más la fuerza 2 (requerida para disminuir diámetro de 4.6 mm a 4 mm).

A continuación, se presenta el cálculo de la fuerza 1, utilizando las ecuaciones de la sección

2.3.1.4. Fuerza necesaria para trefilar, correspondiente al capítulo II.

$$D_p = \frac{(D_o + D_f)}{2} = \frac{4.85 + 4.60}{2} = 4.725 \text{ mm}$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2\sin(\alpha)} = \frac{4.85 - 4.60}{2\sin(20)} = 0.365 \text{ mm}$$

$$\varphi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} = 0.88 + 0.12 \left(\frac{4.725}{0.365} \right) = 2.431$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{D_o^2}{D_f^2} \right) = \ln \left(\frac{4.85^2}{4.60^2} \right) = 0.106$$

$$Y_f = \frac{K(\varepsilon)^n}{1+n} = \frac{140 \text{ MPa} \times (0.106)^{0.25}}{1+0.25} = 63.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = Y_f \left(1 + \frac{u}{\tan(\alpha)} \right) \varphi \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right)$$

$$\sigma_T = 63.90 \times \left(1 + \frac{0.1}{\tan(20^\circ)} \right) \times 2.431 \times \ln \left(\frac{18.475}{16.619} \right) = 20.96 \text{ MPa}$$

$$F_1 = A_f \times \sigma_T = 16.619 * 20.96 = \mathbf{348.41 \text{ N}}$$

Utilizando las ecuaciones anteriores se calcula la fuerza 2, $F_2 = \mathbf{535.405 \text{ N}}$. Por lo tanto, la fuerza total es $F_t = \mathbf{883.82 \text{ N}}$.

Se debe tener en cuenta que la fuerza total calculada, no debe exceder la resistencia del alambre trefilado, la cual representa el 80% del esfuerzo de fluencia en la salida del dado (27) (Schey, 2001).

$$F_{\text{trefilado}} < 0.80 (K\varepsilon_{\text{total}}^n) \times A_f \quad (27)$$

$$F_{\text{trefilado}} < 0.80 (140\text{MPa} \times (0.106 + 0.2795)^{0.25}) \times 13.854$$

$$F_{\text{trefilado}} < 1108.912 \text{ N}$$

$$\mathbf{883.82 \text{ N} < 1108.912 \text{ N}}$$

Al comparar las fuerzas, se concluye que el alambre no fallará al aplicar dicha carga.

En la *Tabla 19*, se muestran los resultados de cálculo del resto de fuerzas de trefilado correspondientes a los diámetros establecidos en la tabla 18. Se ha establecido a futuro trefilar cobre puro, por lo que se muestra en la *Tabla 20*, las fuerzas requeridas para trabajar con este material utilizando los mismos datos.

Tabla 19.

a. *Cálculo de Fuerza requerida para trefilar alambre de aluminio 1350*

Aluminio 1350							
Diámetro inicial	Diámetro final	Reducción	Deformación real	Esfuerzo de fluencia (Yf)	Esfuerzo de trefilado (Gd)	Fuerza de trefilado	Fuerza segura
mm	mm	%	--	MPa	MPa	N	N
4.85	4.60	10.04	0.1058	63.883	20.957	348.410	
4.60	4.00	25.00	0.2795	81437	42.606	535.406	
					F-total	883.696	1108.912
4.00	3.60	20.00	0.2107	75.883	33.832	344.373	
3.60	3.10	25.00	0.2021	82.825	45.152	340.789	
					F-total	685.163	714.300

b. *Cálculo de Fuerza requerida para trefilar alambre de cobre 99%*

Cobre 99%							
Diámetro inicial	Diámetro final	Reducción	Deformación real	Esfuerzo de fluencia (Yf)	Esfuerzo de trefilado (Gd)	Fuerza de trefilado	Fuerza segura
mm	mm	%	--	MPa	MPa	N	N
4.85	4.60	10.04	0.1058	161.251	52.900	879.140	
4.60	4.00	25.00	0.2795	192.815	79.733	1104.649	
					F-total	1983.790	3306.626
4.00	3.60	20.00	0.2107	202.388	90.2348	918.4781	
3.60	3.10	25.00	0.2991	227.176	123.845	934.7384	
					F-total	1853.216	2175.471

Se puede observar que la mayor carga requerida para trefilar alambre es $F_{tc1} = 3306.626 \text{ N}$ correspondiente a una reducción de alambre de cobre puro de 4.85 mm a 4 mm.

Para verificar si la potencia del motorreductor permite trefilar lo antes mencionado, se determinará la potencia requerida, Ecuación 28, conocida la velocidad lineal existente en el motor de 0.165 m/s.

$$P = F \times v \quad (28)$$

$$P = 3306.626 \text{ N} \times 0.165 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 545.6 \text{ W}$$

Considerando un factor de servicio de 1.25 dado por el fabricante (ver *Tabla 16*), la potencia requerida calculada con la Ecuación 29, es:

$$P_r = FS \times P \quad (29)$$

$$P = 1.25 \times 545.6 \text{ W} = 682 \text{ W} = \mathbf{0.91 \text{ HP}}$$

En conclusión, el motorreductor del Laboratorio de Procesos de Manufactura es capaz de trefilar alambre de aluminio y cobre puro de 4.85 mm hasta 3.1 mm

4.1.4 Cálculo de velocidad de trefilado

Para el análisis se tomará en cuenta la *Figura 37*.

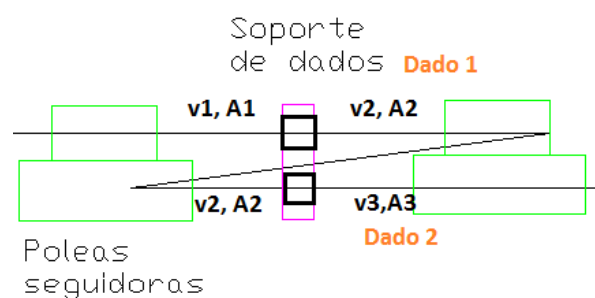


Figura 37. Cámara de trefilado

La velocidad lineal del motor (0.165 m/s), será la misma con la cual se trefilará en el dado 2, de 4.6 mm a 4 mm. Para determinar la velocidad en el dado 1, se considerará la constancia de volumen mostrada en la Ecuación 30.

$$A_2 \times v_2 = A_3 \times v_3 \quad (30)$$

Una vez determinadas las áreas de los diámetros 4.6 mm y 4 mm, $A_2 = 16.619 \text{ m}^2$ y $A_3 = 12.566 \text{ m}^2$ respectivamente, se obtiene lo siguiente:

$$v_2 = \frac{A_3 \times v_3}{A_2} = 0.124 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4.1.5 Cálculo de diámetros de las poleas

La configuración de la cámara de trefilado se muestra en la *Figura 38*.

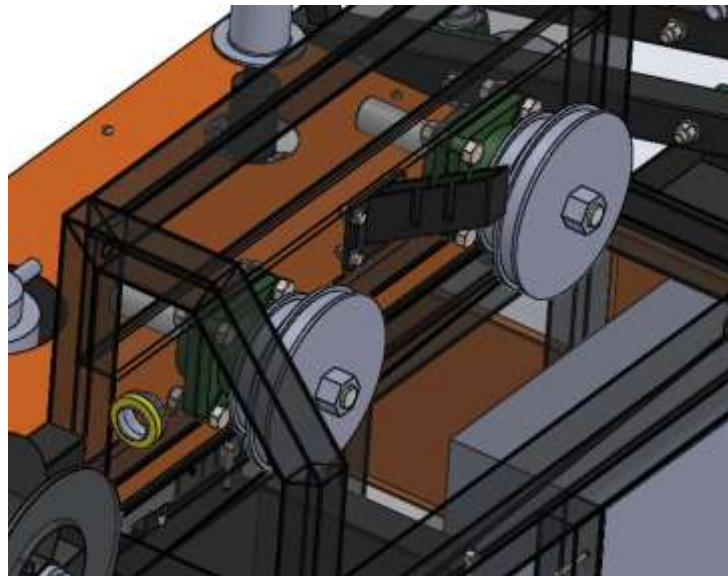


Figura 38. Ejes A y B con poleas principales

Para que el alambre se enrolle sin generar mayores tensiones, se asumirá un diámetro de 200 mm ($r_M = 0.1 \text{ m}$) a la polea mayor, para ambos ejes. Para calcular el diámetro de la polea menor se considera que por girar en el mismo eje, la velocidad angular es la misma, obteniendo lo siguiente:

$$r_m = \frac{v_2 \times r_M}{v_3} = \frac{0.124 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.10 \text{ m}}{0.165 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.075 \text{ m}$$

Por lo tanto, se va a adquirir una polea escalonada de $d_M = 0.20$ m y $d_m = 0.15$ m para cada eje. Por el proceso a desarrollar se decidió realizar las poleas de aluminio fundido, por ser liviano y resistente.

4.1.6 Diseño de ejes

Diseño de ejes principales de cámara de trefilado

Para diseñar los ejes principales se tomará en cuenta el esquema de la *Figura 39*.

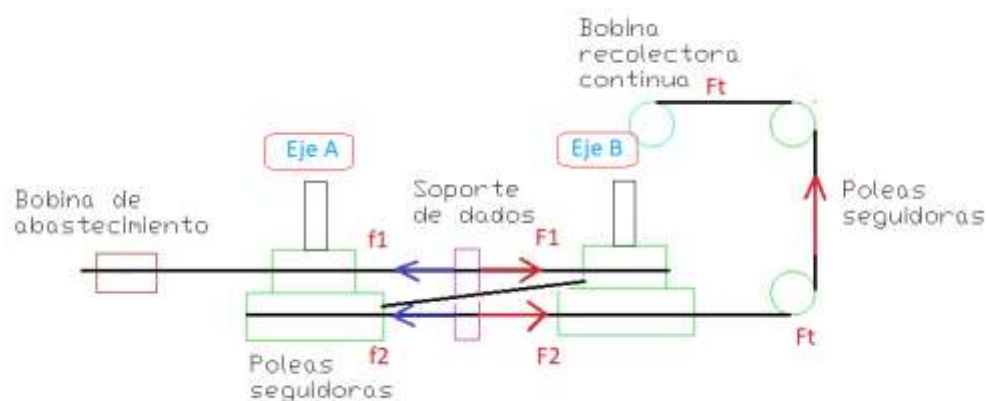


Figura 39. Esquema de cámara de trefilado.

Como se puede observar, el eje B es el que está sometido a la mayor carga de trefilado.

EJE B

En la figura 40, se muestra el diagrama de cuerpo libre correspondiente al eje B:

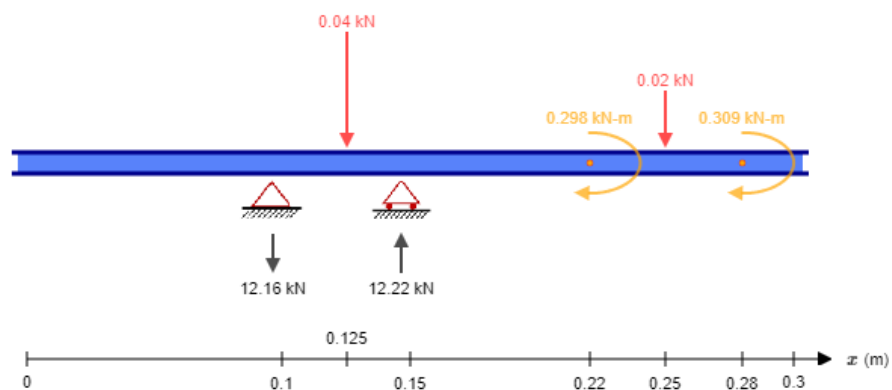


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de eje B

Al realizar la sumatoria de fuerzas y momentos se tiene:

$$R_1 = 12.16 \text{ kN}$$

$$R_2 = 12.22 \text{ kN}$$

Diagrama de Momentos:

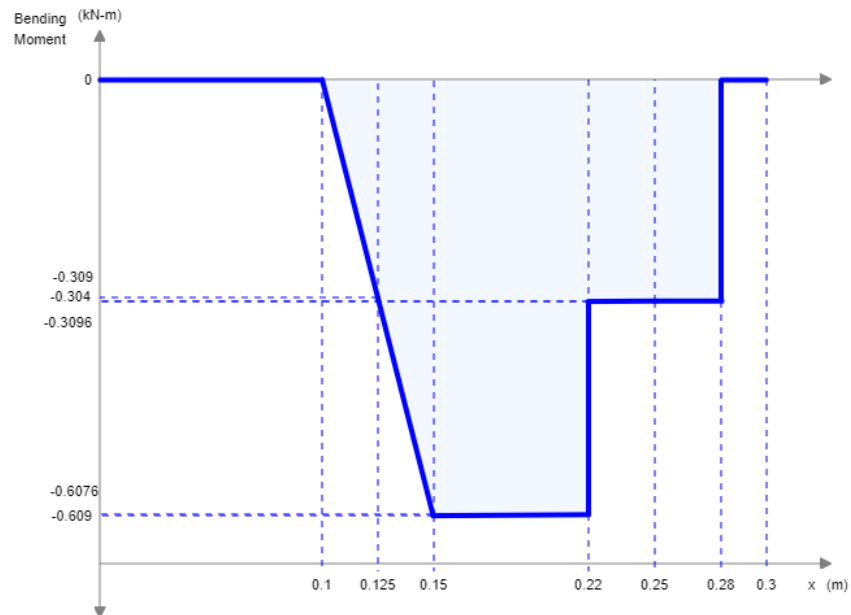


Figura 41. Diagrama de momentos de eje B

En la *Figura 41*, se puede observar que el punto más crítico está a los 15 cm del eje con un valor de momento máximo de $M = 0.609 \text{ kN.m}$ (*Punto crítico*) = 5390.104 *Lb.in*

Cálculo del torque

$$T = \frac{P}{W}$$

Donde:

$$P = 634.1 \text{ W}$$

$$W = 20.75 \text{ RPM} = 2.1729 \text{ rad/s}$$

$$T = 291.82 \text{ N.m} = 2586.825 \text{ Lb.in}$$

Material del eje:

Acero SAE 1018 con las propiedades mecánicas de $S_y = 31 \frac{kg}{mm^2}$, $S_{ut} = 51 \frac{kg}{mm^2}$, ver hoja técnica en Anexo 1.

Esfuerzo de diseño a fatiga:

Considerando que se manejará un acero el límite de resistencia a fatiga Se' (NORTON) tenemos:

Datos:

$$S_y = 31 \frac{Kg}{mm^2} = 44080.176 \text{ Psi}$$

$$S_{ut} = 51 \frac{Kg}{mm^2} = 72519 \text{ Psi}$$

$$Se' = 0.5 \times S_{ut} \quad (31)$$

$$Se' = 25.5 \frac{Kg}{mm^2}$$

A lo anterior se aplicará los factores de corrección:

$$Se = C_{carga} \times C_{tamaño} \times C_{sup} \times C_{temp} \times C_{conf} \times Se' \quad (32)$$

$$Se = (1)(0.84)(0.90)(1)(1)(220) = 19.278 \frac{Kg}{mm^2} = 27412.182 \text{ Psi}$$

Se aplicará carga de flexión y torsión de modo que $C_{carga} = 1$, recalculado $C_{tamaño} = 0.84$, para el acabado superficial se tiene maquinado que tiene factores de $A=4.51$ y $b=-0.265$ por lo tanto $C_{sup} = A(S_{ut})^b = 0.90$, en el caso de $C_{temp} = 1$ ya que se trabajará a temperaturas menores de 450°C , se supone un 50% de confiabilidad siendo $C_{conf} = 1$.

El factor de concentración de esfuerzos por fatiga (el factor K_t y q se encontró mediante las tablas del Apéndice G del libro Diseño de Máquinas (Norton, 2011)) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (33)$$

$$Kf = 1 + 0.8(0.94 - 1) = 0.952$$

La concentración de esfuerzos por torsión:

$$K_{fs} = 1 + q(K_{ts} - 1) \quad (34)$$

$$K_{fs} = 1 + 0.8(0.85 - 1) = 0.88$$

Finalmente, el diámetro del eje teniendo como factor de seguridad $Nf = 1.5$ es:

$$d_A = \left\{ \frac{35 \times Nf}{\pi} \left[\left(Kf \frac{Mc}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(Kfs \frac{T}{Sy} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

$$d_A = \left\{ \frac{35 \times 1.5}{\pi} \left[\left(0.952 \frac{5390.104}{27412.182} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(0.88 \frac{2586.825}{44080.176} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_A = 1.433 \text{ in}$$

Se aproxima a 1.50 in de diámetro de eje ya que es una medida comercial. Entonces los ejes A y B tendrán de diámetro 1.50 in con una reducción de una pulgada.

Diseño de eje de motor

Para diseñar el eje principal que rebobina y estira el alambre, las cargas que intervienen para el análisis se muestra en la *Figura 42*.

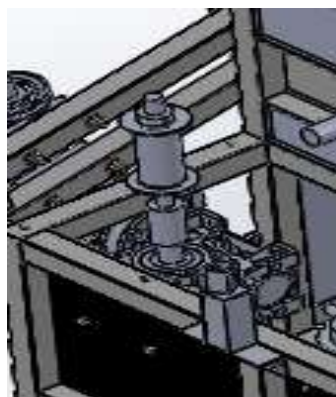


Figura 42. Esquema de eje a la salida del motorreductor

La fuerza total de trefilado está aplicada directamente al eje como máximo **3306.626 N**.

EJE M

En la *Tabla 20*, se muestran los resultados de diseño del eje M (ver *Figura 43 y 44*).

Tabla 20.

Cálculo de diámetro de eje M.

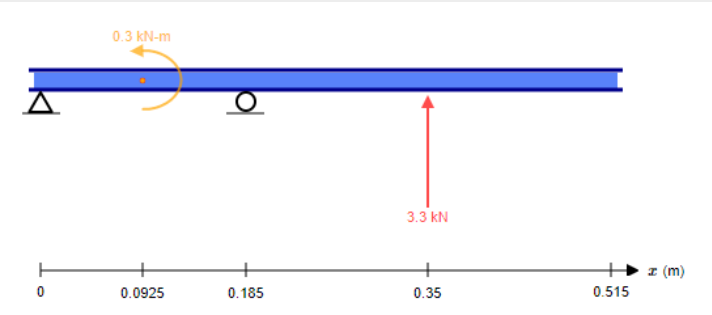
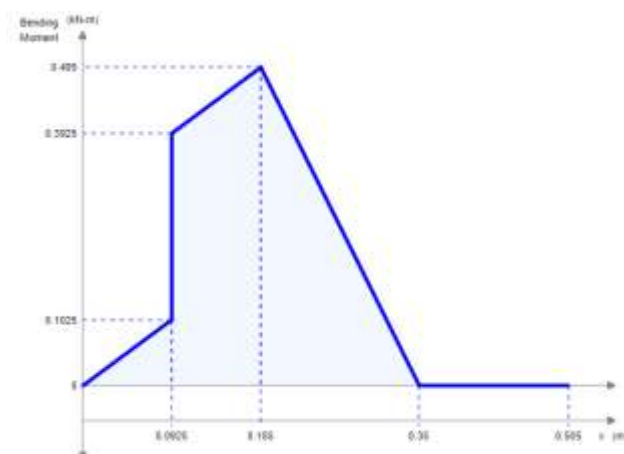
Esquemas	Resultados
<p style="text-align: center;">Diagrama de cuerpo libre:</p>  <p style="text-align: center;">Figura 43. Diagrama de cuerpo libre de eje M</p>	<p>Se utilizó un acero AISI 1045, ver hoja técnica en Anexo2.</p> $R_{x1} = R_{y1} = 1.108 \text{ kN}$ $R_{x2} = R_{y2} = 4.108 \text{ kN}$

Diagrama de Momentos:



$$M = 0.50 \text{ kN.m}$$

$$Tm = 291.82 \text{ N.m}$$

$$Se = 34950.703 \text{ Psi}$$

$$d_A = 0.91 \text{ in}$$

Figura 44. Diagrama de momentos de eje M

Se aproxima a 1 in de diámetro de eje ya que es una medida comercial.

Análisis computacional eje M

Por ser un elemento crítico en el diseño de la máquina se realizó un análisis computacional para determinar su máxima deformación.

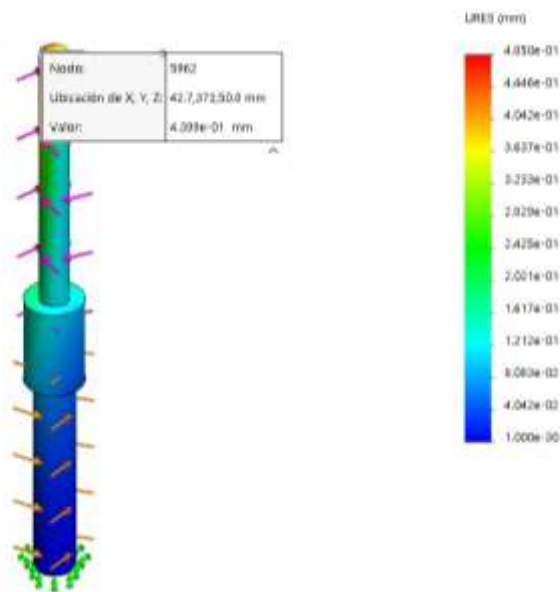


Figura 45. Esquema de eje de motor

En la figura 45, se muestra que la mayor deflexión es de 0.44 mm al aplicar una carga de 1200 N, al realizar el proceso de trefilado con alambre de aluminio. Concluyendo que el eje podrá resistir dicha carga.

Diseño de ejes guía

Para diseñar los ejes guía se analizarán las cargas mostrados en la *Figura 46*.

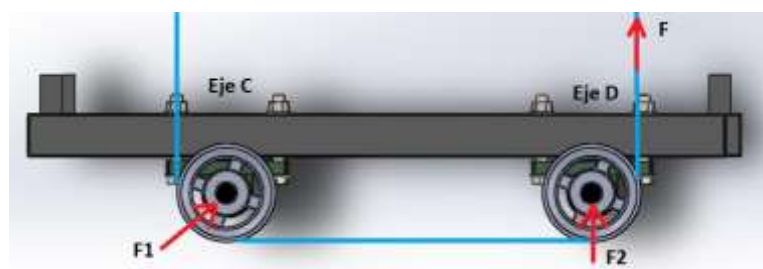


Figura 46. Esquema de ejes guía

En el eje C, la fuerza total de trefilado está aplicada directamente al eje con un ángulo de 45° , en el eje B se aplica directamente la carga en la misma línea de acción del rebobinado de alambre.

EJE C

En la *Tabla 21*, se muestran los resultados de diseño del eje C (ver *Figura 47 y 48*).

Tabla 21.
Cálculo de diámetro de eje C.

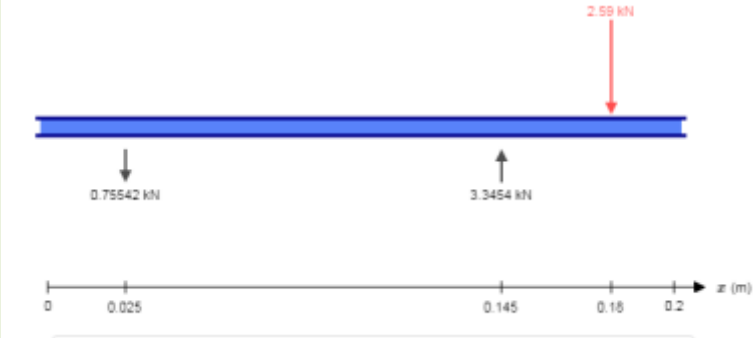
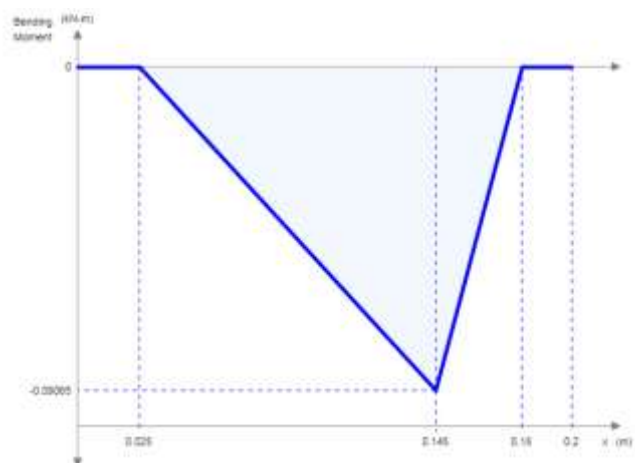
Esquemas	Resultados
<p align="center">Diagrama de cuerpo libre:</p> 	$R_{x1} = R_{y1} = 0.756 \text{ kN}$ $R_{x2} = R_{y2} = 3.35 \text{ kN}$
<p><i>Figura 47.</i> Diagrama de cuerpo libre de eje C</p>	

Diagrama de Momentos:



$$M = 0.091 \text{ kN.m}$$

$$T_m = 164.40 \text{ N.m}$$

$$S_e = 24122.677 \text{ Psi}$$

$$d_A = 0.81 \text{ in}$$

Figura 48. Diagrama de momentos de eje C

Se aproxima a 1 in de diámetro de eje ya que es una medida comercial. Para el eje D se tomará el mismo diámetro ya que el eje con C es el que tiene la mayor carga aplicada en dos direcciones.

4.1.7 Selección de las chumaceras

Chumacera para ejes principales

Para determinar la chumacera de pared adecuada se considerará el cojinete para un millón de revoluciones $L_{10} = 1 \times 10^6$; como vida nominal recomendado por la norma ISO 281; una vida deseada de 3000 horas; de acuerdo al fabricante de la marca KDF (Kdf, s.f.); 21 rpm de velocidad angular, sometido a una carga de **3306.626 N** y con una confiabilidad de 90%.

Para calcular la carga nominal dinámica se ha tomado la Ecuación 36, de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (Budyas & Nisbett).

$$C_{10} = F_D * \left(\frac{L_D * n_D * 60}{L_{10}} \right)^{1/a} \quad (36)$$

Donde:

C_{10} = Coeficiente de carga dinámica

F_D = Carga radial aplicada a la chumacera

n_D = Velocidad deseada en rpm

L_D = Vida deseada en horas

L_{10} = Vida nominal

a = Factor constante (10/3 para cojinetes de rodillos - rodillo cilíndrico y cónico)

Se tiene que:

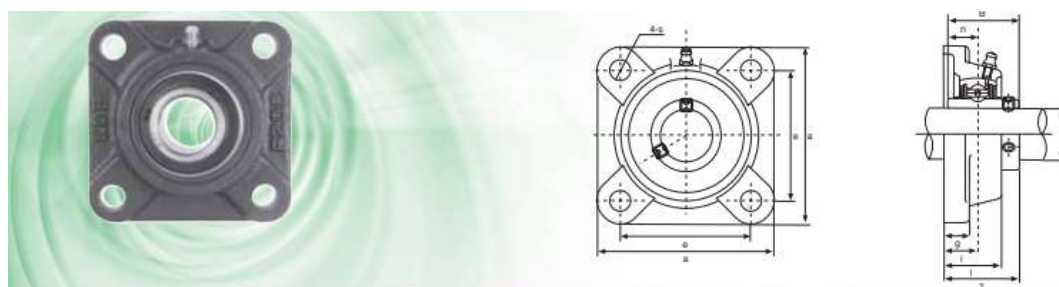
$$F_D = \frac{F_2}{2} = \frac{3306.626}{2} = 1653.313 \text{ N}$$

Por lo tanto,

$$C_{10} = 1653.313 N * \left(\frac{3000 h * 21 rpm * 60}{1 \times 10^6} \right)^{\frac{3}{10}}$$

$$C_{10} = 2863.458 N$$

Considerando que los ejes tienen diámetro 1.5 in, se comparará el valor calculado de carga dinámica, con el establecido por el catálogo del fabricante (KDF), obteniendo los siguientes resultados:



Tipo Type	Dimensioni mm/pollici Dimensions mm/inch										Bull. fiss. Bolt Size mm/inch	Coefficienti di carico (N) Load ratings (N)		Cuscinetto Bearing	Supporto Housing	Peso Weight (kg)
	d	a	e	i	g	l	s	z	B	n		Dinamico C _D Dynamic C _D	Statico C _S Static C _S			
UCFX05 UCFX05-13 UCFX05-14 UCFX05-15 UCFX05-16	25 1 13/16 7/8 13/16 1	108 4 1/4	83 3 1/8	18 3/4	13 1/2	30 1 1/8	12 1/2	40,2 1 5/8	38,1 1,5000	15,9 0,626	M10	18 600	10 800	UCX05 UCX05-13 UCX05-14 UCX05-15 UCX05-16	FX05	1,0
UCFX06 UCFX06-17 UCFX06-18 UCFX06-19 UCFX06-20	30 1 1/8 1 1/8 1 1/8 1 1/4	117 4 5/8	92 3 5/8	19 3/4	14 9/16	34 1 1/2	16 5/8	44,4 1 3/4	42,9 1,6890	17,5 0,689	M14	24 500	14 600	UCX06 UCX06-17 UCX06-18 UCX06-19 UCX06-20	FX06	1,7
UCFX07 UCFX07-21 UCFX07-22 UCFX07-23	35 1 3/8 1 3/8 1 7/8	130 5 1/8	102 4 1/4	21 3/4	14 9/16	38 1 1/2	16 5/8	51,2 2 1/4	49,2 1,9370	19 0,748	M14	27 700	17 000	UCX07 UCX07-21 UCX07-22 UCX07-23	FX07	2,1
UCFX08 UCFX08-24 UCFX08-25	40 1 5/8 1 5/8	137 5 3/8	105 4 1/4	22 3/4	14 9/16	40 1 5/8	19 3/4	52,2 2 1/4	49,2 1,9370	19 0,748	M16	30 900	19 400	UCX08 UCX08-24 UCX08-25	FX08	2,4
UCFX09 UCFX09-26 UCFX09-27 UCFX09-28 UCFX09-29	45 1 7/8 1 7/8 1 7/8 1 7/8	143 5 5/8	111 4 3/8	23 3/4	14 9/16	40 1 5/8	19 3/4	55,6 2 1/8	51,6 2,0315	19 0,748	M16	33 000	22 100	UCX09 UCX09-26 UCX09-27 UCX09-28 UCX09-29	FX09	2,5

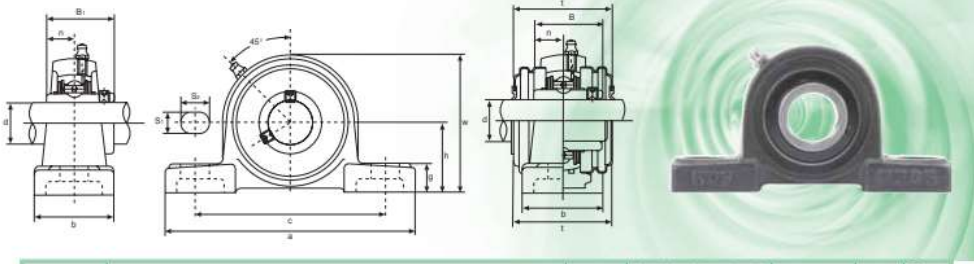
Figura 49. Selección de chumacera de pared.

Fuente: (Kdf, s.f.)

Como se puede observar en la *Figura 49*, el valor del coeficiente de carga dinámica calculado, es menor que el establecido nominal en el catálogo ($2863.458 N < 30900 N$). Por tanto, la chumacera es capaz de trabajar bajo las condiciones antes mencionadas.

Chumaceras para ejes secundarios

La chumacera requerida para los ejes secundarios es de piso de 1 in, de acuerdo al diseño. Considerando la ecuación 36 y tomando en cuenta los mismos parámetros para diseñar las chumaceras principales, se tiene como carga dinámica $C_{10} = 3389.937 N$.



Tipo Type	Dimensioni mm/pollici Dimensions mm/inch												Bull. flss. Bolt Size mm/inch	Coefficienti di carico (N) Load ratings (N)		Cuscinetto Bearing	Supporto Housing	Peso Weight (kg)
	d	h	a	e	b	S ₁	S ₂	g	w	t	B	n		Dinamico C _d Dynamic C _d	Statico C _s Static C _s			
UCP201 UCP201-8	12 3/4	30,2 1 1/8	127 5	95 3 3/4	38 1 1/2	13 1/2	19 3/4	14 9/16	62 2 7/16	44,5 1 3/4	31 1,2205	12,7 0,500	M10 3/8	12 200	6 350	UC201 UC201-8	P203	0,69 0,69
UCP202 UCP202-9 UCP202-10	15 9/16	30,2 1 1/8	127 5	95 3 3/4	38 1 1/2	13 1/2	19 3/4	14 9/16	62 2 7/16	44,5 1 3/4	31 1,2205	12,7 0,500	M10 3/8	12 200	6 350	UC202 UC202-9 UC202-10	P203	0,69 0,69 0,69
UCP203 UCP203-11	17 1 1/8	30,2 1 1/8	127 5	95 3 3/4	38 1 1/2	13 1/2	19 3/4	14 9/16	62 2 7/16	44,5 1 3/4	31 1,2205	12,7 0,500	M10 3/8	12 200	6 350	UC203 UC203-11	P203	0,68 0,67
UCP204 UCP204-12	20 3/4	33,3 1 1/8	127 5	95 3 3/4	38 1 1/2	13 1/2	19 3/4	14 9/16	65 2 1/2	44,5 1 3/4	31 1,2205	12,7 0,500	M10 3/8	12 200	6 350	UC204 UC204-12	P204	0,66 0,66
UCP205 UCP205-13 UCP205-14 UCP205-15 UCP205-16	25 1 1/8	36,5 1 1/2	140 5 1/2	105 4 1/4	38 1 1/2	13 1/2	19 3/4	15 9/16	71 2 3/4	48 1 7/8	34,1 1,3425	14,3 0,563	M10 3/8	13 300	7 500	UC205 UC205-13 UC205-14 UC205-15 UC205-16	P205	0,81 0,85 0,83 0,82 0,81
UCP206 UCP206-17 UCP206-18 UCP206-19 UCP206-20	30 1 1/8	42,9 1 7/8	165 6 1/2	121 4 3/4	48 1 7/8	17 5/8	20 3/4	17 9/16	84 3 1/4	53 2 1/4	38,1 1,5000	15,9 0,626	M14 1/2	18 600	10 800	UC206 UC206-17 UC206-18 UC206-19 UC206-20	P206	1,24 1,27 1,26 1,24 1,23

Figura 50. Selección de chumacera de pared.

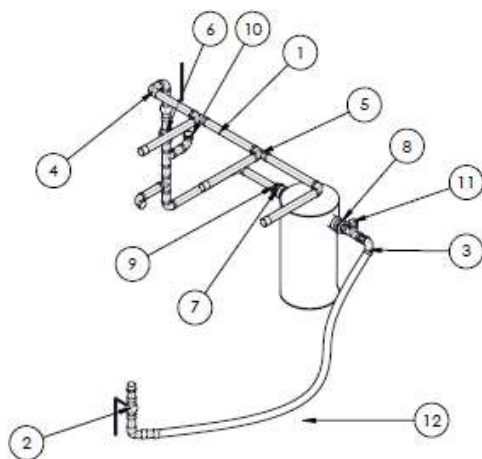
Fuente: (Kdf, s.f.)

Como se puede observar en la *Figura 50*, el valor del coeficiente de carga dinámica calculado es menor que el establecido nominal en el catálogo (**3389.937 N < 13 300 N**). Por tanto, la chumacera es capaz de trabajar bajo las condiciones antes mencionadas.

4.1.8 Diseño de sistema de lubricación

Diseño hidráulico

En la *Figura 51* se presenta la trayectoria y componentes (tubería, válvulas, accesorios) de un sistema abierto de lubricación, por los cuales debe circular y recircular el lubricante durante el proceso de trefilado, para esto es necesario realizar los cálculos hidráulicos para seleccionar la bomba correcta.



TUBERÍA, VÁLVULAS Y ACCESORIOS (SISTEMA DE LUBRICACIÓN)					
MK	QTY	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO UNIT	PESO TOTAL
1	1	1/2", TUBERÍA, SCH 40, GALVANIZADO, THDM, L=2000mm	A 106	2.52	2.52
2	2	1/2", VÁLVULA DE BOLA, 316SS, SCREWED NPT ENDS PER ANSI / ASME B1.20.1	316SS	0.91	1.82
3	7	1/2", CODO DE 90° LR, FPT, GALVANIZADO	A234 WPB	0.10	0.70
4	1	1/2", CODO DE 90° LR, THDM NPT & THDF NPT, GALVANIZADO	A234 WPB	0.10	0.10
5	5	1/2", TEE, FPT, GALVANIZADO	A234 WPB	0.11	0.55
6	1	1/2", UNIVERSAL, FPT, GALVANIZADO	A234 WPB	0.13	0.13
7	1	1"X3/4", BUSHING THDF & THDM, 3000 LB, 316SS	A 105	0.18	0.18
8	1	1"X1/2", BUSHING THDF & THDM, 3000 LB, 316SS	A 105	0.14	0.14
9	2	3/4"X1/2", BUSHING THDF & THDM, 3000 LB, 316SS	A 105	0.13	0.26
10	2	1/2"X1/4", BUSHING THDF & THDM, 3000 LB, 316SS	A 105	0.10	0.20
11	1	1/2", TAPON HEXAGONAL, THDM, 3000LB, 316SS	A 105	0.09	0.09
12	1	1/2", MANGUERA HIDRAULICA, 3000 LB, L=1400mm	-	1.05	1.05
TOTAL PESO (KG)					7.74 KG

Figura 51. Tuberías válvulas y accesorios del sistema hidráulico

Datos de entrada utilizados.

Tabla 22.

Datos del fluido lubricante

Tipo de fluido:	Aceite hidráulico SAE 40
Densidad:	$896 \frac{kg}{m^3}$
Viscosidad dinámica:	$0.10752 \frac{Ns}{m^2}$
Viscosidad cinemática:	$0.000120 \frac{m^2}{s}$
Presión de vapor:	$\leq 133 \text{ Pa}$

Memoria de cálculo.

Según el manual del Ingeniero Químico Perry, se recomienda una velocidad del fluido, $v = 1$ a 2.5 m/s para el transporte de lubricantes en tuberías de acero al carbono y/o galvanizado y partiendo de una tubería de $1/2''$ galvanizada $D = 21.3 \text{ mm}$, sch 40 con un espesor $e = 0.109 \text{ in} = 2.77 \text{ mm}$ obtenida de la siguiente tabla de fabricante (ver *Tabla 23*).

Tabla 23.
Tabla de NPS, espesor y cédula de tubería

Diámetro Nominal		Diámetro Exterior		Espesor de Pared		Peso Teórico	Presiones de prueba hidrostática			
pulg.	mm	pulg.	mm	pulg.	ced.	Kg/m	ASTM A 53 Gr A		ASTM A 53 Gr B	
							lb/pulg2	kg/cm2	lb/pulg2	kg/cm2
1/2"	13	0.840	21.3	0.090	L-200	1.07	700	49		
				0.109	40-Std	1.27	700	49	700	49
				0.147	80-(XS)	1.69	850	60	850	60
3/4"	19	1.050	26.7	0.195	L-200	1.44	700	49		
				0.113	40-Std	1.69	700	49	700	49
				0.154	80 (XS)	2.20	850	60	850	60
1	25	1.315	33.4	0.104	L-200	2.00	700	49		
				0.133	40-Std	2.50	700	49	700	49
				0.179	80 (XS)	3.24	850	60	850	60
1 1/4	32	1.660	42.2	0.110	L-200	2.71	1200	84		
				0.140	40-Std	3.39	1200	84	1300	91
				0.191	80	4.47	1800	127	1900	134
1 1/2	38	1.900	48.3	0.115	L-200	3.26	1200	84		
				0.145	40-Std	4.05	1200	84	1300	91
				0.200	80	5.41	1800	127	1900	134
2	51	2.375	60.3	0.120	L-200	4.30	1200	84		
				0.154	40-Std	5.44	2300	162	2500	176
				0.218	80	7.48	2500	176	2500	176
2 1/2	64	2.875	73.0	0.160	L-200	6.91	1950	137		
				0.203	40-Std	8.63	2500	176	2500	176
3	75	3.500	88.9	0.170	L-200	9.01	1750	123		
				0.216	40	11.29	2220	156	2500	176
4	100	4.500	114.3	0.185	L-200	12.70	1500	105		
				0.237	40-Std	16.07	1900	134	2210	155
6	150	6.625	168.3	0.188		19.27	1020	72	1190	84
				0.250		25.36	1360	96	1580	111
				0.280	40-Std	28.26	1520	107	1780	125

Fuente: (Gomar)

Se obtiene que el diámetro interior es $d = D - 2(e) = 21.3\text{mm} - 2(2.77) = 15.76 \text{ mm}$ y haciendo uso de la ecuación de continuidad (14) se obtiene el caudal necesario.

$$Q = V \times \frac{\pi D^2}{4}$$

$$Q = 2.92 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = 4.63 \left(\frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)$$

Es el caudal ideal, pero en el mercado se encuentra una bomba con una capacidad de caudal $Q = 7 \text{ gpm} = 4,41 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$, por lo cual se vuelve a calcular una nueva velocidad.

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = 2,26 \frac{m}{s}$$

A continuación, determinamos el tipo de flujo mediante la ecuación de Reynolds, ver Ecuación 37.

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (37)$$

$$Re = 297 < 2200 \rightarrow \text{Flujo Laminar}$$

Para determinar el factor de fricción f , se sabe que el flujo es laminar entonces se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{297} = 0.21$$

Para determinar la longitud L de la tubería se hace uso de la *Figura 52*

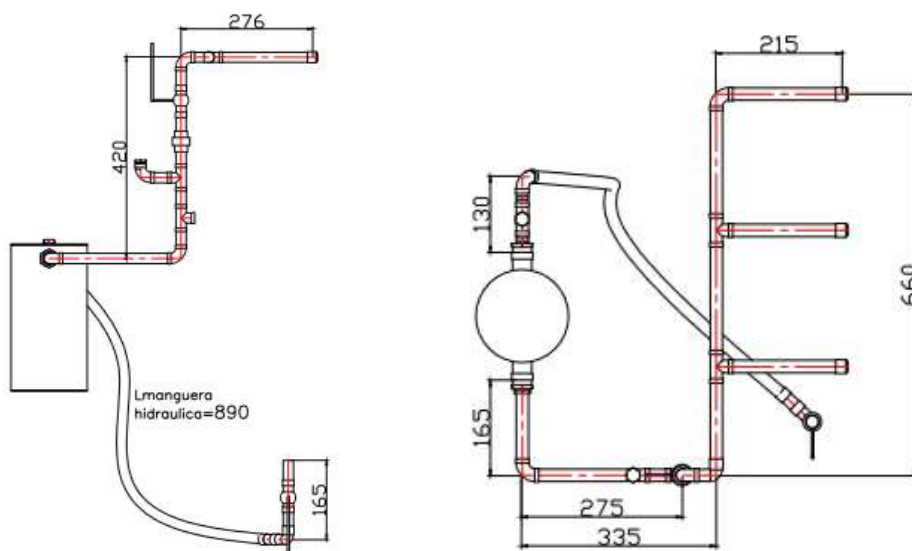


Figura 52. Dimensionamiento de sistema de lubricación

En los cuales se determina que la longitud total es igual a $L = 2.89m$.

Para calcular las pérdidas mayores se utiliza el primer término de la Ecuación 15.

$$h_{L, mayor} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g}$$

$$h_{L, \text{ mayor}} = 10.02 \text{ m}$$

Para calcular las pérdidas menores se utiliza el segundo término de la Ecuación 15.

$$h_{L, \text{ menor}} = \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g}$$

Se necesita conocer los coeficientes de pérdida K_L de los accesorios, válvulas que intervienen en la línea para lo cual se hace uso de las tablas de los fabricantes mostrados en la *Tabla 24*.

Tabla 24.
Coefficientes de pérdida de carga en accesorios.

Cantidad	Descripción	K_L	$\sum K_L$
5	Elbow 90°, regular, thrd, ½", galv.	0.9	4.5
5	Tees, thrd, ½", galv.	0.9	4.5
2	Ball valve 1/2", ASTM A182 F304	4.05	9.1
1	Expansión al ingreso de la bomba	0.4	0.4
1	Contracción a la salida de la bomba	0.15	0.15
		$\sum K_L$	18.65

Fuente: (Martinez Y. , 2016)

$$h_{L, \text{ menor}} = 4.5 \text{ m}$$

$$h_{L, \text{ total}} = h_{L, \text{ mayor}} + h_{L, \text{ menor}}$$

$$h_{L, \text{ total}} = 14.52 \text{ m}$$

Con este dato se obtiene las pérdidas por fricción al multiplicarlo por la densidad y gravedad.

$$\Delta p_f = h_{L, \text{ total}} * \rho * g$$

$$\Delta p_f = 127627.32 \text{ Pa} = 18.5 \text{ PSI}$$

Para determinar la Cabeza Total de Descarga (TDH)

$$TDH = \frac{p_2 - p_1 + \Delta p_f}{\rho g} + (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

Se tiene que $v_1 = 0$

$$TDH = 27.23 \text{ m}$$

Para determinar la cabeza neta de succión disponible

$$NPSH_a = \frac{p_1 - p_{vp} - \Delta p_f}{\rho g} + (h_1 - h_{succ})$$

Se necesita determinar las pérdidas por fricción aguas abajo de la bomba.

$$h_{L, \text{ mayor } 2} = 4.13 \text{ m}$$

$$h_{L, \text{ menor } 2} = 1.62 \text{ m}$$

$$h_{L, \text{ total } 2} = h_{L, \text{ mayor } 2} + h_{L, \text{ menor } 2} = 5.75 \text{ m}$$

$$\Delta p_f = h_{L, \text{ total } 2} * \rho * g$$

$$\Delta p_f = 50541.12 \text{ Pa} = 7.33 \text{ PSI}$$

$$NPSH_a = 5.56 \text{ m}$$

Cálculo de la inclinación del recolector de aceite

El recolector de aceite retorna el aceite de la cámara de trefilado hacia el contenedor de lubricante para recircularlo durante todo el proceso. Para la pendiente de retorno de aceite se ha toma en cuenta la norma técnica I.S. 010 (Instalaciones sanitarias para edificaciones), que recomienda una inclinación mínimo de 1% y considerando que el manual de construcción de la marca Arauco - Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias (Arauco, s.f.), refiere que para asegurar la caída de fluido se tiene pendientes que van de 3 a 7% (3 a 7 cm por cada 1 m). Por lo tanto, la pendiente para evacuar el fluido tendrá de pendiente el 5% de la longitud del colector, como se muestra en la *Figura 53*.

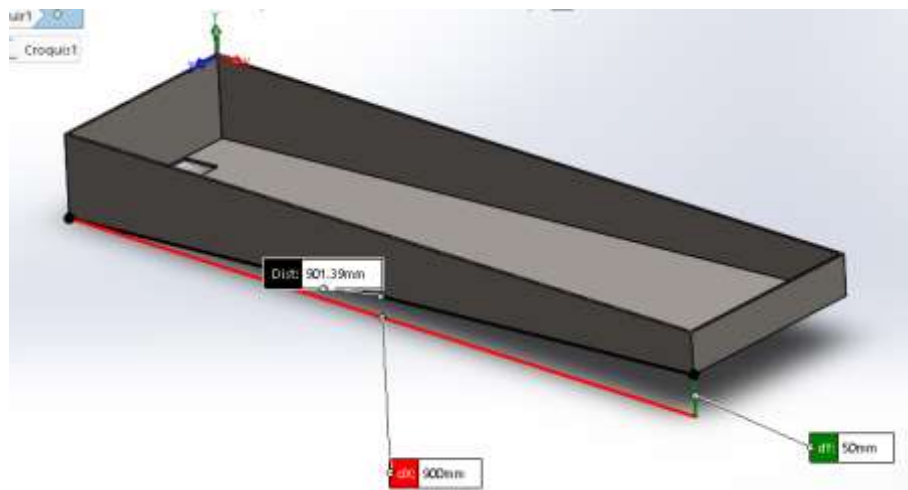


Figura 53. Pendiente para evacuación de lubricante

4.1.9 Diseño estructural

La estructura de la máquina trefiladora se ha realizado a base de tubos cuadrados, como se muestra en la *Figura 54*:

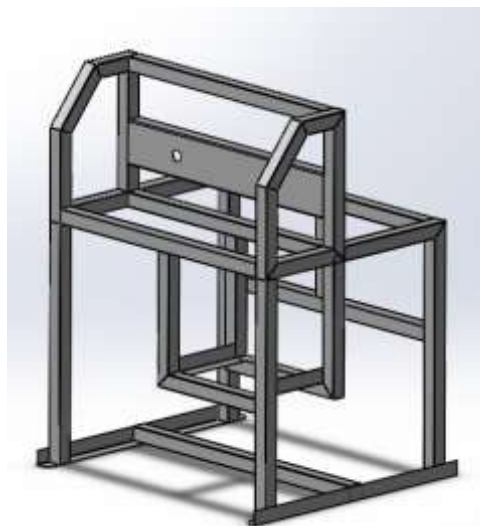


Figura 54. Estructura base de máquina trefiladora.

El tubo cuadrado tiene las siguientes características: facilidad de soldeo, peso superior por pulgada; con respecto al tubo redondo; presenta alta resistencia y fiabilidad que aporta cuando

la dirección de la fuerza (desviación de la horizontal y de la vertical) es conocida o está controlada.

Para determinar el material de la estructura se realizó un análisis de elementos finitos, cuyos resultados se muestran a continuación.

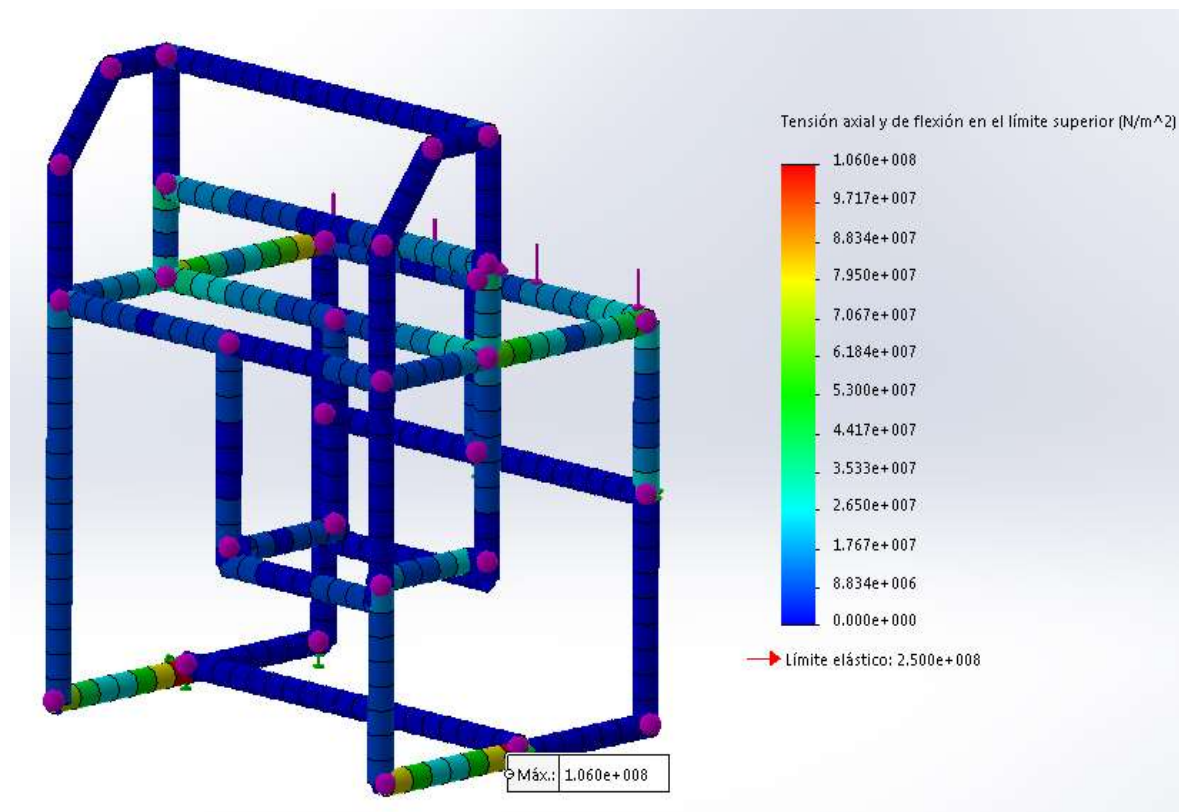


Figura 55. Resultado de análisis de la estructura utilizando elementos finitos.

En la *Figura 55*, se puede observar que el esfuerzo máximo obtenido es de 106 MPa. Por lo tanto, el factor de seguridad calculado para la estructura de material ASTM A36 es 2.36, el cual garantiza que la estructura no va a fallar al aplicar la máxima carga de trefilado que es 3306.626 N.

4.2 Diseño electrónico

Para el diseño electrónico realizará un control de lazo cerrado como se muestra en la *Figura 56*:

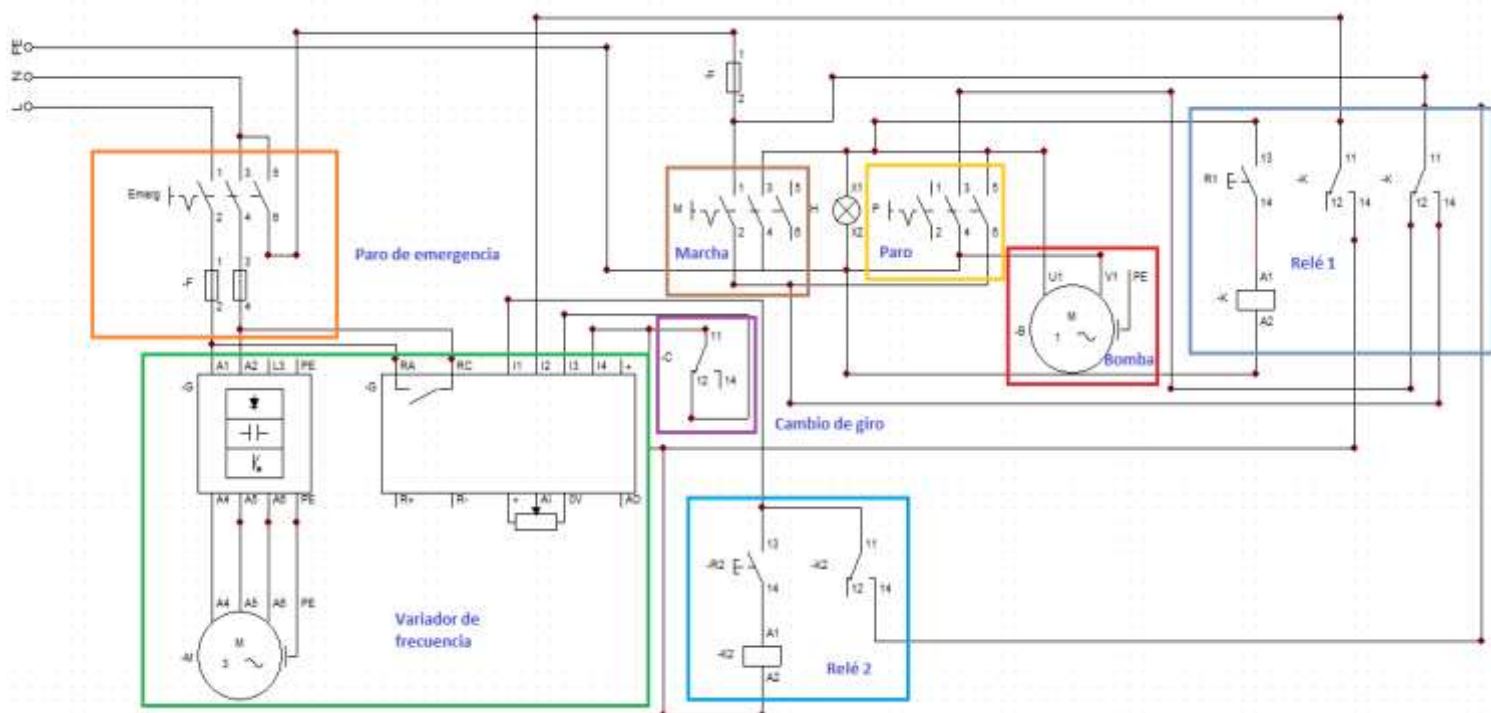





Figura 56. Detalle de diseño electrónico de máquina trefiladora de alambre

A continuación, se detalla en la *Tabla 25*, la función que cumple cada uno de los componentes electrónicos, dentro del control de la máquina trefiladora de alambre

Tabla 25.
Descripción de funciones de los componentes electrónicos

Componente	Descripción	Representación
Paro de emergencia	En el caso de presentarse algún incidente al momento de operar la máquina se ha considerado contar con un pulsador que haga que el motor y la bomba se detengan.	
Cambio de giro	Por medio de un interruptor selector el proceso de trefilación es controlado en el caso de tener desvíos de alambre al momento de pasar por las poleas guías invirtiendo el giro del motor a fin de orientar nuevamente al alambre.	
Marcha y Paro	Se ha previsto de dos pulsadores que permitirán arrancar y detener el proceso en cualquier etapa pues al accionarse quitan o ponen en marcha el motor y la bomba que lubrica el sistema.	

Continúa →

Relé 1 y Relé 2

Son los que permiten realizar las interacciones de los anteriores componentes a fin de tener un control del proceso.

**Variador de frecuencia**

Para que la máquina puede trabajar variando su velocidad se utilizará un variador de frecuencia de la marca SIEMENS, el mismo que a través de un potenciómetro permitirá regular la velocidad del motor de acuerdo a la configuración de la cámara de trefilado. En la *Tabla 26*, se muestran las características técnicas del variador de frecuencia. El variador se disponía en el Laboratorio de procesos de Manufactura, debido a ello se realizó una reprogramación acorde al motor.

**Tabla 26.**

Características de variador de frecuencia Sinamics G110

Siemens G110 – 1 AC 200- 240 V \pm 10%, 47 – 63 Hz

Potencia nominal	Corriente de salida	Corriente de entrada	Peso
KW	A (40°)	A (230 V)	Kg
0.75	3.9	10	0.83

Fuente: (Siemens)

4.3 Resumen

Seleccionados los principales componentes de la máquina se diseñó a detalle, iniciando con el modelado en 3 dimensiones, como se muestra en la *Figura 57*.

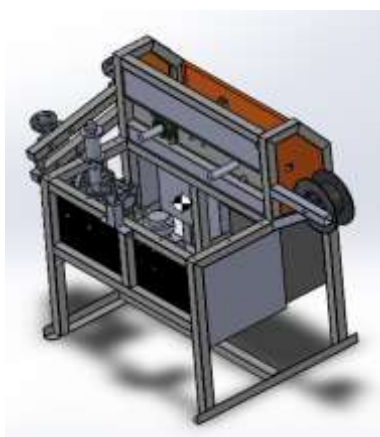


Figura 57. Diseño a detalle de máquina trefiladora

Se ha diseñado la máquina para trefilar alambre de cobre y aluminio de 4.85 mm hasta 3.1 mm de diámetro usando un motorreductor de 1 hp de potencia de carga máxima $F_{tc1} = 3306.626$ N.

Se ha determinado en la cámara de trefilado ejes de sección variable de diámetros 1.5 in y 1 in, poleas escalonadas de diámetro mayor 200 mm y 150 mm de diámetro menor. Y para los ejes guía, flechas de diámetro de 1 in.

Las chumaceras seleccionadas son de marca KDF, cuatro de pared para las poleas principales y cuatro de piso para las secundarias o guías.

La estructura está diseñada bajo un factor de seguridad de 2.36, capaz de soportar una carga máxima de 3306. 626 N.

El control semiautomático, constará principalmente de un paro de emergencia, variador de frecuencia, pulsadores de marcha y paro con sus correspondientes relés.

La evaluación de los componentes existentes en el Laboratorio de Procesos de Manufactura se muestra en el Anexo 3, para su posterior uso en la construcción de la máquina.

Al determinar parámetros y especificaciones de la máquina, se inicia con la planificación de la construcción y posteriores pruebas.

CAPÍTULO V



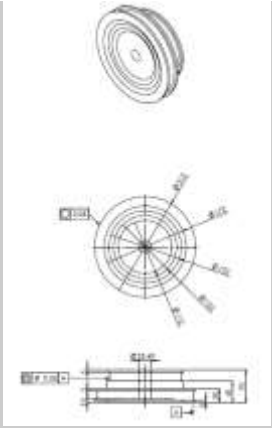
CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS

Obtenidos los planos se procede a construir la máquina basados en los parámetros anteriormente revisados, posteriormente se detallan los resultados de las pruebas realizadas.

5.1 Construcción de maquina trefiladora.

En la Tabla 27, se detallan los procesos realizados para construir la máquina y en el Anexo 4 se muestran las hojas de procesos realizadas para la construcción de la máquina.

Tabla 27.
Actividades realizadas para la construcción de la máquina.

Proceso	Descripción	Anexo
Corte y soldadura de estructura base	Para la estructura se adquirió tubos cuadrados de 50 mm de lado por 2 mm de espesor, soldados mediante el proceso SMAW con electrodo E6011 y E7018, tipo de cordón filete de altura 4 mm.	
Adquisición de dados	Los dados de carburo de tungsteno fabricados con adecuada precisión con el fin de obtener los ángulos necesarios para la reducción de aluminio.	
Adquisición de poleas	Las poleas fundidas de aluminio bajo planos realizados una vez determinado los requerimientos del diseño.	

Continúa →

Soldadura de estructura soporte del par de dados Estructura soldada con placas de 6 mm, mediante el proceso SMAW con electrodo E7018 a fin lograr alta resistencia al esfuerzo de trefilado



Soldadura de contenedor de lubricante Contenedor doblado y soldado con placas de espesor 2 mm utilizando proceso GMAW con alambre ER70-S6.



Doblado de bandeja recolectora de lubricante Bandeja realizada al trazar y doblar una placa de 2 mm de espesor. Se añadió un proceso de pavonado para evitar la corrosión del material.



Torneado de ejes En el proceso de torneado se realizó un cilindrado de 1.5" a 1" en un el mismo eje a una distancia de 100 mm y así también se rosco 40 mm en el diámetro de 1", lo cual mediante una tuerca y arandelas se sujeta a la polea principal en el eje.



Montaje de ejes Se realiza el montaje de los ejes utilizando dos chumaceras de 1.5", de la misma forma se añaden las poleas y la estructura que contiene los dados



Montaje del sistema de lubricación

A la estructura base se emperna el contenedor de lubricante utilizando pernos de $\frac{1}{4} \times 2.5$ in y de la misma forma la bomba de lubricación se emperna a la estructura en la parte posterior.

Para la succión y descarga se utilizó tubería de acero galvanizado de $\frac{1}{2}$ in y demás accesorios como válvulas de bola, alivio, de seguridad, manómetro, codo, tees, etc.



Montaje de carretes de abastecimiento y rebobinado

Para el carrete de abastecimiento se soldó un eje, seguido de un sistema similar al carrete de alambre de soldadura de proceso GMAW y para el carrete de recolección se emperno el motor a la estructura y al eje de salida se acoplo el rebobinador de metal.



Pintura de la máquina

Se establecen los colores naranja y negro para la pintura de la máquina, esto evitará que los metales se oxiden.



Implementación de elementos electrónicos.

Luego de montar la parte mecánica de la máquina se empezó a cablear añadiendo los componentes requeridos para controlar el proceso y programar el variador de frecuencia de acuerdo a las características de motor para dar inicio con las pruebas de funcionamiento.



5.2 Pruebas y resultados

Luego de construida la máquina como se muestra en la *Figura 58* se da inicio a la primera prueba de funcionamiento.

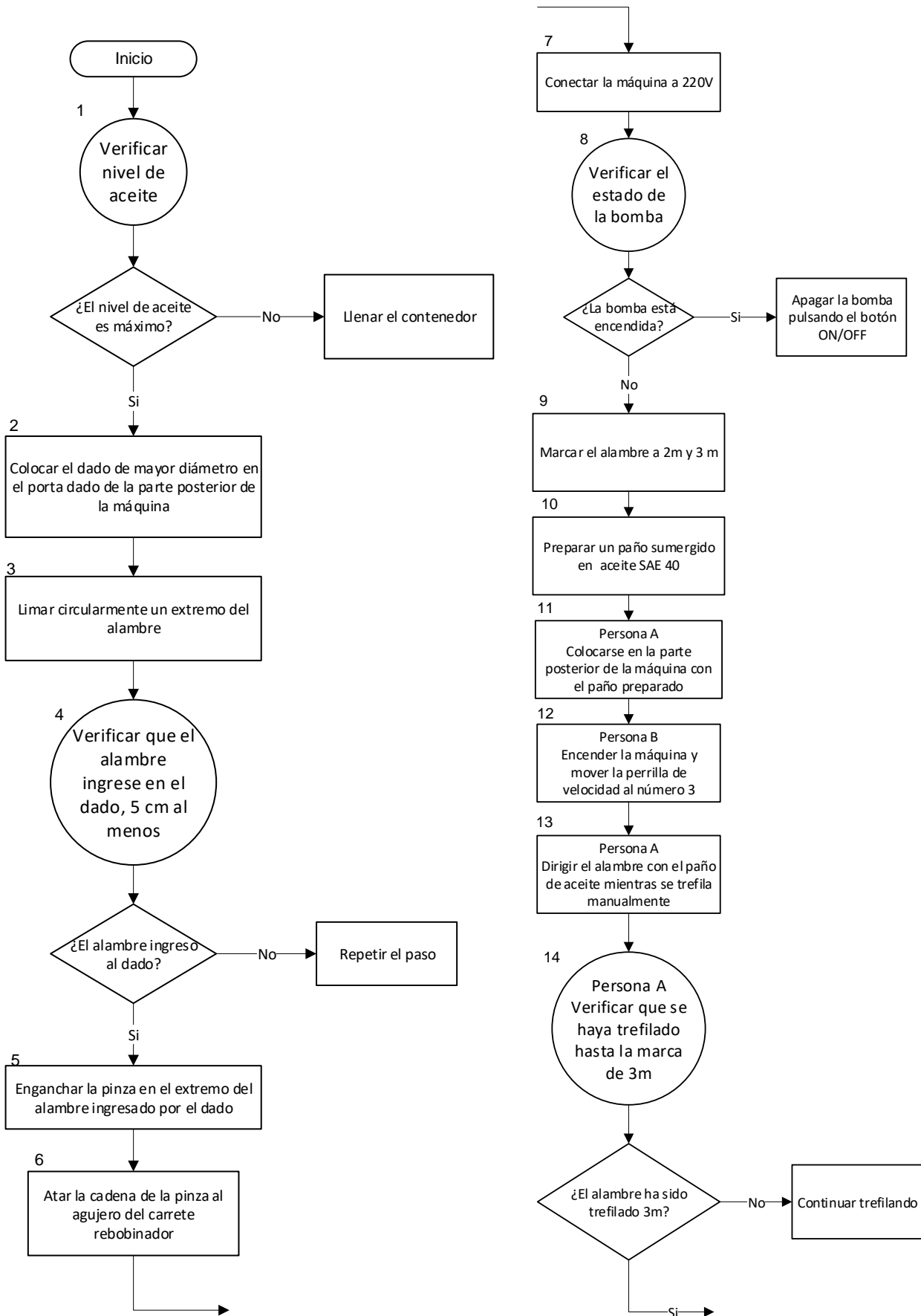


Figura 58. Máquina trefiladora de alambre lista

Para que el carrete de alambre completo se trefile, primero se debe introducir el alambre en los dados de trefilado para luego ser ubicados en la cámara de trefilado e iniciar el proceso, como se muestra en la *Figura 59*. A continuación, se muestra el proceso para trefilar alambre.



Figura 59. Primer paso en el proceso de trefilado



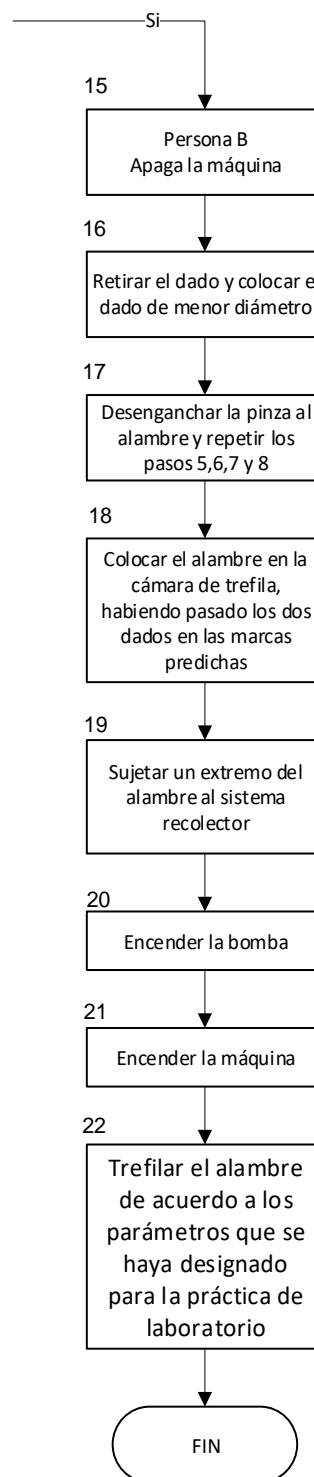


Figura 60. Pasos para trefilar alambre.

A continuación, se muestran las pruebas realizadas al alambre de aluminio luego de ser trefilado con dados de diámetro 4.6 mm y 4.0 mm, con sus respectivos resultados. Las pruebas fueron realizadas bajo el protocolo mostrado en el Anexo 4.

5.2.1 Aspecto de material

Se verifica visualmente que el material no presenta rayaduras, porosidades o deformaciones luego de ser trefilado, como se muestra en la figura 61.



Figura 61. Aspecto del alambre luego del proceso de trefilado

5.2.2 Medición de diámetro final del alambre

Para medir el diámetro se utilizará la recomendación de la norma NTE INEN 0331 (Alambres de aluminio desnudo de sección circular para uso eléctrico 1350 – H19. Requisitos.) (INEN, s.f.), en la que se establece tomar mediciones de diámetro por carrete, primero desenrollando aproximadamente 10 m de alambre y a partir de allí se medirá en tres puntos distantes 50 cm entre sí.

Tabla 28.

Mediciones tomadas en 5 metros de longitud de alambre trefilado.

Medición	Longitud (Total 5 m) cm	Diámetro [0°]	Diámetro [120°]	Diámetro [240°]
1	0	4,039	4,039	4,013
2	50	4,013	4,039	4,013
3	100	4,013	4,013	3,988
PROMEDIO		4,021	4,028	4,003
%error		0.02%	0.19%	0.42%

En la *Tabla 28*, se puede observar que el diámetro de alambre en promedio es 4.02 mm. Según la norma NTE INEN 0331 (INEN, s.f.), la tolerancia de aceptación del diámetro de

alambre trefilado es $\pm 0.03 \text{ mm}$, considerando el diámetro teórico es 4 mm se puede afirmar que el diámetro obtenido está dentro del límite establecido por la norma.

La sección transversal no presenta grandes variaciones, por lo tanto, el alambre se considera cilíndrico, con un rango de 4.003 mm a 4.021 mm .

5.2.3 Ensayo de tensión de alambre

Bajo los parámetros de la norma ASTM E8 (ASTM E8-04 - Tension Testing of Metallic Materials, s.f.), se efectuaron los ensayos de tracción del alambre antes y después del trefilado, considerando que de acuerdo al análisis estadístico se requieren como mínimo 3 probetas. La longitud de las probetas será de 300 mm debido a la configuración de las mordazas de la máquina de ensayos universales del Laboratorio de Resistencia de Materiales.

- **Ensayo a tensión de diámetro 4.85 mm**

Para el ensayo a tensión se calcula la carga con la que se va a realizar el ensayo, iniciando con el cálculo de la longitud proporcional que se muestra en la Ecuación 38, que permitirá medir el alargamiento de la sección al momento de realizar el ensayo, y luego se calcula la carga mínima que requiere el alambre para pasar de su estado elástico a plástico, con la Ecuación 39 y Ecuación 40:

$$L_o = 5.65 \times \sqrt{A_o} \quad (38)$$

$$L_o = 24.282 \text{ mm} \approx \mathbf{25 \text{ mm}}$$

$$F = \sigma \times A \quad (39)$$

$$F = 4248.1 \text{ N}$$

$$m = \frac{W}{g} \quad (40)$$

$$m = 433.04 \text{ Kg} = 954.06 \text{ Lb}$$

Se preparan 3 probetas de alambre de área inicial 18.47 mm^2 siguiendo lo establecido en las normas ASTM E8 y NTE INEN 0331, luego de realizado el ensayo de tracción con una carga de 1000 Lb se ha obtenido los resultados mostrados en la *Tabla 29*.

Tabla 29.
Resultados de ensayo a tracción, alambre sin trefilar

Probeta	Diámetro	Límite de fluencia - F		Alargamiento	Límite de rotura F máx.	
		mm	Kgf		N	mm
1	4.85	280.3	2748.804	3.30	315	3089.09
2		280.3	2748.804	3.21	297	2912.58
3		240.6	2359.48	3.38	302.5	2966.51
Promedio			2619	3.29		2989.4

Con los ensayos realizados, se caracteriza al alambre de aluminio de 4.85 mm, antes de ser trefilado, con un esfuerzo de fluencia 142 Mpa ($F_{\text{prom}} = 2619 \text{ N}$ y $A = 18.47 \text{ mm}^2$) y límite de la rotura de 162 Mpa ($F_{\text{prom.Máx.}} = 2989.4 \text{ N}$ y $A = 18.47 \text{ mm}^2$), con un alargamiento promedio de 3.29 mm (13.20%).

Luego de trefilar, se realizó un ensayo de tracción de diámetro 4.02 mm, obteniendo los resultados mostrados en la *Tabla 30*.

$$L_0 = K \times \sqrt{A_0}$$

$$L_0 = 5.65 \times \sqrt{12.57 \text{ mm}^2} = 20.03 \text{ mm} \approx \mathbf{20 \text{ mm}}$$

Tabla 30.
Resultados de ensayo a tracción, alambre trefilado diámetro 4.02 mm

Probeta	Diámetro	Límite de fluencia		Alargamiento	F máx.	
		Kgf	N		mm	Kgf
1	4.02	199.82	1959.56	3.13	220.2	2159.42
2		199.28	1954.27	2.51	221.25	2169.72
3		197.086	1932.75	3.14	217.59	2133.83
Promedio			1948.86	2.93		2154.32

El alambre de aluminio de 4.02 mm después de ser trefilado tiene un esfuerzo de fluencia 155.041 Mpa, límite de la rotura de 171.39 Mpa, con un alargamiento promedio de 2.93 mm (9.2%).

Al comparar los esfuerzos antes y después de trefilar se obtiene un incrementado de 9.18% en el esfuerzo de fluencia, así también un aumento de 5.80% en el límite de la rotura. En cuanto al porcentaje de alargamiento se obtuvo una reducción del 4%.

5.2.4 Ensayo de dureza

Para el ensayo de dureza se tomó una muestra antes y después del proceso de trefilado, tomando en cuenta la norma NTE INEN 0123 (INEN 0123 (Determinación de la dureza Brinell)). La norma recomienda realizar 3 o más mediciones de una muestra, en este caso se han tomado 5 mediciones, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la *Tabla 31*.

Tabla 31.
Resultados de ensayo de dureza

Diámetro (mm)	Dureza	Dureza
	HV	HV
	4.85	4.02
1	48.3	68
2	47.2	62
3	45.3	66
4	46.5	68
5	47	62
Promedio	46.86	65.2

Como se puede observar la dureza a aumentado en un 15% en la reducción de 4.85 mm a 4.02 mm.

5.2.5 Velocidad de proceso

En la caja de control se tiene un potenciómetro numerado del 0 al 11, que permite regular la velocidad. Al trefilar el alambre se tomaron datos variando la posición de la perilla, los cuales se muestran en la *Tabla 32*.

Tabla 32.
Velocidad con carga - Alambre trefilado diámetro final 4.02 mm

Perilla	Velocidad de trefilado (m/min)
0,1,2	No arranca
3	1.678
4	2.647
5	3.227
6	3.744
7	4.754
8	5.502

9	6.267
10	7.032
11	9.857

5.2.6 Longitud final de alambre

Por conservación de volumen en el proceso se tiene que:

$$V_o = V_f$$

Tomando una sección de alambre y considerándolo como un cilindro de longitud inicial $L_o = 1m$, se tiene:

$$\frac{\pi}{4} \times D_o^2 \times H_o = \frac{\pi}{4} \times D_f^2 \times H_f$$

$$H_f = \frac{D_o^2 \times H_o}{D_f^2}$$

$$H_f = \frac{4.85^2 \times 1m}{4.00^2} = 1.47 m$$

Se concluye que por cada metro de alambre se tendrá un porcentaje de alargamiento del 47%, en la reducción de 4.85 mm a 4.02 mm de diámetro.

5.3 Resumen

Se ha determinado que el alambre de aluminio al pasar por los dados de 4.6 mm y 4.02 mm tiene las siguientes características, mostradas en la *Tabla 33*.

Tabla 33.
Resultados de ensayo a tracción, alambre sin trefilar

Proceso	Diámetro final	Límite de fluencia [MPa]	Límite a la rotura [MPa]	Dureza HV	Porcentaje de reducción [%]
4.85 mm a 4.2 mm	4.02 mm	159.67	176.13	65.2	25

El alambre obtenido presenta mejoras en las propiedades mecánicas como un aumento del 9.18% en el límite de fluencia, aumento de 5.80% en el límite de la rotura e incremento del 15% en la dureza, confirmando lo mencionado en la teoría de conformado en frío, de la misma forma al realizar las mediciones del diámetro final, se ha determinado que 4.02mm de diámetro

es un valor aceptable bajo la norma NTE INEN 0331. Finalmente se puede apreciar que no presenta porosidad en la superficie concluyendo que la máquina diseñada y construida cumplió con los objetivos planteados en este proyecto.

La máquina tiene las siguientes características

- Robusta
- Permite trefilar alambre de aluminio y cobre de diámetro 4.85 mm hasta 3.1 mm
- La velocidad mínima del proceso es de 1.678 m/min y la máxima es de 9.857 m/min
- Permite estirar alambre manualmente

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó una máquina trefiladora de alambre basándose en la metodología de diseño concurrente, que tiene como masa 225 Kg de estructura compacta resistente a elevadas cargas, capaz de trefilar continuamente alambre de aluminio de diámetros de 4.85 mm a 4.02 mm en una sola pasada.
- Los parámetros de diseño de los componentes mecánicos se basaron en el motorreductor de la máquina estirado de alambre inhabilitada del Laboratorio de Procesos de Manufactura, que tiene una potencia de 0.76 KW y una eficiencia de 85%. La máquina dispone de una cámara de trefilado con sistema múltiple compensado, para el abastecimiento se diseñó en base al sistema implementado en las máquinas soldadoras. El sistema de recolección consta de un motorreductor, un eje vertical y un carrete de metal que interconectados permiten realizar el proceso de trefilado. En cuanto al sistema de lubricación, consta de: una bomba de desplazamiento positivo rotatorio de paletas autocebante (retiene el fluido en el interior de la bomba a fin de evitar la cavitación) con una potencia de 0.376 KW, presión máxima de 6 bar y un caudal de 7 gpm, y un fluido lubricante SAE 40, el cual cumple con los requerimientos necesarios para obtener un alambre sin roturas y de buen acabado. El diseño electrónico se basa en el control de lazo abierto, el principal componente es el variador de velocidad seguido de pulsadores, relés y un paro de emergencia, todo esto ha permitido obtener una máquina de control semiautomático.
- Habiendo seleccionado y diseñado los componentes que forman parte de la máquina trefiladora, la construcción se realizó en base a planos y hojas de procesos. Para la

construcción de la estructura se utilizó tubos cuadrados de 50mm de lado por 2 mm de espesor, los cuales fueron soldados con el proceso SMAW, electrodo E6011 y R7018, tipo filete de altura 4mm. El portadados fue fabricado con placas de 6mm mediante proceso SMAW, electrodo 7018 y el contenedor de aceite se soldó placas de 2mm de espesor con alambre ER70-S6 y proceso GMAW. Para el montaje de los componentes de potencia se usaron juntas empernadas.

- Las pruebas realizadas permitieron determinar que el sistema de recolección es capaz de enrollar 100 metros de alambre con un rango de velocidad de 1.678 m/min a 9.987 m/min. Además, debido a un estiramiento extra en las poleas guías, el alambre trefilado tiene un diámetro de 4.02 mm con un error de dimensión de 0.42 %, siendo aceptado ya que está dentro de la tolerancia establecida por la norma NTE INEN 0331.
- Se realizaron ensayos de tensión, obteniendo un incremento de 9.18% del esfuerzo de fluencia y un aumento del 5.80% del esfuerzo de rotura. Así también se realizaron ensayos de dureza dando como resultado un aumento del 15% en dicha propiedad.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda definir una metodología de investigación y desarrollo, ésta permitirá organizar y planificar adecuadamente los pasos necesarios para construir cualquier máquina, optimizando tiempo y recursos.
- Al diseñar un sistema de lubricación se recomienda considerar las pérdidas de presión por accesorios, debido al elevado factor de fricción que presenta el flujo laminar en circulación.
- Para la construcción de la máquina se debe tener en cuenta los planos, hojas de procesos. Para obtener una soldadura de calidad se debe considerar el adecuado almacenamiento de electrodos. Para recoger y abastecer el alambre, el carrete debe

ser metálico sobre todo si están expuestos a cargas mayores de 3000 N. La tubería de acero galvanizado es adecuada para líneas de baja presión. En un sistema de lubricación debe existir un manómetro y una válvula de alivio de presión. Todo sistema de control debe contar con fusibles que interrumpan la corriente cuando esta sea excesiva.

- Para las pruebas de trefilado se debe revisar con anterioridad el manual de usuario de la máquina y utilizar el equipo de seguridad personal adecuado. Si se va a trefilar un nuevo carrete de alambre se debe reducir el diámetro de forma manual, haciendo uso de una lima y del sistema integrado a la máquina. Así también se recomienda operar la máquina con un mínimo de dos operarios.
- Las muestras requeridas para realizar los ensayos mecánicos deben ser obtenidas a partir de 2 metros mínimos de trefilado el alambre. Para el ensayo a tracción se recomienda limar 1 mm en la mitad de la sección longitudinal del alambre para obtener resultados más exactos y para el ensayo de dureza se recomienda cortar la muestra utilizando refrigerante para que no afecte sus propiedades y luego montar en una baquelita.

6.3 Trabajos futuros

Se plantea añadir o mejorar los sistemas mostrados a continuación:

- Al sistema de recolección de alambre se puede implementar un sistema que permita contar los metros que trefila la máquina, así también un medidor de fuerza para comparar los resultados teóricos con los prácticos.
- Implementar un nuevo juego de dados de menor diámetro (< 3 mm) que permitan realizar más pruebas de laboratorio a diferentes velocidades
- Realizar un análisis de la geometría de los dados con el fin de reducir las pérdidas de energía por fricción.
- Mejorar el sistema de recolección de alambre, implementando un sistema guía.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, L., Hernandez, M., & Vicente, L. (2016). *Diseño y construcción de un equipo didáctico para trefilado de cobre puro.*
- AlaMaula. (Febrero de 2019). Obtenido de <https://www.alamaula.com/a-herramientas-y-maquinas/rosario/trefiladora-de-alambre/1001079105150910614748509>
- Alliec, J. S. (2018). *Jacom Strategic Alliec.* Obtenido de <https://jacomgroup.com/trefiladora-de-alambre/>
- Arauco. (s.f.). Obtenido de https://web.araucosoluciones.com/_file/10_15955_foll-web_construccion_hidrau_y_sanitar_mexco_01_sep_15_1852.pdf
- Askeland, D. R. (s.f.). Ciencia E Ingeniería De Los Materiales. En D. R. Askeland, *Ciencia E Ingeniería De Los Materiales.*
- ASTM E8-04 - Tension Testing of Metallic Materials. (s.f.). *ACADEMIA* . Obtenido de https://www.academia.edu/8658646/ASTM_E8-04_-_Tension_Testing_of_Metallic_Materials
- Atienza Riera, J. M. (2001). *Tensiones Residuales en alambres de acero Trefilado.*
- Bohler. (s.f.). *Voestalpine.* Obtenido de http://www.voestalpine.com/highperformancemetals/iberica/app/uploads/sites/63/2018/01/B%C3%B6hler_toolsteel_2018_LQ.pdf
- Budyas, R. G., & Nisbett, J. K. (s.f.). *Diseño en Ingeniería Mecánica.* Mexico: Mc Graw Hill .
- Caru, A. (2018). *Alambrados Caru.* Obtenido de <http://www.alambradoscaru.com.ar/maquinas>
- CIMSA. (s.f.). *Latón.* Obtenido de http://www.cimsaww.com/internet/es/materiales/lat_n/lat_n_1.jsp

- Cromogenia. (s.f.). *Trefilado de hilo de cobre y aluminio*. Obtenido de <http://www.cromogenia.com/descargas/lubricantes-y-metalurgia/15-c-trefilado-hilo-espan-ol-english/file.html>
- Dávila, F. A. (1988). *Diseño de una trefiladora Multiple para producir alambre a partir de alambrón de cobre de 5/16 de diámetro*. . Lima-Perú.
- Gomar. (s.f.). *Tuberías de acero al carbón*. Obtenido de <http://www.gomarbajio.com/fichas/TUBERIA/1.2-TUBO-CED-40-GALVANIZADO/HYLSA-CED-40.pdf>
- Group S. (s.f.). *Rebobinador de cable tipo tambor*. Obtenido de <http://machinery-smarter.com/1-11-drum-type-wire-respooler/197081>
- Guachamín, J., & Betancourt, G. (2014). *Diseño y construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos a ser implementado en el Laboratorio de Máquina y Herramientas del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica*. Sangolquí.
- INEN 0123 (Determinación de la dureza Brinell). (s.f.). *Academia* . Obtenido de https://www.academia.edu/10254488/NTE_INEN_0123_Determinaci%C3%B3n_de_la_dureza_Brinell
- INEN. (s.f.). *The Internet Archive*. Obtenido de <https://archive.org/details/ec.nte.0331.2010/page/n3>
- International C. (s.f.). *Cobre. Un metal lleno de ventajas*. Obtenido de <http://programacasasegura.org/mx/cobre-un-metal-lleno-de-ventajas/>
- Kdf. (s.f.). *Rodalsa*. Obtenido de <http://www.rodalsa.net/wp-content/uploads/2011/05/kdf.pdf>
- León Quili, W. A. (2011). *Evaluación y mejoramiento de un sistema de producción de alambre de cobre por trefilación*.

- Machines, B. (s.f.). *Bongard Machines*. Obtenido de <https://www.bongard.de/es/>
- Martinez, Y. (16 de 04 de 2016). *Pérdida de carga en tuberías y accesorios*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/yuricomartinez/lab0-4-prdida-de-carga-en-tuberas-y-accesorios>
- MIPSA. (s.f.). *Que es el aluminio*. Obtenido de <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Que-es-aluminio>
- Mírez, J. (Abril de 2011). Obtenido de <https://jmirezcontrol.wordpress.com/2011/04/12/c019-ventajas-y-desventajas-de-un-sistema-de-control-de-lazo-abierto/>
- MOLY-VEN. (s.f.). *Motor Oil CD Diesel SAE 40*.
- Morales, L., Ortiz, A., & H. Jacobo, V. (Septiembre de 2008). Obtenido de http://somim.org.mx/memorias/memorias2008/articulos/A3/A3_197.pdf
- Moreno, J. A. (2009). *DOCPLAYER*. Obtenido de <https://docplayer.es/89418199-Instituto-politecnico-nacional.html>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas Un enfoque integrado*. México: Pearson.
- Oposinet. (2016). *Técnicas de mecanizado, conformación y unión de piezas metálicas*. Obtenido de <https://www.oposinet.com/temario-de-tecnologia/temario-3-tecnologia/tema-40-tnicas-de-mecanizado-conformacin-y-unin-de-piezas-metlicas-3/>
- PIUSI. (s.f.). *Viscomat Vane*. Obtenido de <http://www.piusiusa.com/wp-content/uploads/2016/03/Viscomat-Vane-USA-Spec-Sheet-2.pdf>
- Porrello, A. (Diciembre de 2014). *Portal de Revistas Electrónicas de la Universidad de Carabobo (Re-UC)*. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v21n3/art07.pdf>
- Prieto, J. (17 de Diciembre de 2017). *Alambre*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/JOELITOPRIETO/alambre-84321568>

- Q8Oils. (Noviembre de 2017). *Soluciones para trefilado & laminado*. Obtenido de <https://www.q8oils.es/Portals/6/Pdf/Spain/Laminado%20y%20Trefilado.pdf>
- Quintana, D. M. (diciembre de 2011). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/migueortiz/trefilado-manual-de-plata>
- Regalado Quimis, J. L. (2010). *Aumento del aprovechamiento de la capacidad instalada en el proceso de trefilado – grafilado en Andec s.a.* Guayaquil.
- Rivom, M. (s.f.). *Agir-technologies*. Obtenido de <http://www.agir-technologies.com/wp-content/uploads/2018/06/leaflet-ESP-PRINT.pdf>
- S/A. (2007). *Semantic Scholar*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/THEORY-OF-WIREDRAWING/15716537d024c014844830fc8b1eccdb1bb7392c?navId=references>
- SANDVIK. (2012). *Catálogo de materiales*. Obtenido de https://www.sandvik.coromant.com/es/events_training/Documents/Traning_Brochure_2018_A4_SPA_v02_LowRes.pdf
- Sas, B. (s.f.). *Baloffet SAS*. Obtenido de <http://www.baloffetdie.com/es/hileras-diamante/hileras-trefilado-diamante/hileras-diamante-policristalino>
- Schey, J. A. (2001). *Procesos de Manufactura*. México: McGraw-Hill.
- Siemens. (s.f.). *Siemens*. Obtenido de <https://w5.siemens.com/spain/web/es/el-futuro-de-la-industria/accionamientos/sinamics/Documents/Instrucciones-servicio-Sinamics-G110.pdf>
- Singh, P. R. (s.f.). Obtenido de <https://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/courses/ME649/drawing.pdf>
- SYZ. (2018). *SYZ*. Obtenido de <http://www.grupo-syz.com/>

SYZ Colombia. (2018). *Descripción*. Obtenido de <http://www.grupo-syz.com/product/engranajes-externos/>

SYZ Colombia. (2018). *Descripción*. Obtenido de <http://www.grupo-syz.com/product/lobulo-rotatorio/>

Zapopan. (mayo de 2010). Obtenido de <https://zapopan.anuncios-mexico.com/item/16182/>