

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



PROPUESTA DE MEJORA DE UN BANCO
DE TREFILADO DE BARRAS DE COBRE
CON ACCIONAMIENTO HIDRÁULICO.

FELIPE ESTEBAN LÓPEZ DÍAZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: MSC. EUGENIA TORRES B.

PROFESOR CO-REFERENTE: MARIO VILLA D.

Enero 2024

Agradecimientos

Resulta difícil comenzar a dar las gracias porque es complejo decidir si estas personas tienen alguna jerarquía según como lo escribamos. Desde ya digo que el orden es según me fueron naciendo los pensamientos, según fueron creciendo en esta mente que no creía ser capaz de terminar la carrera.

En primer lugar, siempre está la familia, agradecer por soportar todo lo que significa estar en la universidad, que, básicamente lo convierte a uno en un cumulo de emociones que no se expresan y explota de la peor manera posible. Mi familia siempre estuvo ahí, siempre me apoyo, siempre me motivó, y nunca dudó de que si lo podría lograr.

*"So wake me up when it's all over, when I'm wiser and I'm older...
All this time I was finding myself, and I didn't know I was lost"
Wake Me Up – Avicii*

7 años costó finalmente terminar una carrera que muchas veces me decepcionó, pero logró cautivarme con más fuerza, y espero siga cautivándome en un futuro. En esos 7 años hubo 3 personas que nunca fallaron: Jana, Pancho y Gus. Tres personitas que quizás no dimensionan lo importante que fueron en estos 7 años, pasamos tanto que básicamente son mi segunda familia.

Dar gracias a Rodrigo, por las peleas, las discusiones, los pedaleos, las conversaciones, la motivación y la desconcentración mutua, y principalmente agradecer por este último periodo donde ambos luchamos por alcanzar la anhelada titulación.

Agradecer también a un compañero que siempre tuvo convicción de podía lograr muchas cosas, desde aquel curioso 2018 cuando decidimos tener un YouTube con pruebas de autos, desde aquel 2020 que mutamos a ser un Medio de Prensa, y hasta hoy 2024 estando dentro de la industria de la prensa automotor. Le dicen Gato, y como Don Gato le voy a agradecer por todo el apoyo en esta historia.

Finalmente, dar las gracias a los dos profesores que me guiaron en este camino, y a la empresa que confió en mis capacidades.

Mucha gente quizás me queda en el tintero, sólo tengo una página, pero haré saber a cada uno lo importante que fueron en esta historia. Me titulo como Ingeniero Civil mecánico, me transformé en un diseñador “frustrado”, y me volví periodista por accidente... Y eso solo me hace pensar que efectivamente las pruebas vocacionales a veces tienen razón cuando dicen: *“será difícil escoger tu camino”*.

*"One day you'll leave this world behind
So, live a life you will remember."
The Nights - Avicii*

Resumen

En el siguiente documento se presenta una propuesta de mejora para un banco de trefilado utilizado en la producción de barras de cobre. El proyecto propone realizar una recuperación del equipo y la implementación de un sistema de tracción hidráulico. Además, se plantea la incorporación de nuevos componentes que mejorarán la calidad de los productos finales, reduciendo el tiempo de producción y los costos asociados al reprocesamiento de barras que incumplen las normas de calidad.

La estructura de esta propuesta comienza con una breve descripción del cliente, le sigue la definición del problema, una propuesta de mejora conceptual y la propuesta de implementación. Por último, se entrega una serie de recomendaciones al cliente que pueden complementar lo planteado en este documento.

Dentro de la propuesta de mejora, se plantea la renovación del sistema de tracción mecánico del equipo por un sistema de tracción hidráulico, compuesto por un cilindro de 7 metros de largo capaz de entregar una fuerza de 235kN, que corresponde a la mayor fuerza requerida por los productos del cliente. Por otro lado, se presenta la recuperación de componentes cuyo funcionamiento no es totalmente óptimo, pero si compatible con otras áreas de la propuesta, como por ejemplo el carro de tiro. Otros elementos compositivos de la mejora son complementarios a la solución principal e incluye la integración de nuevos equipos periféricos, como botadores y recibidores que extraigan el producto del banco de trefilado y lo entreguen hacia la próxima etapa del proceso productivo.

Además, se ha planificado una implementación cuya estructura prioriza las horas de producción, ejecutando en primer lugar las mejoras que requieran menos tiempo y cuyo impacto en la solución sea mayor, dejando al último la renovación del sistema de tracción.

Finalmente, pese a que las mejoras propuestas tienen un gran impacto en la solución al problema, el alcance del proyecto presentado en este documento es acotado, por lo tanto, se ha dejado una serie de recomendaciones al cliente para desarrollar en el futuro y contribuir a la mejora del proceso en general.

Abstract

In the following document, a proposal for improvement is presented for a cold drawing bench used in the production of copper bars. The project suggests the refurbishment of the equipment and the implementation of a hydraulic traction system. Additionally, the incorporation of new components is proposed to enhance the quality of the final products, reducing production time and costs associated with reprocessing bars that do not meet quality standards.

The structure of this proposal begins with a brief description of the client, followed by the definition of the problem, a conceptual improvement proposal, and the proposal implementation. Finally, a series of recommendations are provided to the client that could complement the content outlined in this document.

Within the improvement proposal, the replacement of the mechanical traction system of the equipment with a hydraulic traction system is suggested. This system includes a 7-meter-long cylinder capable of delivering a force of 235 kN, which corresponds to the highest force required by the client's products. On the other hand, the recovery of components whose performance is not entirely appropriated but is compatible with other areas of the proposal, such as the towing carriage, is presented. Other compositional elements of the improvement are complementary to the main solution and include the integration of new peripheral equipment, such as pushers and receivers, which extract the product from the wire drawing bench and deliver it to the next stage of the production process.

Furthermore, an implementation plan has been devised, prioritizing production hours by first executing improvements that require less time and have a higher impact on the solution, leaving the renewal of the traction system for last.

Finally, despite the significant impact of the proposed improvements on the problem solution, the scope of the project presented in this document is limited. Therefore, a series of recommendations have been provided to the client for future development to contribute to the overall process improvement.

Glosario

Trefilado: Proceso mediante el cual se reduce la sección de una barra, pletina o cañería, mediante la aplicación de un esfuerzo de tracción que permite el paso del elemento por una matriz de trefilado que le entregará las dimensiones finales.

Matriz de Trefilado (*Matriz*): conocido como *dado*, es un elemento cilíndrico con una sección cónica en su centro, comúnmente fabricado de Stellite (aleación de cobalto y cromo) es resistente a la temperatura y al desgaste. A través de su sección interior pasa el producto que se está trefilando.

Schumag: máquina trefiladora de paso combinado (combined drawing machine) desarrollada por el fabricante Schumag, se utilizada en el trefilado de cañerías de cobre. En el cotidiano, únicamente se les llama Schumag.

Billet: cuerpo cilíndrico de cobre de aproximadamente 6 metros, resultado de la colada continua en los hornos de fundición.

Tocho: elemento cilindro de cobre pequeño, resultado de la división en varias partes de un billet. Es el elemento que será extruido en una prensa.

Electrowinning: conocido como electro-obtención, electro-extracción o electrodeposición, es un proceso que se basa en la precipitación por reducción electrolítica, la cual requiere de energía eléctrica y una solución electrolítica que es comúnmente lixiviación. Utiliza láminas de cobre como ánodos y cátodos. El ánodo comúnmente es el que se desecha, y el cátodo recibirá todo el cobre con alta pureza.

Nomenclatura

DHP: Deoxidized High Phosphorus Copper (*cobre desoxidado con fósforo*)

ETP: Electrolytic Tough-Pitch Cooper (*Cobre electrolítico de paso duro*)

Índice de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen.....	II
Abstract	III
Glosario.....	IV
Nomenclatura	IV
Índice de Anexo	VI
Índice de tablas.....	VI
Índice de figuras.....	VII
Introducción	1
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
1. CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE: LA EMPRESA Y EL PROCESO DE TREFILADO. .3	
1.1. Empresa, procesos y producción.....	3
1.1.1 Control de calidad.....	6
1.1.2 La norma chilena NCh 256 OF.72	7
1.2 El proceso de trefilado	7
1.2.1 El cobre.....	10
1.2.2 Fuerza de trefilado	10
1.2.3 Cilindros hidráulicos.....	11
1.3 Trefilado en la manufactura del cobre	11
1.3.1 Bancos de trefilado (<i>Cold Drawbench</i>).....	12
1.3.2 Composición general de un banco	13
1.4 Definición del problema.	14
1.4.1 Calidad.....	14
1.4.2 El banco de trefilado la empresa	15
1.4.3 Tiempos y traslados	18
2. CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA	20
2.1 Propósitos generales	20
2.1.1 Requerimientos.....	20
2.1.2 Benchmarking.....	21
2.2 Desarrollo de la propuesta	23
2.2.1 Desarrollo del Sistema de Tracción	23
2.2.2 Modificación en bancada	24
2.2.3 Desarrollo mejora en trolley	27
2.2.4 Desarrollo diseño botadores.....	34

2.2.5	Desarrollo recibidor lateral.	36
2.2.4	Desarrollo mejora en Bloque de Trefilado	39
2.2.5	Costo preliminar de la mejora	41
2.2.6	Propuesta de Implementación	43
3.	CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
3.1	Recomendaciones	49
3.1.1	Automatización.....	50
3.1.2	Rediseñar el wax-tank de la Prensa de Extrusión.....	50
3.1.3	Puesta en marcha del Punteador de barras	51
3.1.4	Mejoramiento del enlace entre punteo y banco.	52
3.1.5	Mejoramiento del transportador de terminación.	52
3.1.6	Control de calidad y normalización.	53
3.1.7	Mantenimiento.....	53
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXO	55

Índice de Anexo

Anexo A.	Fenómeno de endurecimiento por deformación en frío de los metales	55
Anexo B.	Factores de Seguridad	56
Anexo C.	Fuerzas de trefilado requeridas por cada producto.	57
Anexo D.	Tablas utilizadas en el cálculo de cadenas.....	59
Anexo E.	Evaluación de un cilindro de mayores dimensiones	60
Anexo F.	Tabla de componentes y precios aproximados	64

Índice de tablas

Tabla 1-1:	propiedades cobre UNS C11000 ETP	10
Tabla 1-2:	Problemas del actual banco de trefilado y sus efectos.	16
Tabla 1-3:	Tiempos de producción.	19
Tabla 2-1:	Fuerzas de trefilado	20
Tabla 2-2:	Fuerzas de trefilado productos más demandados.....	20
Tabla 2-3:	Diámetros de los bujes propuestos.	28
Tabla 2-4:	propiedades Acero AISI 1045 180HB.....	31
Tabla 2-5:	Resumen de resultados	32

Tabla 2-6: Diámetro primitivo de las catarinas a utilizar.	38
Tabla 2-7: Costo preliminar de la mejora	41
Tabla 2-8: Costo preliminar de la implementación.	42
Tabla 2-9: Esbozo de planificación	43
Tabla B-1: Factores de seguridad recomendados.	56
Tabla C-1: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras rectangulares.	57
Tabla C-2: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras triangulares	57
Tabla C-3: Magnitudes asociadas a la fabricación de pletinas.	58
Tabla C-4: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras redondas.	58
Tabla D-1: Dimensiones de cadenas estándares de rodillos americanas: torón sencillo.	59
Tabla D-2: Capacidad nominal de potencia de cadenas de paso único en torón sencillo de una catarina de 17 dientes.	59
Tabla D-3: Factores de corrección de dientes, K1.	59
Tabla D-4: Factores de corrección de dientes, K2.	60
Tabla F-1: Lista preliminar de elementos para mejorar la bancada.	64
Tabla F-2: Lista preliminar de elementos para mejorar el Trolley	65
Tabla F-3: Lista preliminar de elementos para mejorar el Bloque de Trefilado	66
Tabla F-4: Lista preliminar de elementos para mejorar los botadores	67
Tabla F-5: Lista preliminar de elementos para mejorar el recibidor lateral.	68
Tabla F-6: Lista preliminar de elementos para mejorar el sistema de tracción.	69

Índice de figuras

Figura 1-1: Área de producción de barras.	3
Figura 1-2: Proceso general de fundición y dimensionado.	4
Figura 1-3: Proceso de tubos con aleación ETP.	4
Figura 1-4: Proceso de tubos con aleación DHP.	5
Figura 1-5: Proceso de producción de barras y pletinas.	5
Figura 1-6: Lados de la barra a medir.	6
Figura 1-7: Segmento de transición entre prensa y wax-tank	6
Figura 1-8: Barras descartadas.	7
Figura 1-9: Núcleo de una matriz de trefilado en diamante monocristalino SSCD.	8
Figura 1-10: Esquema simple del trefilado.	8
Figura 1-11: Comportamiento de diferentes propiedades del Cobre según % de deformación.	9
Figura 1-12: Partes de una matriz de trefilado	10
Figura 1-13: Tipos de mandriles en el trefilado.	12

Figura 1-15: Ilustración de un banco de trefilado simple.....	13
Figura 1-16: El proceso de trefilado.	14
Figura 1-17: Proceso de electro obtención del cobre	15
Figura 1-18: Sistema de barras colectoras de doble contacto para electro obtención.....	15
Figura 1-19: Banco de trefilado, visto desde el motor eléctrico.....	16
Figura 1-20: Cama de rodillos.....	16
Figura 1-21: Bloque de trefilado.	16
Figura 1-22: Sostenedores y empujadores	17
Figura 1-23: Trolley	17
Figura 1-24: Recibidor lateral.....	17
Figura 1-25: Sistema de tracción	18
Figura 1-26: Barras siendo trasladadas desde el punteo a zona de rodillos.	19
Figura 2-1: Demarcación de límites de la mejora.	21
Figura 2-2: Bloque de trefilado y bancada.....	21
Figura 2-3: Bancos de trefilado.	22
Figura 2-4: Recibidor lateral banco Bültmann.....	22
Figura 2-5: Recibidor lateral banco Bültmann.....	22
Figura 2-6: Dimensiones de la bancada.	24
(Vista en planta, dimensiones en mm)	24
Figura 2-7: Esquema de deflexión de una viga empotrada con carga distribuida uniformemente.	24
Figura 2-8: Deflexión simulada, ajustado 0.5x.....	25
Figura 2-9: Representación de los soportes del vástago.	25
Figura 2-10: Esquema movimiento de los soportes.	26
Figura 2-11: Descansos del cilindro	26
Figura 2-12: Descanso móvil del cilindro de tracción.	27
Figura 2-13: Trolley esquematizado con colores.....	27
Figura 2-14: Balancín del Trolley con desgaste.....	28
Figura 2-15: Propuesta de recuperación	29
Figura 2-16: Cuerpo de tirado y eslabón de enlace.....	30
Figura 2-17: Cuerpo de tirado del Trolley.	30
Figura 2-18: Cuerpo de tirado y eslabón de enlace.....	31
Figura 2-19: Fuerzas sobre el pasador. (Vista superior)	32
Figura 2-20: Simulación del pasador de menor tamaño.....	32
Figura 2-21: Eslabón de enlace.	33
Figura 2-22: Geometría del eslabón de enlace.....	33
Figura 2-23: Simulación del eslabón comunicador.....	33
Figura 2-24: Fuerzas en el movimiento de una barra.....	34
Figura 2-25: Adaptación conceptual.....	35

Figura 2-26: Botadores	35
Figura 2-27: Recibidor lateral actual.	36
Figura 2-28: Vista frontal del equipo y dimensiones.	36
Figura 2-29: En azul la cadena motora, y en rojo la cadena de traslado.	37
Figura 2-30: Vista del recibidor lateral.....	39
Figura 2-31: Bloque de Trefilado y su propuesta de mejora.	39
Figura 2-32: Bloque de Trefilado modificado.	40
Figura 2-33: Sistema de apriete con mordazas.	40
Figura 2-34: Esquema de funcionamiento del bloque de mordazas.	41
Figura 2-35: Banco de trefilado finalizada la implementación.	48
Figura 3-1: PLC actual del equipo.....	50
Figura 3-2: cámara de nitrógeno del wax-tank	51
Figura 3-3: Distribución de los equipos de la empresa.	52
Figura 3-4: Transportador.....	52
Figura A-1: Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.	56
Figura E-1: Dimensiones de la bancada.	61
(Vista en planta, dimensiones en mm)	61
Figura E-3: Deflexión simulada, ajustado 0.5x.....	62
Figura E-4: Esquema de deflexión de una viga empotrada con carga distribuida uniformemente en tramos.62	
Figura E-5: Deflexión simulada del segundo caso, ajustado 0.5x.....	62
Figura E-6: Representación de los soportes del vástago.	63
Figura E-7: Esquema movimiento de los soportes.....	63
Figura E-8: Corte propuesto en la bancada.	64

Introducción

Chile es el mayor productor de cobre del mundo con cerca de 5.7 millones de toneladas métricas producidas en el año 2021. Gran parte de esta producción es exportada al extranjero, ya sea en forma de concentrado, refinado o como resultado de una fundición, y únicamente lo determinado por la Ley de Reserva del Cobre (Ley N° 16.624 de 1967) se queda en el país. Chile podría ser competitivo en la manufactura del cobre si se enfoca en algo que las importaciones no pueden entregar: stock casi inmediato. Es ahí donde nace la principal motivación para desarrollar este trabajo: *rescatar la manufactura nacional*.

El proyecto será desarrollado en una empresa con metas productivas crecientes, cuya materia prima es en su mayoría cobre derivado de procesos de *electrowinning* en minería, como también del reciclaje de cables y cañerías. Actualmente la empresa cuenta con una línea de trefilado en superficie, cuya operación no es completamente óptima. Utilizando la experiencia observada en productores de bancos de trefilado, como también en la tecnología que se usa actualmente la empresa, se desarrollará una propuesta de diseño que sea suficiente para mejorar la eficiencia del proceso, aumentando la calidad de los productos.

El primer capítulo se desarrolla una revisión bibliográfica general que busca conocer el estado actual de la empresa sus procesos y la tecnología que actualmente está presente en sus procesos de trefilado. Por otro lado, se realiza una síntesis del estado del arte del proceso de trefilado, tecnologías usadas y proveedores de estos equipos.

En el segundo capítulo se comienza con la evaluación de la mejora, los componentes que se modificarán, los requerimientos base, y los cálculos asociados a cada uno de los casos. Se propone una mejora que involucra realizar recuperaciones, modificaciones y reemplazos completos, según corresponda, junto con una propuesta de implementación.

Por último, en el capítulo tres, se estima el costo que asumirá la empresa en esta mejora, se concluye sobre la propuesta, y se entregan recomendaciones para futuras mejoras que complementarían este proyecto.

Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que permitirán cumplir este propósito principal.

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejora de un banco de trefilado de barras y pletinas de cobre con accionamiento hidráulico.

Objetivos específicos

1. Describir la empresa, sus procesos y producción.
2. Estudiar los métodos de trefilación existentes en la industria de fabricación de barras de cobre.
3. Definir el problema en el banco de trefilado.
4. Desarrollar propuestas de mejora conceptual al diseño del banco de barras.
5. Estimar costos del proyecto para la empresa.

1. CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE: LA EMPRESA Y EL PROCESO DE TREFILADO.

En este capítulo se entrega un contexto de operación acerca de la empresa a la cuál será presentada esta propuesta de diseño, abarcando sus procesos y su producción, describiendo el problema que se buscará solucionar. Por otro lado, se realiza una síntesis de información bibliográfica acerca del trefilado y los parámetros mecánicos que influyen en este proceso. Por último, se define el problema del banco de trefilado argumentado principalmente en las faltas a la norma de calidad y su influencia en el tiempo de producción.

1.1. Empresa, procesos y producción.

La propuesta de diseño será presentada a una empresa manufacturera de cobre la cuál fabrica tubos, barras y pletinas de diferentes dimensiones y aleaciones. Comparando la producción del primer semestre del año 2021 frente al año 2022, se ha presentado un aumento en la producción de barras y pletinas cercana al 20%. La demanda de barras es creciente, pero su producción se ve frenada por factores de disponibilidad de equipos, por problemas varios en la prensa, y reprocesos normalizados.

En relación con la disponibilidad de equipos, actualmente se tiene un horno que según programación extruye billets de 230[mm] o de 135[mm]. Para reducir la espera de billets se está desarrollando la puesta en marcha de un segundo horno que permita producir billets de diferentes tamaños a la vez. Por lo tanto, resulta necesario implementar una mejora en el “Área de barras”, que busque reducir el tiempo en la manufactura, y reduzca los reprocesos generando así una producción más fluida.



Figura 1-1: Área de producción de barras.

Actualmente la planta cuenta con un proceso tipo cascada que comienza en hornos de fundición, le sigue un proceso de extrusión mediante prensas, y luego, según corresponda, pasará a una o más etapas de trefilado. Los procesos que siguen las barras, los tubos y las pletinas quedan mejor descritos en las imágenes que se presentan a continuación.

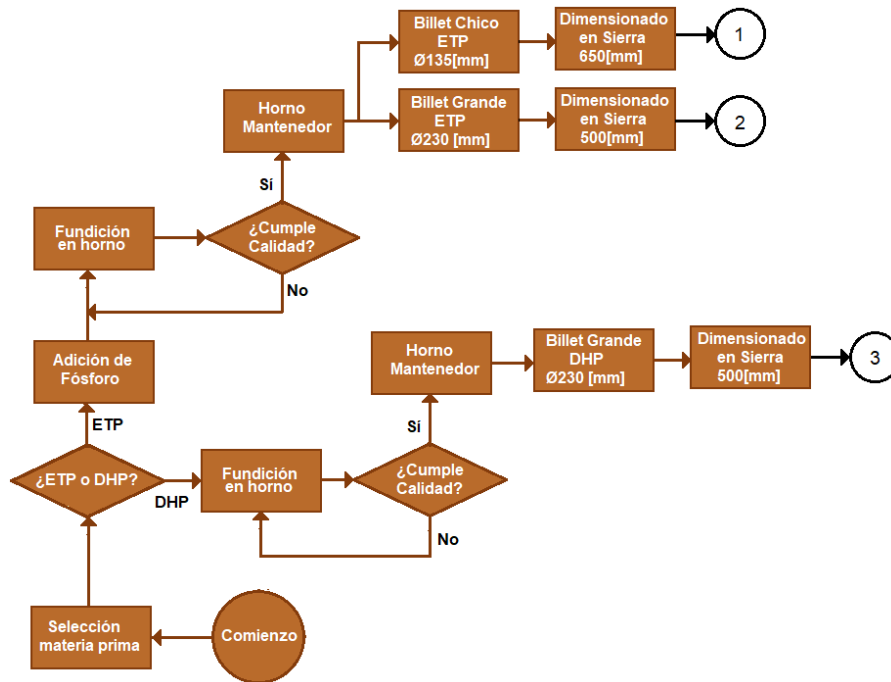


Figura 1-2: Proceso general de fundición y dimensionado.

Al tener en funcionamiento los dos hornos, el proceso mostrado en la Figura 1-2 cambiaría mostrando un Horno 1 y un Horno 2. El Horno 1 produciría en su mayoría cobre DHP, y el Horno 2, cobre ETP.

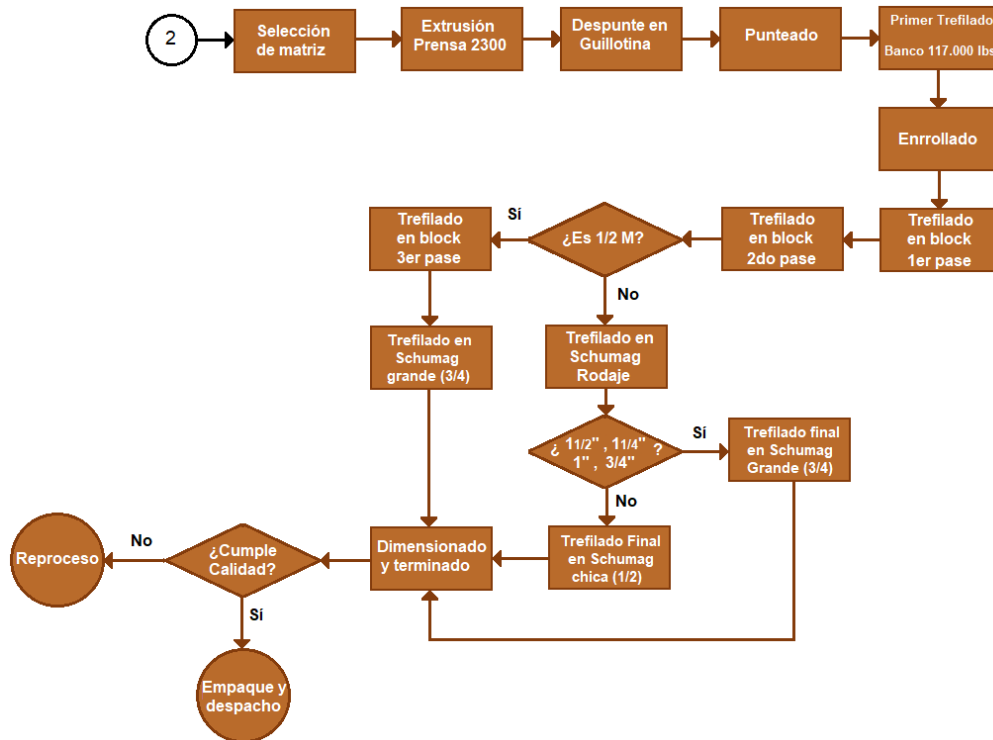


Figura 1-3: Proceso de tubos con aleación ETP.

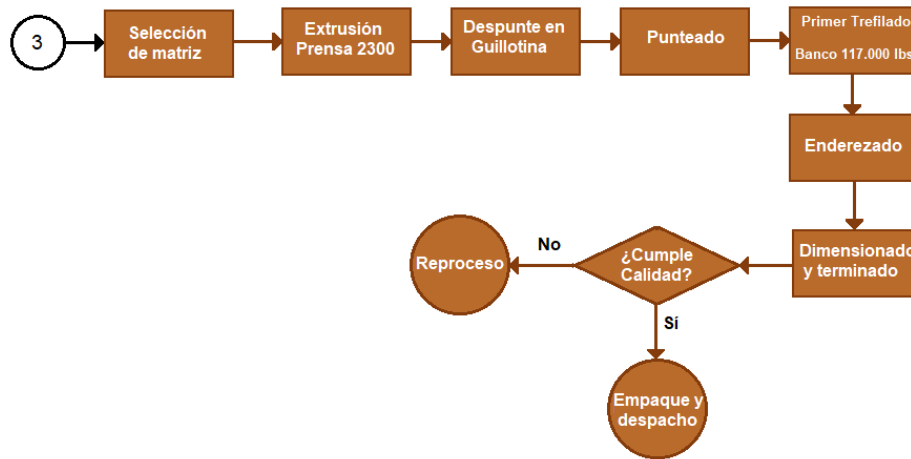


Figura 1-4: Proceso de tubos con aleación DHP.

Los procesos mostrados en la Figura 1-3 y la Figura 1-4 no se verán directamente afectados por la mejora, por lo cual no serán descritos en profundidad.

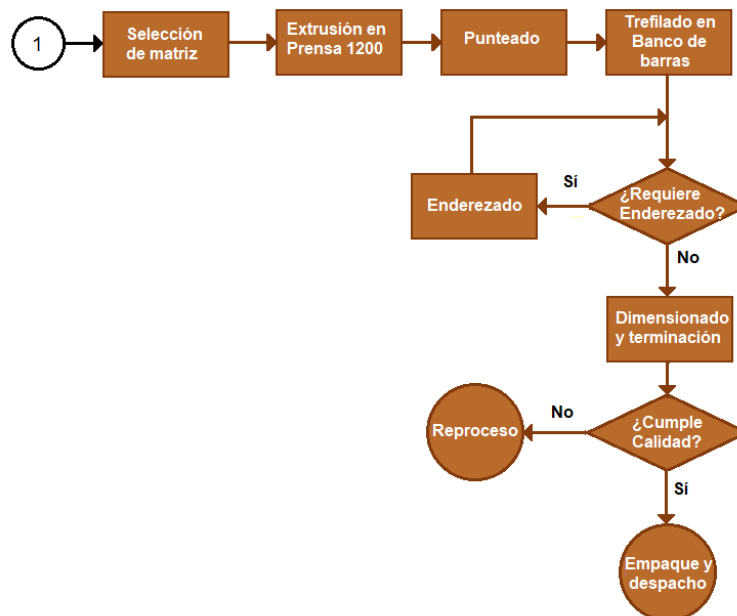


Figura 1-5: Proceso de producción de barras y pletinas.

Dentro de la Figura 1-5 se puede destacar el proceso de “Extrusión en Prensa 1200”, y de “Treflado en Banco de Barras”, además de un proceso de “Enderezado”. Cómo muestra el diagrama, el proceso de enderezado debería ser un opcional y utilizado excepcionalmente, actualmente todas las barras y pletinas pasan por esa zona.

1.1.1 Control de calidad

La calidad de una barra es definida en tres aspectos geométricos, los cuales se miden una vez que se dimensiona la barra en la zona de corte y terminación (ver figura 1-5)

- **Inspección Visual:** Las barras son rechazadas al observarse marcas superficiales producto del proceso de fabricación en el banco, es una inspección que depende de la experiencia de la persona encargada, y no existe una métrica definida que regule la calidad superficial de las barras. Se sugiere mejorar este apartado.
- **Dimensiones:** se mide la barra en su sección transversal, y también su largo. Los errores dimensionales están asociados a la norma ISO2768, la cual rige las tolerancias permisibles según rango de longitud nominal. De esta manera, para una barra 19mm x 38mm x 1510mm sus tolerancias serán, respectivamente, ± 0.2 mm, ± 0.3 mm, ± 1.2 mm.
- **Rectitud:** para medir la rectitud de la barra se utiliza un bloque rectificado de acero, y una barra calibre. Entre el calibre y el bloque se posiciona la barra a medir y se buscará que los claros de luz sean imperceptibles para cumplir con el control de calidad. Nuevamente es una observación que depende netamente de la experiencia del encargado.

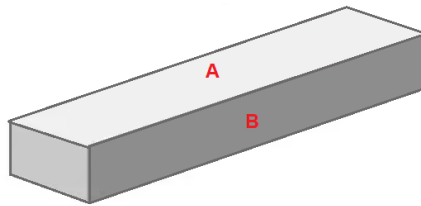


Figura 1-6: Lados de la barra a medir.

El proceso de conformado comienza en la prensa (ver figura 1-5), la cual extruye la barra patrón que será trefilada en un paso posterior. Este equipo posee un diseño que dificulta la formación de barras rectas, ya que en su zona final existe un cambio de nivel que obliga a las barras a curvarse. Este cambio de nivel puede verse en la Figura 1-7.



Figura 1-7: Segmento de transición entre prensa y wax-tank

En una jornada normal se producen aproximadamente 700 metros lineales de barra de 19x38 [mm] (la más vendida), cada una de estas barras trefiladas mide cerca de 7.5 metros, lo que equivale aproximadamente a 95 extrusiones diarias en la prensa.

Por cada barra trefilada en el banco, se deben obtener 6 barras de dimensiones 19x38x1510[mm]. Si se consideran los metros lineales diarios, se producen alrededor de 560 barras. De esta cantidad total de barras, cerca de 60 son descartadas por incumplimiento a la norma de calidad, lo cual equivale a un 10% de la producción diaria.



Figura 1-8: Barras descartadas.

1.1.2 La norma chilena NCh. 256 OF.72

Titulada “Cobres aleados y aleaciones de cobre. Barras, perfiles y platinas. Terminología. Especificaciones generales y métodos de ensayo.”, es la norma que rige la fabricación de los productos que motivan este trabajo. En aspectos generales describe la composición de las distintas aleaciones de cobre, establece tolerancias dimensionales y de rectitud, cómo también tolerancias a la conductividad eléctrica. Esta norma es declarada por la empresa como la guía de su producción, pero se ha visto que no hay un estricto apego a su cumplimiento.

1.2 El proceso de trefilado

El trefilado es un proceso de conformado que utiliza las propiedades plásticas de los materiales, y consiste en estirar un metal o un polímero, a través de una herramienta de trefilado. Esta herramienta es conocida como *dado de estirado* o *matriz de trefilado*, y está compuesto comúnmente de carburo de tungsteno, un material que se caracteriza por su dureza, resistencia al desgaste y tenacidad.

Estas matrices están diseñadas en dos partes denominadas caja y núcleo. La caja se compone de un material resistente y tenaz cuyo objetivo es proteger y contener el núcleo. El núcleo es el encargado de realizar la reducción de sección al momento de trefilar el producto, para cada núcleo existirá una caja que lo contenga.



Figura 1-9: Núcleo de una matriz de trefilado en diamante monocristalino SSCD.
(Fuente: Balloffet (2023), *Hileras de diamante para alambres de forma*)

El material por trefilar posee dimensiones mayores que el dado, pero una geometría proporcional. Mediante una fuerza de tracción en uno de sus extremos, es tirado por dentro de la matriz, la cual se encargará de deformar el material entregándole las dimensiones requeridas. El resultado es un producto con menor área transversal, pero de mayor largo.

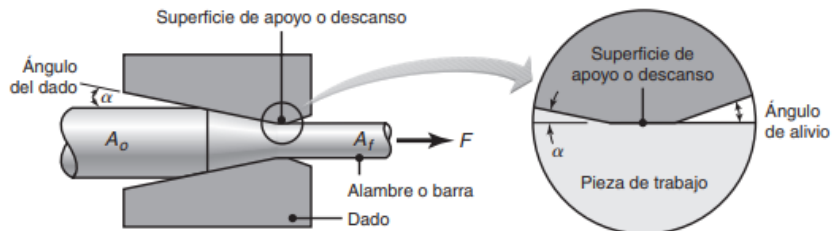


Figura 1-10: Esquema simple del trefilado.
(Fuente: Kalpakjian S., Schmid S. (2008), *Manufactura, Ingeniería y Tecnología 5ta ed.*)

En promedio, por cada pase, una barra ve reducida en un 20% su sección transversal, por lo cual es posible que algunos productos requieran de más de un proceso de trefilado para alcanzar las dimensiones finales.

Existe trefilado en frío y en caliente, sin embargo, en este proyecto sólo se trabajará con el trefilado en frío, ya que el cobre es un material maleable que no presenta complejidades al trabajar en esa condición. Para comprender los fundamentos de este importante proceso se debe conocer algunos conceptos relacionados al comportamiento de los materiales:

- **Límite Fluencia:** todo material posee una zona elástica regida por las Leyes de Hooke, y en dónde existe una proporcionalidad entre deformación y esfuerzo (Modulo de Young). En esta zona, el material tiene la capacidad de deformarse y volver a su forma original cuando se aplica y retira una carga. Una vez se alcanza el Límite de Elasticidad, comienza la zona de fluencia, o de elasticidad aparente, zona cuyo límite es conocido como Límite de Fluencia. Existen varios criterios utilizados para determinar el límite de fluencia de los materiales, el más usado y el que mejor se adapta a los materiales el criterio de Von Misses.
- **Plasticidad:** propiedad propia del material para deformarse permanentemente. Cuando se supera el límite de fluencia, el material pasará de tener deformación elástica a una deformación plástica. El trefilado se fundamenta en la deformación plástica controlada de los materiales.

- **Resistencia a la Tracción:** también llamado límite de rotura, es un cociente entre la carga de tracción máxima que soporta un material en el instante de la rotura, y la superficie de la sección transversal. El trefilado es un proceso que realiza esfuerzos de tracción en todo momento, por lo tanto, es fundamental controlar que este esfuerzo se mantenga alejado de la tensión de tracción máxima.
- **Ductilidad:** está relacionado con la capacidad de deformarse plásticamente sin romperse. Es descrito también como la capacidad de un material para formar hilos o alambres. Esta propiedad está estrechamente relacionada a la Fluencia.
- **Endurecimiento por deformación en frío¹:** es un fenómeno propio de los metales en el cual el metal incrementa su límite de fluencia como resultado de la deformación permanente generada en frío. Este endurecimiento podría ser utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales que no pueden ser endurecidos mediante otros procesos. El endurecimiento es resultado del aumento de las dislocaciones macroscópicas en el metal, lo cual reduce la posibilidad de movimiento entre ellas. Esto significa que a medida que se deforma el material, se requerirá mayor esfuerzo para seguir deformándolo.

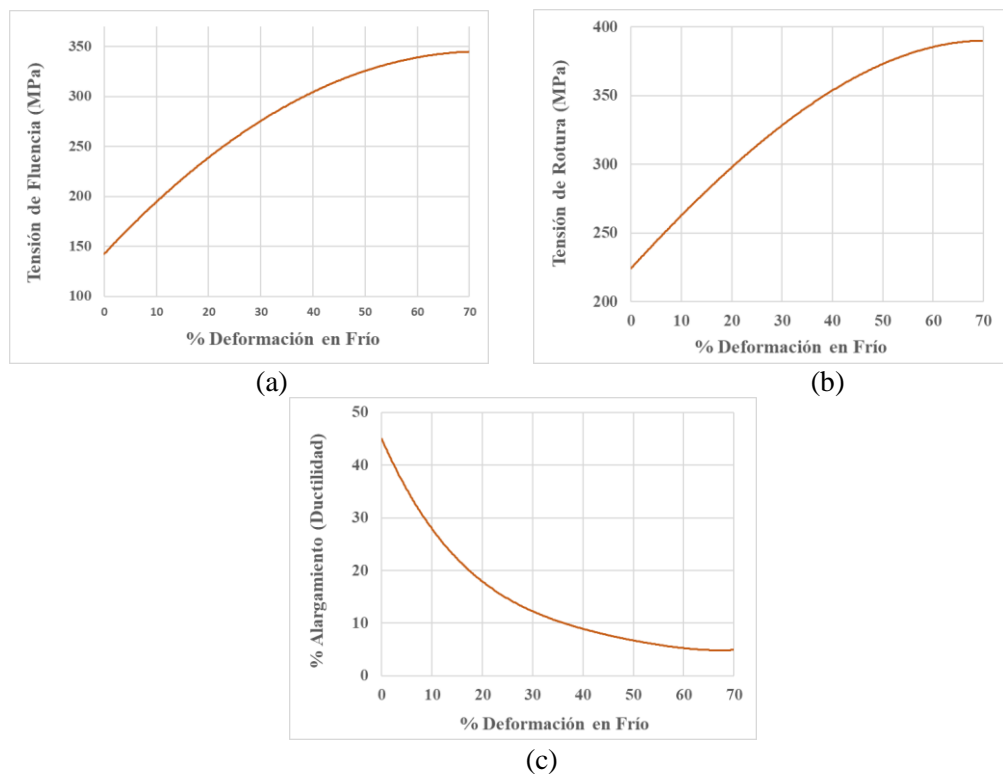


Figura 1-11: Comportamiento de diferentes propiedades del Cobre según % de deformación.

a) Tensión de Fluencia; b) Tensión de Rotura; c) Ductilidad

Nota Adaptado de: *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* por Callister W, 1995.

Según indica Rodríguez (2017), hay dos coeficientes muy importantes en este apartado: Coeficiente de resistencia a la deformación plástica en frío y el coeficiente de endurecimiento por deformación plástica en frío. Estos parámetros dependen específicamente de las condiciones de trabajo y de la composición del material.

¹ Más información acerca del Endurecimiento por deformación se encuentra en el Anexo A.

- **Coefficiente de rozamiento de Coulomb:** es el nombre que recibe el coeficiente de rozamiento que deriva del deslizamiento relativo entre las superficies de contacto de material y herramienta. La tensión tangencial producida como consecuencia del rozamiento de deslizamiento en la zona de contacto de ambas superficies es directamente proporcional a la presión normal entre dichas superficies [Rodríguez, 2017]. Según Von Mises $\mu_{\text{máx.}} = 0,577$.

1.2.1 El cobre

El centro de este trabajo es el cobre, en específico el UNS C11000 ETP normado por la ASTM B187-11, esta norma es referenciada en la norma chilena NCh 256 OF72, que rige la producción de barras y pletinas. Este tipo de cobre tiene una composición química de 99,9% Cobre y un 0,04% de Oxígeno.

Las propiedades mostradas en el ítem anterior se resumen a continuación:

Tabla 1-1: propiedades cobre UNS C11000 ETP

Propiedad	Denominación	Valor
E	Módulo de Young	117 000[MPa]
Y	Límite de fluencia	69[MPa]
Rm	Tensión de rotura	220[MPa]
C	Coefficiente de resistencia a la deformación	255[MPa]
n	Coefficiente de endurecimiento por deformación	0,54
μ	Coefficiente de rozamiento en la interfase	0,40

En promedio, por cada pase, una barra ve reducida en un 25% sus dimensiones transversales, por lo cual es posible que algunos productos requieran de más de un proceso de trefilado para alcanzar las dimensiones finales

1.2.2 Fuerza de trefilado

En el esquema de trefilado mostrado en la figura 1-10 puede observarse el dado de trefilado y parte de su geometría. Entre los parámetros importantes de esta geometría se encuentra el ángulo de reducción el cual por lo general está entre 7° y 10° .

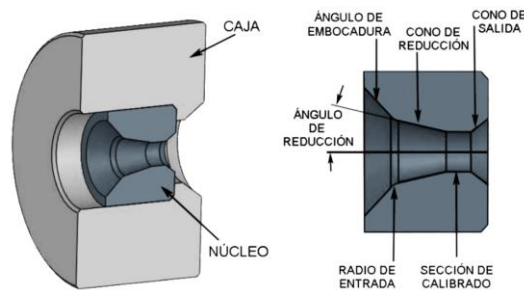


Figura 1-12: Partes de una matriz de trefilado

(Fuente: Rodríguez, O. (2017), *Metodología para el estudio y diseño tecnológico del proceso secuencial de estirado multietapa de alambre y barras de sección circular*)

En una primera aproximación la fuerza de trefilado es entregada por las tres ecuaciones mostradas a continuación:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (1)$$

$$Y_{prom} = \frac{c \cdot \epsilon^n}{1+n} \quad (2)$$

La ecuación (1) muestra la deformación real resultante debido al cambio de sección, la ecuación (2) aproxima el esfuerzo de fluencia promedio del material (en este caso el cobre) según las propiedades mostradas anteriormente. Finalmente es posible obtener la ecuación que rige la fuerza de trefilado:

$$F = Y_{prom} \cdot A_f \cdot \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (3)$$

Y_{prom} : Esfuerzo de fluencia promedio del material [N/mm²] o [MPa]

A_f : Área transversal final [mm²]

A_0 : Área transversal inicial [-]

μ : Fricción en la zona del dado [-]

α : Ángulo del dado en radianes [rad]

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema ante condiciones que salgan de los parámetros de diseño se considerará un margen del 50%. Este 50% es una convención para el cálculo de factores de seguridad, por lo tanto, la fuerza de diseño (F_d) vendrá entregada por:

$$F_d = 1.5 * F_{max} \quad (4)$$

Por último, el trefilado de barras se realiza a una velocidad promedio de entre 0.5[m/s] a 1.5[m/s].

1.2.3 Cilindros hidráulicos

El banco utilizará como sistema de tracción un cilindro hidráulico por lo que es necesario conocer los parámetros principales de su funcionamiento. Se dispone de la fuerza de diseño, y la velocidad de trefilado.

La presión de trabajo del cilindro vendrá determinada por la relación:

$$P = \frac{F_{max}}{A_{piston}} \quad (5)$$

Y el caudal, conociendo al velocidad, viene entregado por:

$$Q_{max} = V \cdot A_{piston} \quad (6)$$

Dónde A_{piston} es el área del pistón del cilindro hidráulico.

Con esto, se podrá determinar los requerimientos de la unidad hidráulica, del cilindro, y a su vez parte de las características que deberá cumplir las líneas de alimentación.

1.3 Trefilado en la manufactura del cobre

En la industria de manufactura del cobre, el proceso de trefilado es uno de los más importantes y está presente en la elaboración de cables, cañerías y barras. En Chile la manufactura con más presencia es la producción de cables, le sigue la elaboración de barras con sólo dos empresas, y en cuanto a tuberías,

existe sólo una empresa que las fabrica.

El trefilado de barras y pletinas es el principal foco de este documento, por lo cual el centro de la investigación sólo está asociado a estos dos tipos de producto.

1.3.1 Bancos de trefilado (*Cold Drawbench*)

Son trefiladores que realizan sólo una reducción de diámetro por pasada. Existen bancos subterráneos y en superficie, a su vez pueden tener tracción mecánica (piñón y cadena) o hidráulica (bomba y cilindro). Si bien lo normal es que acepten sólo productos rectos, también hay bancos de pletinas que aceptan rollos.

Los bancos pueden tener diferentes dimensiones, lo cual definirá el tamaño del producto que permite fabricar. Estas dimensiones están regidas por la diagonal o diámetro máximo que permiten, y también por el largo del producto final.

Algunos bancos utilizan mandriles para la conformación de perfiles rectangulares (tubos cuadrados), pero no forman parte de los alcances de este proyecto.

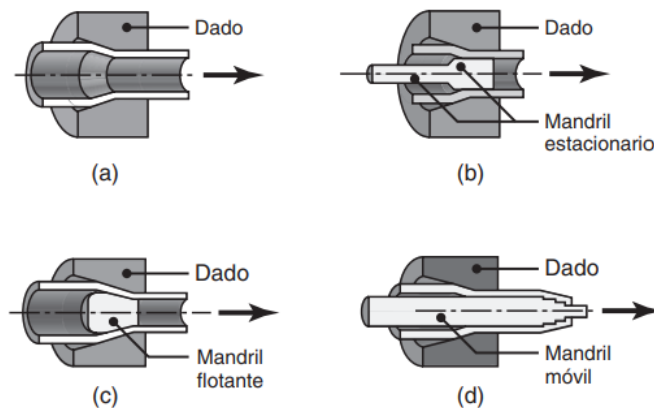


Figura 1-13: Tipos de mandriles en el trefilado.

(Fuente: Kalpakjian S., Schmid S. (2008), *Manufactura, Ingeniería y Tecnología 5ta ed.*)

Los bancos subterráneos son utilizados principalmente cuando el espacio es una restricción. Un banco de barras que acepte barras de 10 metros medirá al menos 30 metros de longitud.



Figura 1-14: Bancos de trefilado.

a) Tracción por cadena, sin recibimiento b) Tracción hidráulica completo

(Fuente: Sheng Chyeon Enterpirese CO., LTD. 2015)

1.3.2 Composición general de un banco

Los bancos de trefilado constan de 8 cuerpos principales en su estructura:

- **Recepción:** Estructura que permite trasladar las barras punteadas hasta el ingreso del bloque de trefilado, comúnmente compuesta de rodillos y correas que permiten un rápido traslado.
- **Bloque de trefilado:** Estructura metálica fija de grandes dimensiones, que en su extremo soportará los conos porta matriz y la herramienta de trefilado. A su vez soporta los cilindros de empuje que acomodan la pieza en la matriz, empujándolo hasta que el carro tirador (trolley) agarre el extremo de la pieza.
- **Bancada:** Estructura metálica fija que guía y soporta el carro tirador (o trolley). En los bancos de tracción con cadena, la bancada en su centro soporta la cadena, y en uno de sus extremos la piola que desplaza el carro libremente.
- **Trolley:** Es el carro encargado de tirar el material a trefilar, sus mordazas pueden tener accionamiento mecánico o neumático. Estas mordazas tienen una variedad de formas, pueden ser de agarre horizontal, vertical, o radial. El trolley será tirado por la cadena o el cilindro al momento de trefilar la barra.
- **Sostenedores:** También llamados botadores, son elementos encargados de entregar soporte a la barra una vez que es liberada del trolley. Además, son los encargados de empujar la barra hacia el recibidor.
- **Recibidor lateral:** Recibe las barras y las entrega a la etapa siguiente. Normalmente están a la altura de la bancada, y tienen recubrimientos que evitar rayar la barra.
- **Sistema de tracción:** Involucra la unidad de potencia y el sistema de tracción como tal. Existen de tipo mecánico y de tipo hidráulico. Se encarga de entregar la fuerza necesaria para traccionar el elemento a trefilar.
- **Unidad de automatización:** la unidad que controla todo el funcionamiento del banco, desde que se aprieta el primer botón hasta que termina el ciclo y comienza otro.

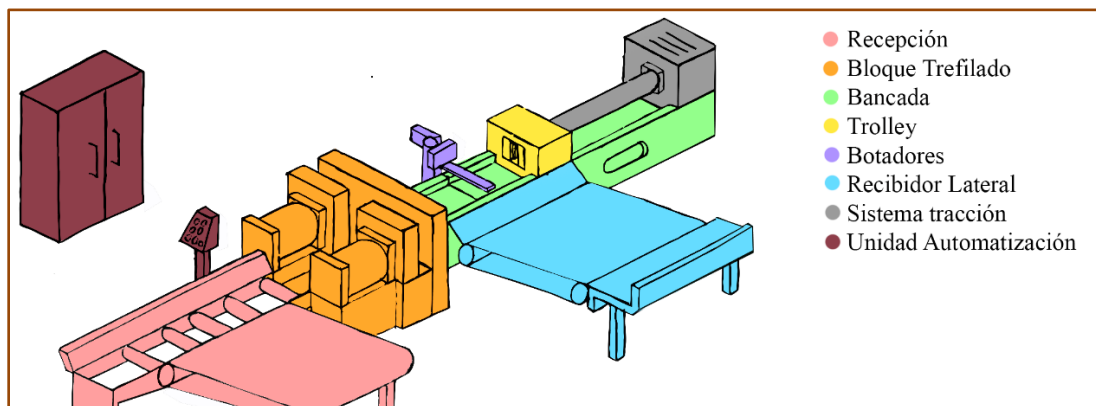


Figura 1-15: Ilustración de un banco de trefilado simple.

1.4 Definición del problema.

A continuación, se presenta un diagrama que describe todo el proceso que sigue una barra desde que sale de la prensa hasta que es trasladada a la zona de terminación. Este diagrama es la delimitación de lo que la empresa llama “Proceso de Trefilado”. En el layout de la empresa, el banco comienza y termina delimitado por el traslado de las barras hacia y desde el banco.

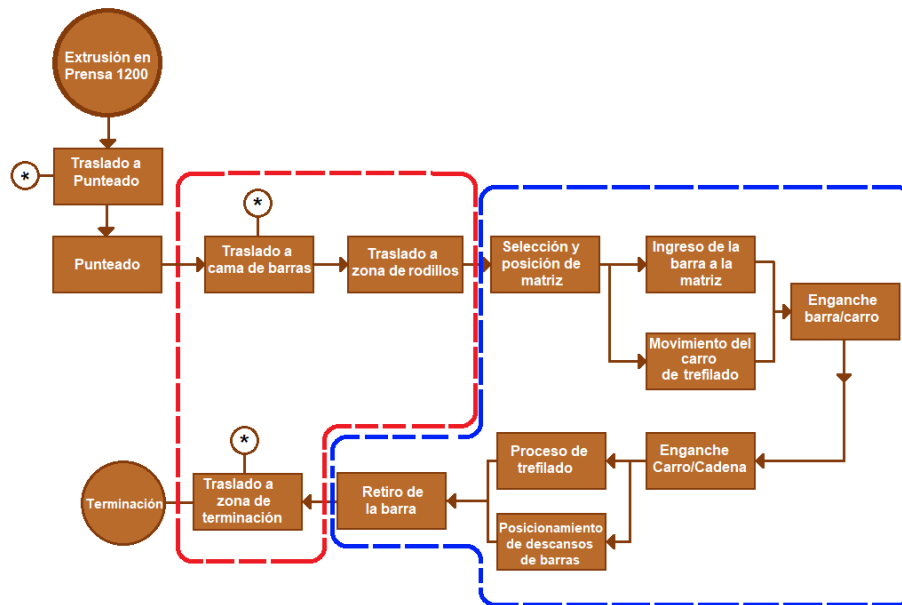


Figura 1-16: El proceso de trefilado.

En la zona delimitada en color rojo se presentan los procesos asociados a traslado, y que están relacionados a los cuerpos de “Recepción” y de “Recibidor Lateral” mencionados en el ítem 1.3.2. En la zona azul se presenta los procesos que son propios del banco de trefilado, teniendo presencia aquí los cuerpos: “Bloque de trefilado”, “Bancada”, “Trolley”, “Sostenedores”, “Sistema de tracción” y “Unidad de Automatización”.

1.4.1 Calidad

Al final de la línea de producción de las barras, se han identificado recurrentes faltas en el cumplimiento del estándar de calidad, las cuales se presentan como marcas superficiales y flexiones que no cumplen con los requerimientos de rectitud según lo que se indica en el ítem 1.1.1. Estos problemas de calidad afectan a la empresa en sus procesos internos, cómo también al cliente final.

Por ejemplo, en el caso de las flexiones, estas se deben corregir en un proceso de enderezado (Figura 1-5). Este proceso consiste en pasar las barras por un enderezador de rodillos, los cuales deben estar correctamente calibrados para que la barra tenga una reducción en las flexiones. Cada vez que se produce una barra con una sección transversal diferente este enderezador debe ser calibrado mediante “prueba y error”, desplazando cada uno de los rodillos vertical u horizontalmente. Dependiendo de las dimensiones finales de la barra serán las veces que esta deberá pasar por el enderezador, lo que significa un gasto de tiempo no planificado.

Ahora bien, si se analiza la perspectiva del cliente final, las barras producidas son normalmente utilizadas para portar los cátodos en el proceso de electro-obtención del cobre. Es importante cuidar la rectitud de las barras ya que los surcos en los que se posicionan poseen una pequeña separación. Una barra que no cumpla los requerimientos de calidad del cliente significa descartar el producto, ya que no puede cumplir con su objetivo final.

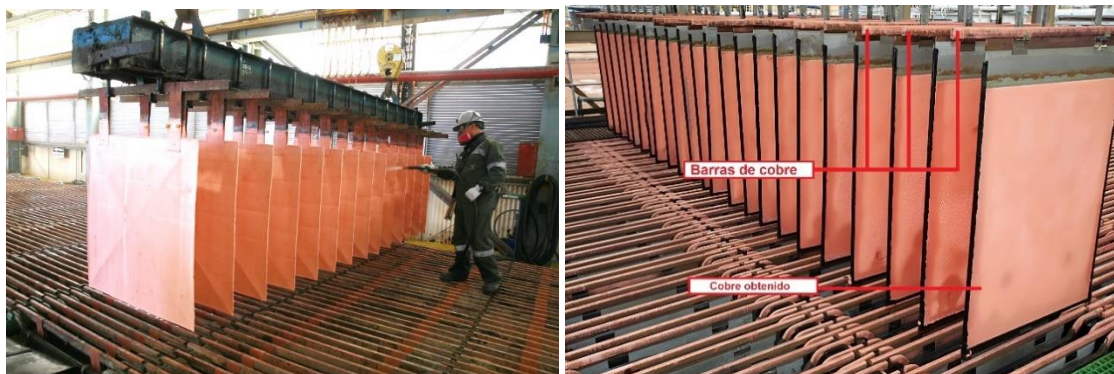


Figura 1-17: Proceso de electro obtención del cobre
(Fuente: CODELCO (2013), *Memoria anual 2013*)

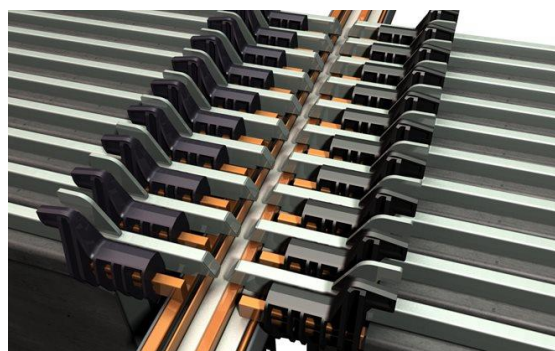


Figura 1-18: Sistema de barras colectoras de doble contacto para electro obtención
(Fuente: Metso, 2023, *Double Contact busbar system*)

Los problemas de calidad están relacionados directamente con el trabajo de trefilado, ya que este proceso debería entregar un producto listo para ser dimensionado, por lo cual, se ha logrado identificar que la principal causa se encuentra en el Banco de Trefilado de la empresa, el cuál será descrito en profundidad a continuación.

1.4.2 El banco de trefilado la empresa



El banco de trefilado que dispone la empresa es un Vaughn Draw Bench 1965, del tipo piola y cadena (*Figura 1-19*). Es un banco accionado por un motor eléctrico, el cual mediante una caja reductora hace girar la cadena que se ancla a un carro encargado de tirar la barra. El banco tiene una fuerza de tirado de 75.000 [lbf], equivalentes aproximadamente a 333.600[N]. El motor eléctrico que utiliza entrega una potencia de 150HP, funcionando en un rango de RPM de entre 400 y 1200RPM. Además, se encuentra conectado a una red de 280V. Este banco, realiza el trefilado a una velocidad promedio de 0.3[m/s].




Figura 1-19: Banco de trefilado, visto desde el motor eléctrico.

Este banco tiene varias deficiencias en su operación, derivadas de la antigüedad y la falta de mantenimiento del equipo a lo largo de su vida operativa. Estas fallas se traducen en problemas de calidad y contratiempos dentro de la producción. A continuación, se presenta una tabla del tipo causa/efecto de lo que provocan estas fallas dentro del banco al producto y al proceso en general.

Tabla 1-2: Problemas del actual banco de trefilado y sus efectos.

Parte del equipo	Problema	Efecto
 <p>Figura 1-20: Cama de rodillos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El equipo actualmente no posee recepción, que es la comunicación entre Punteo y Banco. Por lo tanto, se requiere del uso del puente mecánico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempos de traslado elevados. - Aumenta el tiempo de producción.
	<ul style="list-style-type: none"> - El transportador que alimenta al banco posee rodillos faltantes y no posee tracción mediante motor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor carga de trabajo al operador.
 <p>Figura 1-21: Bloque de trefilado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindros de empuje desconectados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor carga de trabajo al operador - Falta de eficacia en el agarre del trolley, por ende, mayor tiempo de proceso.
	<ul style="list-style-type: none"> - No posee estructura de agarre que ejecuta el trefilado de la punta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de eficacia en el agarre del trolley, por ende, mayor tiempo de proceso.

Parte del equipo	Problema	Efecto
<p>Bloque de trefilado</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Faltan elementos que restrinjan el movimiento de la barra. 	<ul style="list-style-type: none"> - Marcas superficiales y flexiones a lo largo del producto final.
 <p>Figura 1-22: Sostenedores y empujadores</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Física y electrónicamente desconectados del equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor carga de trabajo al operador - Aumenta el tiempo de proceso.
 <p>Figura 1-23: Trolley</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste en piezas móviles y pasadores. - Falta de elementos que guíen desplazamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de la manipulación del operador. - Falta de eficacia en el agarre, aumentando el tiempo de proceso, y produciendo daños en la matricería al requerir que el cuerpo choque con el bloque de trefilado. - Flexiones en el producto final.
 <p>Figura 1-24: Recibidor lateral</p>	<ul style="list-style-type: none"> - No existe comunicación con el transportador hacia terminación. Requiere del uso del puente mecánico. - El revestimiento es reducido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta el tiempo de producción. - Produce marcas superficiales en los productos.

Parte del equipo	Problema	Efecto
 <p>Figura 1-25: Sistema de tracción</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad reducida en comparación a equipos modernos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor tiempo de proceso de trefilado.
	<ul style="list-style-type: none"> - Principio de funcionamiento antiguo y con desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> - Produce marcas superficiales en el producto debido al paso de la cadena.
	<ul style="list-style-type: none"> - Fallas recurrentes en el retorno con piola. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta el tiempo de retorno libre. - Recurrentes acciones correctivas en su mantenimiento.
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos desconectados o en mal estado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere muchas veces de la manipulación del operador, aumentando su carga laboral y el tiempo dedicado al trefilado.

1.4.3 Tiempos y traslados

A continuación, se describirá un apartado importante, pero que no será totalmente corregido en la propuesta de mejora, debido al alcance acotado únicamente al equipo. Los tiempos en el proceso completo de trefilado están asociados al trabajo realizado en banco y a los traslados entre máquinas.

En el caso del banco de trefilado, se ha identificado una ineficiencia derivada de los problemas mencionados en el ítem 1.4.2, en donde la reducida automatización, la falta de partes y el desgaste propio de la antigüedad del equipo han reducido la efectividad de algunas funciones de la máquina. Varias acciones de hecho requieren que el operador se involucre más de la cuenta en la máquina lo cual aumenta la posibilidad de accidentes.

Por ejemplo, es común que el Trolley requiera 3 intentos antes de lograr agarrar el extremo de la barra con sus mordazas, así mismo, es recurrente que el carro necesite al menos dos intentos para engranar con la cadena; que el carro no retorne al pulso del botón; o que el operador sea el que saque la barra del banco.

A continuación, se presenta un resumen de los tiempos asociados al proceso de trefilado, desde que las barras salen de la prensa.

Tabla 1-3: Tiempos de producción.

Proceso	Tiempo [s]
Traslado a punteo	264
Punteo (<i>por barra</i>)	29
Traslado a banco	158
Trefilado (<i>por barra</i>)	56
Traslado a terminación	148
Enderezado (<i>por barra</i>)	33

En la tabla 1-3 se encuentran destacados los tiempos que se buscarán reducir en esta propuesta de mejora que están asociados al banco de trefilado y a sus resultados.

Por el lado de los traslados, en la zona roja presentada en la Figura 1-16 se ha identificado un problema asociado con el uso del puente mecánico, lo cual genera tiempos muertos que no agregan valor al producto debido a la falta de las estructuras en el banco de trefilado (Recibidor Lateral y Recepción, ver figura 1-15).

Esto obliga a utilizar el banco de trefilado al menos 3 veces, pero debido a la disposición de los equipos y las limitantes de este proyecto, únicamente se reducirá uno de estos traslados.

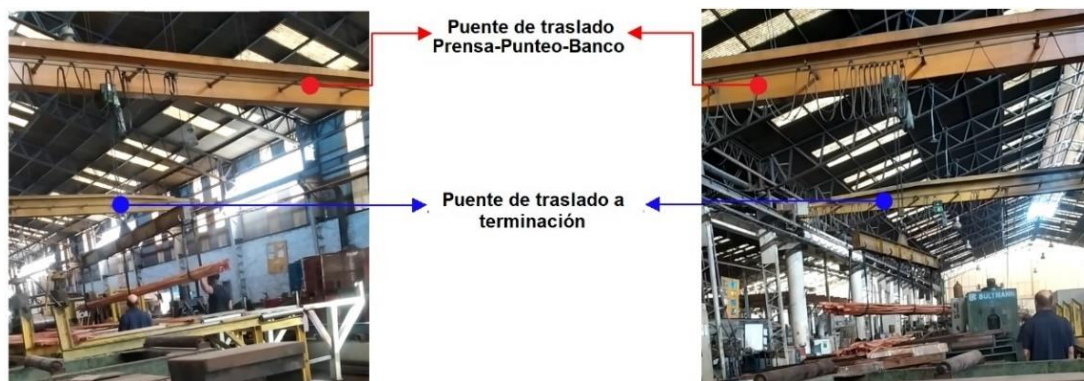


Figura 1-26: Barras siendo trasladadas desde el equipo de punteo a zona de rodillos.
(Ver figura 1-22)

2. CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA

En este capítulo se describe la propuesta de mejora, comenzando por la descripción del propósito general, seguido por el desarrollo del cálculo de fuerzas requeridas por el equipo, el diseño conceptual de la mejora y la elección de los equipos necesarios, y un esbozo de la implementación proyectada para la mejora.

2.1 Propósitos generales

El desarrollo de la mejora buscará cumplir cuatro propósitos que en su conjunto estarán encargados de solucionar el problema identificado anteriormente. En un principio, esta mejora mantendrá el layout de la empresa, con el objetivo de no influir significativamente en las operaciones. Sin embargo, en busca del mejoramiento continuo, se entregarán recomendaciones a la empresa que complementarán la mejora al banco de trefilado, la cual, entre otras cosas deberá:

- Reducir el uso del puente mecánico (primer traslado, Figura 1-16).
- Reducir los problemas de agarre producidos en el Trolley, presentados en el ítem 1.4.2.
- Recuperar alguno de los elementos de automatización faltantes, sin profundizar en su programación.
- Mejorar la calidad de tirado, reduciendo los problemas de calidad.

2.1.1 Requerimientos

Actualmente la empresa dispone de un catálogo interno de 48 matrices de trefilado, de las cuales 33 corresponden a barras de diferentes formas, y 15 a pletinas. Utilizando las ecuaciones del ítem 1.2.2 es posible determinar la fuerza de trabajo necesaria para ejercer el trefilado, todos los valores se encuentran en el Anexo C, y a continuación se presenta la fuerza de diseño (con un factor de seguridad equivalente a 1.5 veces la fuerza de trabajo²) y el requerimiento que poseen las barras con mayor demanda.

Tabla 2-1: Fuerzas de trefilado

Fuerza	Fuerza de Trabajo [N]	Fuerza de Diseño [N]
Máxima	154 538	231 807
Promedio	72 130	108 195

La fuerza máxima corresponde a una pletina de 120x10mm, la pletina más grande que puede producir esta empresa, el cual es un producto de fabricación muy ocasional.

Ahora bien, si se consideran los productos más vendidos por la empresa se tienen los siguientes requerimientos:

Tabla 2-2: Fuerzas de trefilado productos más demandados.

Barra	Fuerza de Trabajo [N]	Fuerza de Diseño [N]
T 22x51	39 549	59 323
R 19x32	60 480	90 720
R 17x37	64 067	96 101
R 19x38	65 990	98 984
R 25x38	69 303	103 954

² La elección de este valor del factor de seguridad es explicada en el Anexo B.

Otro de los requerimientos importantes es el espacio para utilizar, ya que no se buscará modificar el layout de manera excesiva por lo tanto se dispone del siguiente espacio. Demarcado se encuentra los límites de la mejora equivalentes a cerca de 250 metros cuadrados.



Figura 2-1: Demarcación de límites de la mejora.

Ahora bien, en cuanto a elementos de trabajo, se debe mantener la bancada y el bloque de trefilado, que corresponden a los componentes más estructurales del equipo.



Figura 2-2: Bloque de trefilado y bancada.

2.1.2 Benchmarking

Existen varios fabricantes de bancos de trefilado a nivel mundial, pero son de principal importancia el fabricante chino Senbo Machinery y el alemán Bültmann.

Senbo Machinery presenta en su catálogo varios bancos de trefilado en frío hidráulicos, diferenciados principalmente por sus dimensiones. Es de destacar que la tracción hidráulica puede ser desarrollada por un cilindro de grandes o dimensiones, o dos que en conjunto entreguen la misma fuerza.

Por otro lado, desde Bültmann se pueden destacar los distintos tipos de traslado desde y hacia la máquina, y también por ofrecer una solución global al proceso, entregando un equipo completo que entrega un producto terminado al final de la línea.



Figura 2-3: Bancos de trefilado.
 (Fuente: Suzhou Senbo Machinery Co., Ltd, 2018)

En la figura 1-28 se observa un cilindro hidráulico de un banco, dispuesto en la zona trasera del equipo, con la central hidráulica dispuesta separada del banco. En este caso es de cilindro único, pero se pueden disponer dos cilindros en disposición horizontal con menor diámetro. Las mordazas de estos son empujadas por un cilindro neumático.

El fabricante Bültmann ofrece el equipo con todo lo que significa el proceso de conformado de una barra posterior a su extrusión. Lo destacable es el sistema de recepción y de recibimiento lateral (ver figura 1-15) que entrega este proveedor. Su equipo se muestra en las figuras 2-4 y 2-5.



Figura 2-4: Recibidor lateral banco Bültmann.
 (Fuente: Bültmann GmbH, 2023)



Figura 2-5: Recibidor lateral banco Bültmann.
 (Fuente: Bültmann GmbH, 2023)

2.2 Desarrollo de la propuesta

Se desarrollará una propuesta de mejora considerando parte de los equipos que la empresa ha puesto a disposición para el desarrollo de este proyecto. En primer lugar, se ha considerado una fuerza de trabajo de 235.000N, que es la mayor fuerza requerida por los productos de la empresa.

Dicho lo anterior, se han desarrollado dos propuestas de mejora. La primera será descrita por completo en este apartado, y la segunda quedará disponible en el anexo E, ya que la metodología es la misma. La diferencia entre ambas propuestas radica en la longitud de trefilado máximo que permiten, la primera considera un cilindro con una carrera de 7 metros de largo, la segunda uno con una carrera de 15 metros.

Si bien, un cilindro de 7 metros dejaría parte del catálogo de la empresa fuera del proyecto, la empresa ha solicitado que este cilindro se utilice como método de prueba antes de una inversión mayor, por lo tanto, esta propuesta se desarrolla en vista de la adaptabilidad futura.

2.2.1 Desarrollo del Sistema de Tracción

El cilindro hidráulico que se utilizará en este análisis es el dispuesto por la empresa, por lo tanto, se utilizará para el análisis un cilindro de 7 metros de carrera, 8” de diámetro de pistón, y 3.5” de vástago. Se considerará en la evaluación una fuerza de 235kN. La central hidráulica requerida, será elegido según la disponibilidad comercial, priorizando que el motor que impulse la bomba sea de una potencia igual o menor a la que actualmente utiliza el equipo (150HP) con el objetivo de no afectar negativamente al costo operacional.

Entre los requerimientos que debe tener el sistema de tracción se encuentra:

- Tener una velocidad de tiraje de 0.5[m/s]
- El sistema de tracción debe tener un retorno en vacío rápido, de 0.75[m/s].
- Se aprovechará la bancada para sostener el cilindro.

La actualización del sistema de tracción mejorará la calidad del producto al ejercer una fuerza constante de trefilado quitando las marcas producidas por el paso del engrane y la cadena. Adicionalmente la implementación de este sistema de tracción reduciría los tiempos dedicados al mantenimiento, ya que un solo sistema reemplazaría la tracción y el retorno.

Evaluando el cilindro de la empresa, se requiere una presión de 1300[psi] para cubrir la exigencia del producto que requiere mayor fuerza, por lo tanto, el equipo podría dimensionarse a una presión peak de 1500 [psi] (1.04×10^7 [Pa]).

Utilizando los requerimientos de velocidad de avance, el caudal entregado por la bomba deberá tener un rango entre 0.0131 a 0.0243 [m³/s], equivalentes a un rango de entre 786[L/min] y 1460[L/min].

En cuanto a volumen, se necesita 0.227 [m³] equivalentes a 227 litros de aceite únicamente para llenar el cilindro, y se estima, por lo tanto, que la capacidad del tanque está cercana a los 700 litros, capacidad que se expandirá ante la implementación de un cilindro mayor.

La elección de la bomba queda restringida a la factibilidad comercial de su diseño, si se utilizan los datos disponibles en la central hidráulica que posee la empresa, las velocidades de tiraje y retorno

serían de 0.43 [m/s] y 0.35 [m/s] respectivamente. El primer valor sigue siendo ligeramente superior al que actualmente entrega el sistema de piñón y cadena de 0.3[m/s], pero el segundo es menor a los 0.6[m/s] que entrega actualmente el retorno con piola, lo cual significaría 9 segundos extra por cada ciclo de trefilado.

2.2.2 Modificación en bancada

La mejora buscará adecuar este elemento estructural a la nueva configuración. La bancada es el elemento por donde desliza el trolley, mide 17.45 metros de largo de los cuales 9 metros son normalmente utilizados en la producción. En aspectos generales la bancada tiene las siguientes dimensiones y se ve de la siguiente forma:

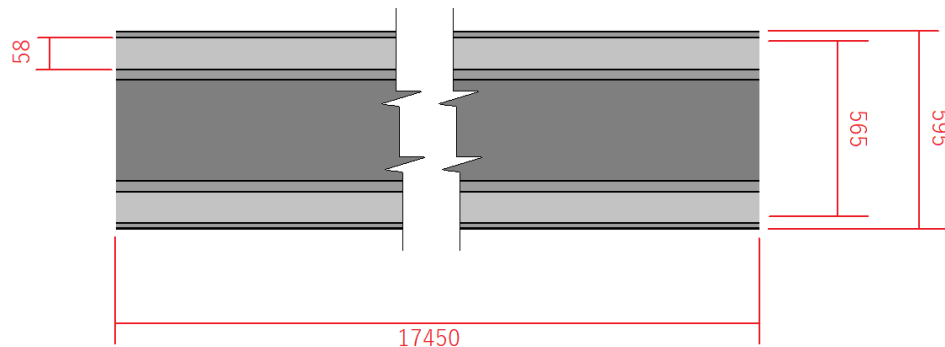


Figura 2-6: Dimensiones de la bancada.
(Vista en planta, dimensiones en mm)

Los cambios que se realizarán en la bancada están asociados al aprovechamiento de su zona central, actualmente utilizada para que la cadena deslice. En esta zona central se incluirán los rodillos de soporte que evitarán que el vástago del cilindro hidráulico tenga una deflexión excesiva.

Utilizando la información entregada por las Tablas Auxiliares presentadas en el Manual de Diseño para estructuras del Instituto Chileno del Acero, es posible aproximar el comportamiento de la deflexión del vástago al de una viga de sección circular empotrada en sus extremos. De esta manera, se puede realizar el siguiente análisis:

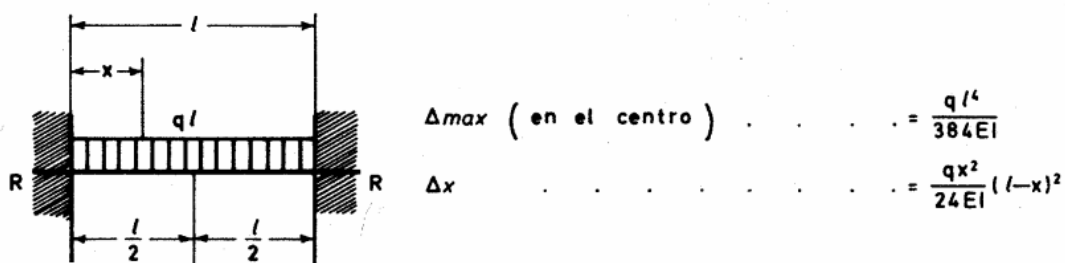


Figura 2-7: Esquema de deflexión de una viga empotrada con carga distribuida uniformemente.
(Fuente: ICHA, 2000, Manual de diseño de estructuras de acero)

En este caso, utilizando un perfil circular, el momento inercial tendrá un valor de:

$$I_{\ominus} = \pi \cdot \frac{D^4}{64} = \pi \cdot \frac{(3.5 \cdot 0.0254)^4}{64} = 3.066 \times 10^{-6} \text{ [m}^4\text{]} \quad (7)$$

Para el Acero 40Cr, normalmente utilizado en la creación de vástagos de grandes dimensiones, se tiene además un valor de E igual a 205 850 [MPa]. El largo total para considerar es de 7 metros, se considera como carga el peso por metro del vástago, el cuál será de 478.0³ [N]. Con estos valores, la deflexión máxima será de 4.7 [mm]. De hecho, si se analiza en una simulación, el valor es algo más conservador entregando 5.4[mm]



Figura 2-8: Deflexión simulada, ajustado 0.5x

Si bien no es imprescindible, para evitar cualquier deflexión no deseada en el vástago producto del comportamiento cíclico del proceso, se instalará un soporte a media carrera, de esta manera, el vástago podrá deslizar teniendo un tercer apoyo. Esto se hará mediante la creación de un brazo de accionamiento neumático el cual se puede apreciar a continuación:



Figura 2-9: Representación de los soportes del vástago.

Basado en el cálculo utilizado para el cilindro de 15 metros, disponible en el Anexo E, se ha decidido mantener el mismo cilindro de 80[mm] de bore, con un recorrido de 200[mm]. El desplazamiento vertical que debe lograr el rodillo del soporte debe ser de 300[mm] para lograr el contacto con la superficie del vástago. Incluyendo este soporte, la deflexión es de 0.3[mm].

³ La densidad del Acero 40Cr es de 7 850[kg/m³], con un diámetro de 3.5”, entrega un valor de 48.73[kg/m], considerando la aceleración de gravedad de 9,81[m/s] se consigue el valor.

Y de igual manera, será necesario realizar un corte en la bancada, que permita que el brazo se repliegue cuando el trolley retorne.

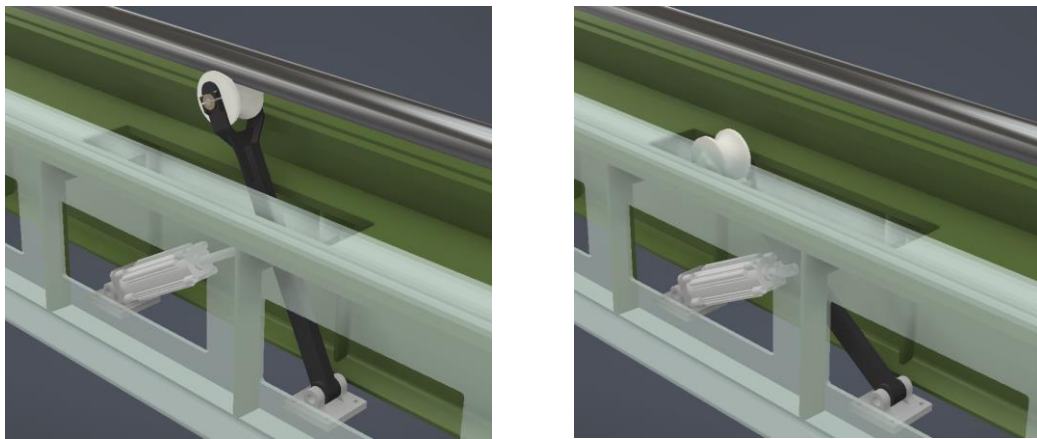


Figura 2-10: Esquema movimiento de los soportes.

En la implementación del nuevo sistema de tracción hidráulico es recomendable realizar este cambio en la bancada. Por lo tanto, esta modificación en la bancada no es directamente una solución a los problemas planteados, pero complementa al sistema de tracción.

Además, se deben realizar perforaciones en el primer segmento de la bancada, que permitan posicionar los descansos del cilindro de tracción.

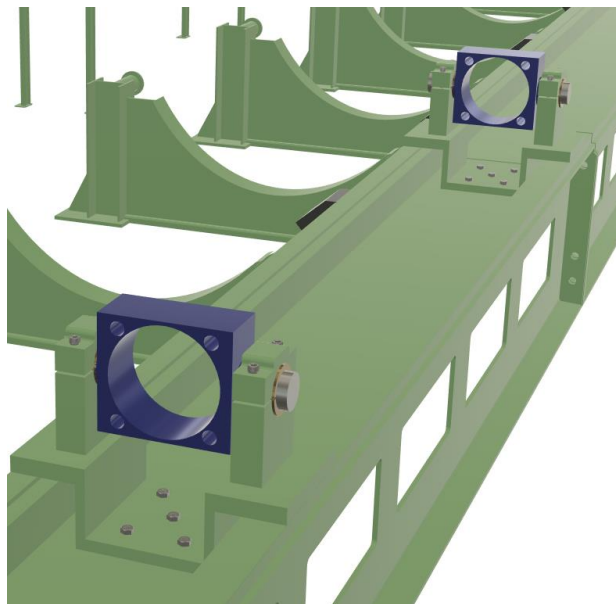


Figura 2-11: Descansos del cilindro

Los descansos están basados en las medidas de los soportes que posee el cilindro que dispuso la empresa para este proyecto. De esta manera, se realizaron descansos del tipo buje únicamente para posicionar el cilindro de forma fija.

Producto al trabajo que realiza el líquido hidráulico al momento de realizar los movimientos del cilindro es posible que existan aumentos de temperatura que puedan afectar a la geometría del cuerpo de tracción. Debido a esto, el extremo delantero del cilindro se ha dejado con un grado de libertad, de manera que tenga movilidad en situaciones que signifiquen expansión del material.

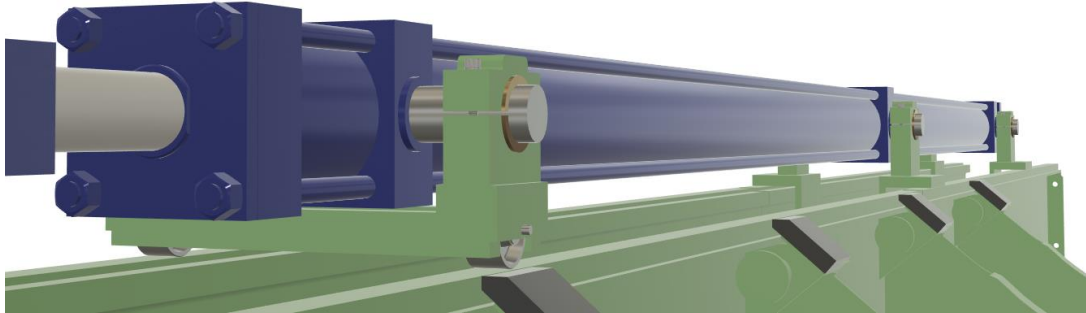


Figura 2-12: Descanso móvil del cilindro de tracción.

2.2.3 Desarrollo mejora en trolley

El trolley es un elemento que también será adaptado a una nueva configuración, ya que se realizará una recuperación y se adaptará al nuevo sistema de tracción. Entre los requerimientos de diseño del trolley se tiene:

- Mantener la estructura base, y su fundamento de funcionamiento.
- Incluir ruedas de deslizamiento horizontales y verticales que cuiden el centro del trolley.
- El sistema de agarre deberá estar alineado con el portacaja del Bloque de Trefilado.
- Deberá tener flexibilidad en su funcionamiento, permitiendo recibir todo tipo de barras o pletinas.

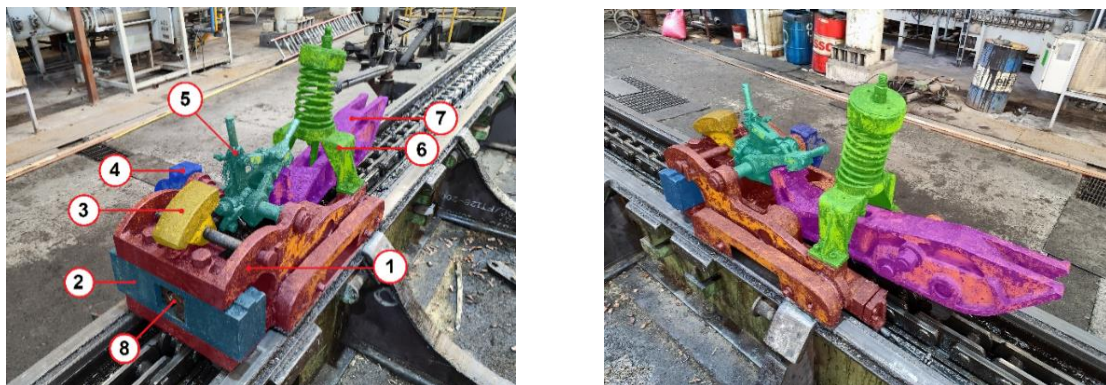


Figura 2-13: Trolley esquematizado con colores.

Las 8 partes fundamentales del trolley son descritas a continuación junto a las modificaciones que se realizarán en cada caso, las cuales en su mayoría son recuperaciones:

- 1) **Carro base (rojo)**: es la base estructural del trolley en la cual se montan los otros componentes, posee cuatro ruedas que lo deslizan por sobre la bancada.

- Se realizarán modificaciones en su parte inferior para incluir ruedas de alineación y mantener siempre el centro del carro.
 - Recuperar ruedas y roscas. Recuperar agujeros mediante bujes de bronce en los elementos con mayor desgaste.
- 2) **Bloque de mordazas (celeste):** en su interior se instalan las mordazas (8) que aprietan y sujetan la barra a trefilar. No sufrirá cambios, ya que su desgaste no es mayor, y no se ha visto influencia en los problemas mencionados en el ítem 1.4.2.
 - 3) **Balancín (amarillo):** desplaza las mordazas hacia delante (aprieta) cuando se le entrega la fuerza al brazo (4), y hacia atrás (suelta) cuando la barra termina la trefilación. Posee tres agujeros, utilizados por el mecanismo de pasadores (5).

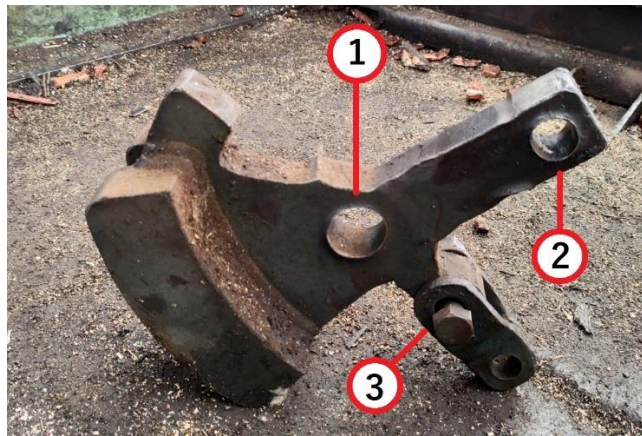


Figura 2-14: Balancín del Trolley con desgaste

- Debido al desgaste se han formado agujeros elípticos, los cuales tienen diferencias de hasta 4[mm] en su agujero de mayor tamaño. Se ha propuesto realizar una recuperación que permita mejorar la eficacia del agarre que entrega esta pieza mediante bujes de desgaste de bronce cuyo diámetro interior mantenga el diámetro actual del pasador respectivo.
- De esta manera, para el balancín se ha optado por recomendar los siguientes tamaños:

Tabla 2-3: Diámetros de los bujes propuestos.

Agujero	Diámetro pasador	Diámetro mayor medido	Buje
1) De giro o pivote	34 [mm]	38 [mm]	D _{int} : 34[mm] D _{ext} : 40 [mm]
2) Enlace con mordaza	34 [mm]	37 [mm]	D _{int} : 34[mm] D _{ext} : 40 [mm]
3) Actuador	20 [mm]	22 [mm]	D _{int} : 20[mm] D _{ext} : 24 [mm]

- Para realizar esta mejora, es necesario cilindrar el interior de los agujeros a un diámetro equivalente al mayor medido, con la finalidad de corregir la elipse presente. Luego, integrar

los bujes de desgaste en cada uno de los agujeros, para de esta manera mejorar la forma en que la fuerza es transmitida hacia las mordazas.

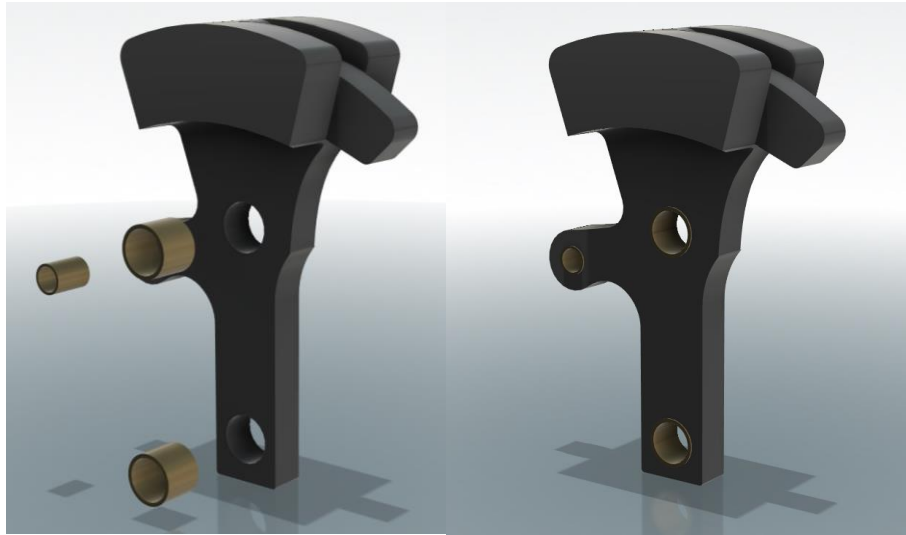


Figura 2-15: Propuesta de recuperación

- Se trabajó con el mínimo diámetro exterior posible, equivalente al de mayor deformación con el objetivo de no sacrificar la resistencia mecánica del balancín.
- 4) **Brazo palanca (azul):** encargado de mover el balancín, es accionado por un cilindro neumático dispuesto al inicio de la bancada. Al realizar el agarre se entrega la señal para que el mecanismo de tracción comience a tirar. No sufrirá cambios.
 - 5) **Mecanismo de pasadores (turquesa):** se encarga de desplazar el balancín, y sostiene el cuerpo de tirado (7) cuando el trolley se desplaza en la operación de retorno (posterior al trefilado), para que no se acople con la cadena.
 - Parte del mecanismo será retirado debido a que no será necesario con el nuevo sistema de tracción.
 - Recuperación y rediseño de elementos necesarios para accionar el balancín.
 - 6) **Resorte de retorno (verde):** Empuja el cuerpo de tirado (7) hacia arriba una vez que se acopla con la cadena.
 - El cuerpo mostrado en verde en la figura 2-11 será reemplazado por una rosca, que permita ajustar el cuerpo de tirado para que este quede completamente alineado con el cilindro de tracción. De esta manera, se ha elegido un hilo de paso pequeño (1.5mm) que contribuya a realizar movimientos verticales con mayor precisión. El ajuste se realizará con un volante, el cual se bloqueará mediante una contratuerca.

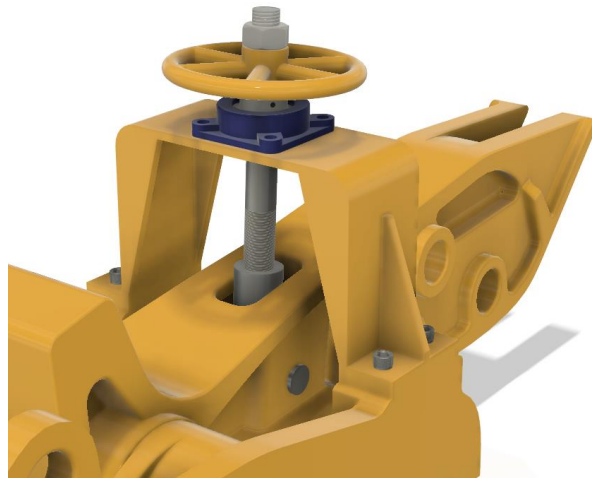


Figura 2-16: Cuerpo de tirado y eslabón de enlace.

- Esta mejora es necesaria para que la comunicación Trolley/Cilindro quede correctamente alineada, y de esta forma, contribuir a la vida útil del cilindro hidráulico de tracción.
 - Se utiliza un descanso que permita un movimiento en el eje axial y en un eje longitudinal, de esta manera puede adecuarse a la inclinación del cuerpo de tirado.
- 7) **Cuerpo de Tirado (fucsia):** pieza que se acopla con la cadena y tira el trolley, es la comunicación entre el trolley y el sistema de tracción. Este cuerpo se adaptará a la nueva configuración, pero mantendrá su función de comunicador.

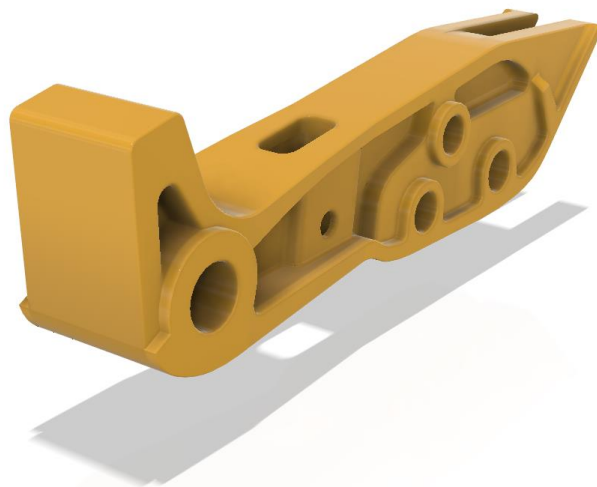


Figura 2-17: Cuerpo de tirado del Trolley.

- Se realizará un nuevo elemento que permita unir el cuerpo de tirado al nuevo sistema de tracción (Cilindro Hidráulico)

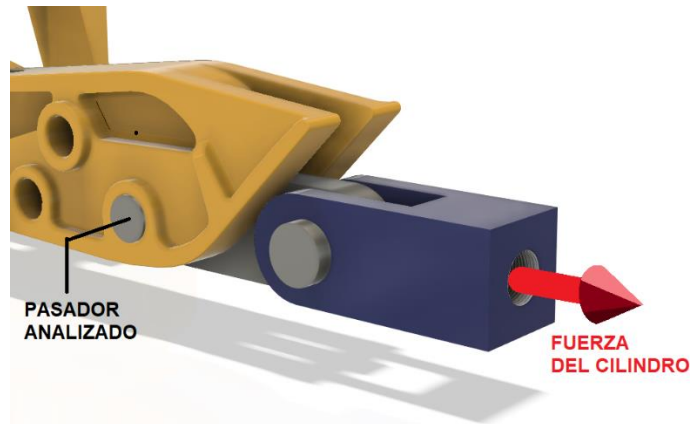


Figura 2-18: Cuerpo de tirado y eslabón de enlace.

- Esta modificación requiere comprobar que el material y la geometría del pasador cumplan con el requerimiento de fuerza, para ello se ha realizado el siguiente análisis:
- Los pasadores son de diferentes diámetros y se analizará el de menor diámetro que corresponde al pasador original del carro de trefilado, y por el cual se entrega la fuerza de trefilado al Trolley desde el sistema de tracción por cadena. Este pasador tiene un diámetro de 60[mm], y su material es acero de características desconocidas, por lo tanto, se utilizará como base para cálculo las propiedades mecánicas de un acero con 0.45% de carbono (SAE1045).

Tabla 2-4: propiedades Acero AISI 1045 180HB
(Fuente: MatWeb.com, 2023, AISI 1045 Steel, as cold drawn)

Propiedad	Denominación	Valor
E	Módulo de Young	206 000[MPa]
Sy	Límite de fluencia	515 [Mpa]
Rm	Tensión de rotura	585 [MPa]

- Para el cálculo se realizan la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{\pi r^2} \quad (8)$$

Ya que el esfuerzo sobre el pasador es cortante puro, y completamente horizontal se considerará la fuerza máxima que entregará el cilindro mayor, equivalentes a 235.000[N]. El diseño del pasador está basado en las dimensiones preexistentes en el cuerpo de tirado, por lo tanto, se considerará el diámetro de 60[mm] del pasador actual.

La configuración utilizada para realizar el cálculo del esfuerzo y del factor de seguridad responde a lo siguiente:

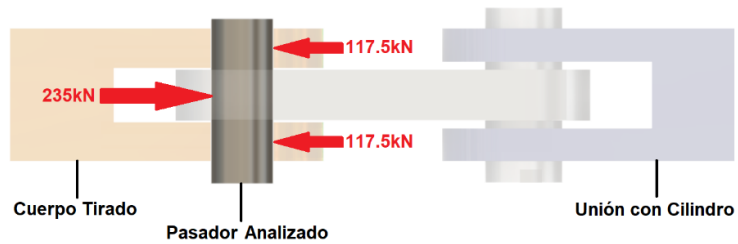


Figura 2-19: Fuerzas sobre el pasador.
(Vista superior)

La configuración de fuerzas sobre el pasador entregará un esfuerzo de corte puro sobre este elemento. Bajo estas condiciones, el valor del esfuerzo de corte alcanzado es de 118.5[MPa]. Evaluando el factor de seguridad bajo la ecuación:

$$n = \frac{S_y}{2 \cdot \tau} \quad (9)$$

Entrega un valor de 2.17, ligeramente superior al factor de seguridad esperado de 2.00, asegurando que el pasador utilizado actualmente por la máquina es capaz de soportar la carga. Al analizar el caso en una simulación los esfuerzos sobre el pasador se ven de la siguiente manera:

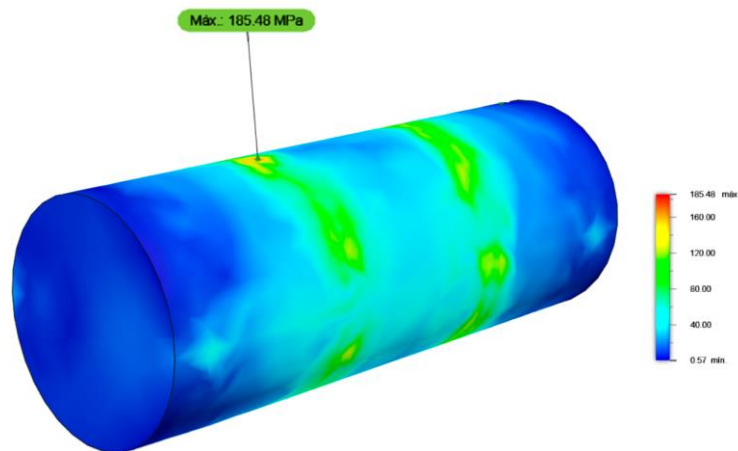


Figura 2-20: Simulación del pasador de menor tamaño.

Se aprecia claramente que el esfuerzo máximo encontrado por la simulación es de carácter puntual, y que gran parte de los esfuerzos concentrados en el pasador están en el orden de los 120 [MPa]. Esta simulación entrega un factor de seguridad de 2.77, reafirmando lo calculado.

Por último, se presenta una tabla resumen que compara lo obtenido y lo simulado.

Tabla 2-5: Resumen de resultados

Propiedad	Calculado	Simulado
Esfuerzo máximo al corte.	118.5 [MPa]	185.5 [MPa]
Factor de Seguridad	2.17	2.77
Diferencia	22%	

Por otro lado, se propone realizar un eslabón para comunicar el cuerpo de tirado con el sistema de tracción, por lo tanto, es necesario determinar los esfuerzos que este elemento deberá resistir para recomendar un material para su fabricación.

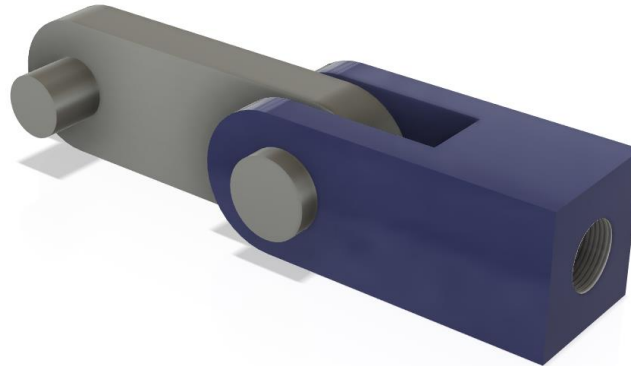


Figura 2-21: Eslabón de enlace.

Este elemento posee la siguiente geometría propuesta:

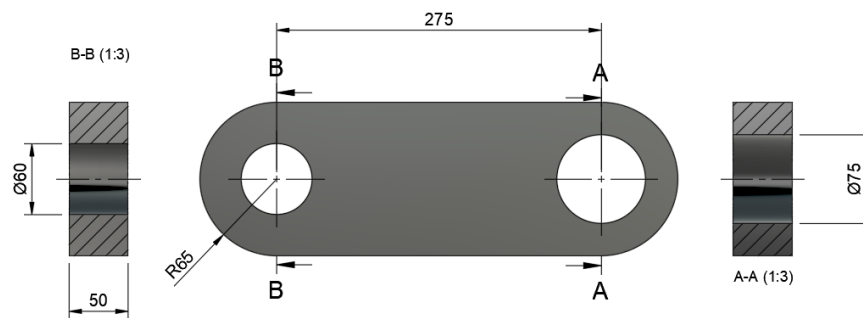


Figura 2-22: Geometría del eslabón de enlace.

Se ha generado una simulación utilizando el eslabón propuesto, en este caso, el eslabón tendrá un esfuerzo de tracción producido por la fuerza que recibe desde el cilindro de tracción, y la reacción estática del cuerpo de tirado. Bajo este análisis, el eslabón recibe un esfuerzo de 117.1 [MPa] en la zona que comunica con el pasador de menor diámetro, de todas formas, este esfuerzo es de carácter puntual por lo que su relevancia no es mayor. La simulación propuesta se muestra a continuación:

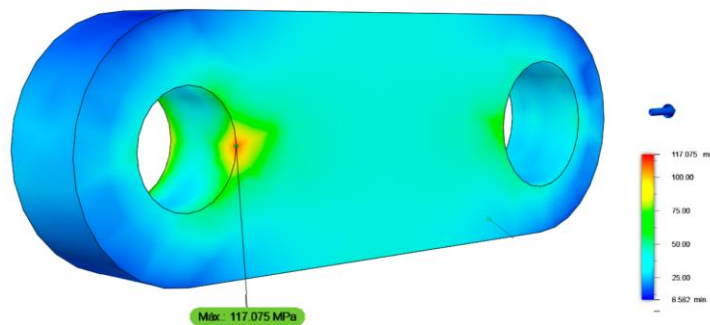


Figura 2-23: Simulación del eslabón comunicador.

8) **Mordazas:** poseen distintas formas y dimensiones, son elementos con una cara diagonal y otra recta que al deslizar se encuentran en el centro. Esquemáticamente en el interior del bloque se verán así:

- Se propone recuperar los agujeros de las mordazas disponibles en la empresa.

Estas mejoras en el trolley, resuelve problemas asociados a tiempos perdidos debido a los intentos de agarre fallidos, además, complementa la integración del nuevo sistema de tracción.

2.2.4 Desarrollo diseño botadores.

Debido a la extensión de la bancada se requiere de al menos 4 botadores que empujen las barras hacia el receptor. Se ha optado por rediseñar la solución ya existente en la empresa, de manera que su funcionamiento ahora sea óptimo. El sistema actual presente en la empresa es un botador de brazo, el cuál puede girar para soportar la caída de la barra, y replegarse cuando el carro retorne a su posición. Este botador cuenta con dos cilindros neumáticos, y una base que lo sujeta al piso y a la bancada.

Para diseñar los botadores se necesita que:

- La altura del botador sea mayor al de la bancada, pero debe sostener cualquier producto que se realice.
- El largo del botador debe cruzar la bancada completamente.
- Se utilizarán 2 botadores de empuje y 2 para sostener.

Los empujadores deberán entregar una fuerza suficiente para deslizar la barra por sobre el sostenedor de goma, para ello se realiza un cálculo simple que considere el coeficiente de roce estático del cobre contra la goma.

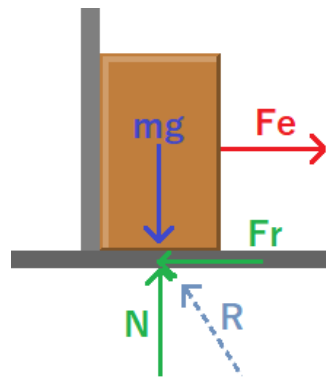


Figura 2-24: Fuerzas en el movimiento de una barra

El diagrama de cuerpo libre es simple, F_e corresponde a la fuerza de empuje generada por el deslizador de empuje, R es la reacción proveniente del soporte inferior (con componentes N y Fr), y mg el valor del peso de una barra.

Desde la literatura, se ha obtenido que el coeficiente de roce entre cobre y caucho (revestimiento del brazo inferior) es del rango 0.7 – 0.9, con ello:

$$Fr = 0.9N \quad (10)$$

$$N = m \cdot g \quad (10)$$

$$m \cdot g = \left(8,9 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 6\,504 [cm^3] \right) \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 57\,885 [g] = 579 [N] \quad (11)$$

$$F_e = F_r = 521 [N] \quad (12)$$

Con ello, son necesarios 521 [N] para deslizar una barra por sobre un brazo.

Para el giro de los sostenedores, se utilizará un brazo rotatorio, una base anclada al piso, y un cilindro neumático que entregue la fuerza para girar el sostenedor. Este cilindro neumático es de 160[mm] y posee un bore de 40[mm]

Por otro lado, el cilindro mayor que empuja el deslizador tendrá 650[mm] de carrera, con un bore de 50[mm], asegurando que la presión sea de 3[bar], deslizarán sin problemas la barra hacia el receptor.

Con estas consideraciones, la propuesta se verá de la siguiente manera:

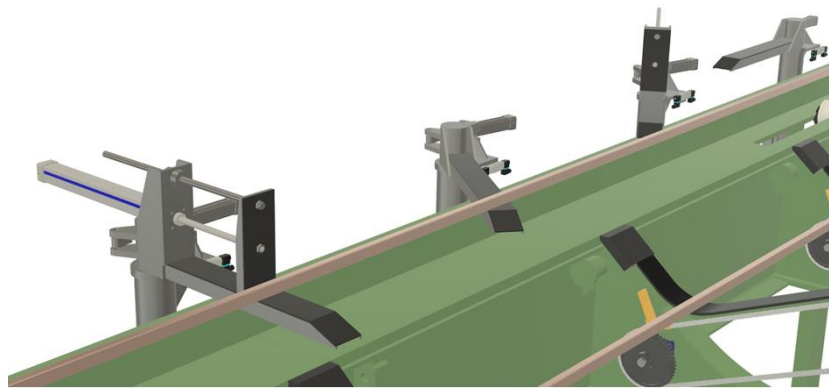


Figura 2-25: Adaptación conceptual.

Los botadores cuentan con 7 partes, y los sostenedores tan sólo con 4. Ambos mecanismos se ven representados en la imagen que se muestra a continuación:

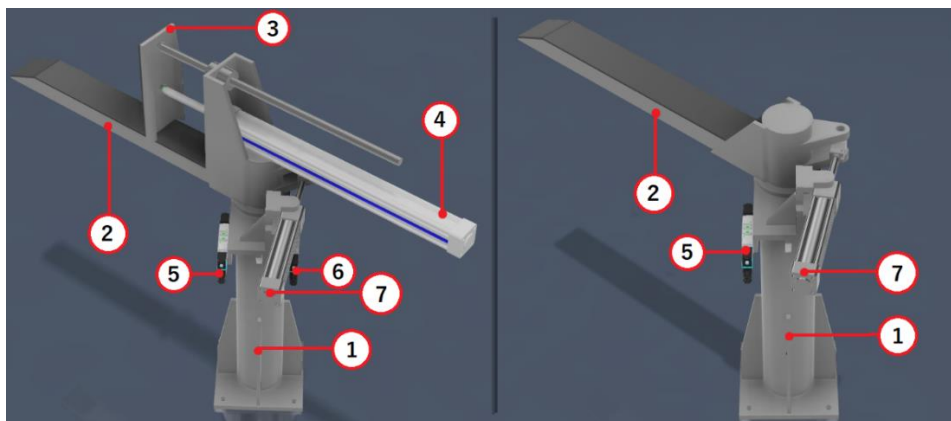


Figura 2-26: Botadores

- Base de anclaje
 1) Brazo de giro
 2) Deslizador

- 3) Cilindro de empuje
- 4) Válvula de Giro
- 5) Válvula de Empuje
- 6) Cilindro de Giro.

Esta modificación resuelve problemas de calidad y de traslados, ya que permite que el producto tenga un soporte correcto al momento de caer, y permite alimentar directamente el receptor lateral sin la necesidad de operarios realizando la acción de forma manual.

2.2.5 Desarrollo receptor lateral.

El principal objetivo de los receptores es reemplazar uno de los usos del puente mecánico por un mecanismo automatizado. Se dispone del siguiente espacio de trabajo:



Figura 2-27: Receptor lateral actual.

Espacio que se encuentra justo al lado de la bancada, con una extensión de 15 metros de largo, con un ancho cercano a 2.4 metros, lo cual queda graficado en la figura 2-23.

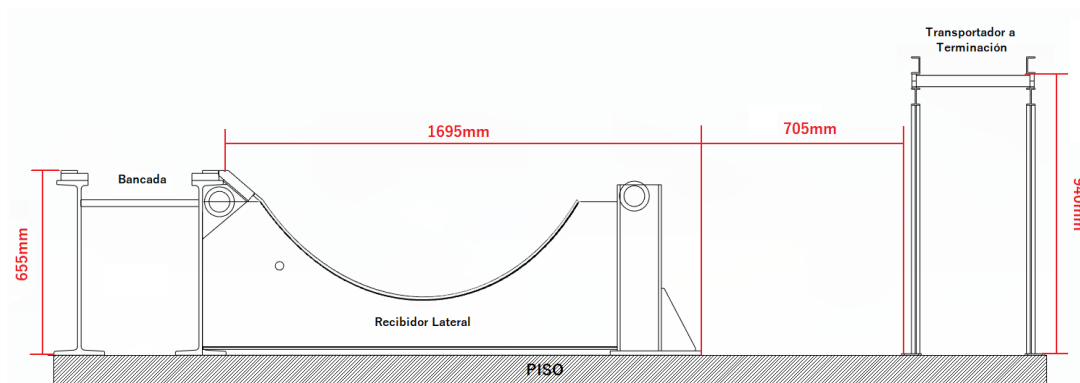


Figura 2-28: Vista frontal del equipo y dimensiones.

La mejora consistirá en crear un sistema de traslado basado en un solución ya implementada dentro de la empresa, la cual utiliza cadenas como método de tracción y un único motor eléctrico. Cómo base de diseño se considera lo siguiente:

- Se necesitan 720N de fuerza para trasladar una barra a través de una superficie engomada.
- Se tiene una distancia de arrastre de 2 metros, inclinada 23.5°.
- Distancias entre ruedas de 2150[mm] y 630[mm] en primera aproximación.

Por otro lado, para generar la propuesta se tomarán consideraciones mecánicas:

- Se utilizará para la propuesta un motor de 0.5[HP] a 100 [rpm] (primera aproximación).
- La elección de cadena, cantidad de torones, diámetros de catarinas, y largo final entre ruedas se basarán en una rueda motriz de 17 dientes, y una relación de transmisión de 1:3. Por otro lado, la cadena de arrastre tendrá dos catarinas de 51 dientes (idéntica a la de transmisión).

Conceptualmente la mejora se ve de la siguiente manera, en azul la sección motriz, y en rojo la sección de arrastre.

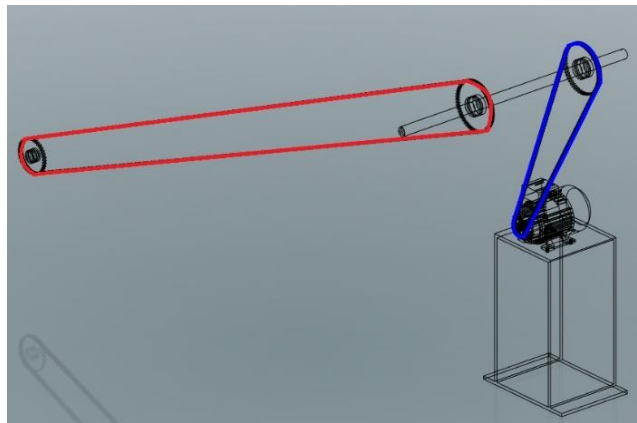


Figura 2-29: En azul la cadena motora, y en rojo la cadena de traslado.

Para el desarrollo de la mejora se utilizarán las siguientes ecuaciones, separando dos tipos de secciones, además, se adjunta en el Anexo D las tablas de valores a las cuales se hará referencia más adelante.

$$\frac{L}{p} \doteq \frac{2C}{p} + \frac{N1 + N2}{2} + \frac{(N2 - N1)^2}{4\pi^2 C} \quad (12)$$

$$A = \frac{N1 + N2}{2} - \frac{L}{p} \quad (13)$$

$$C = \frac{p}{4} \left[-A + \sqrt{A^2 - \frac{8 \cdot (N2 - N1)^2}{(2\pi)^2}} \right] \quad (14)$$

$$H_{tab} = \frac{n_d \cdot K_s \cdot H_{nom}}{K_1 \cdot K_2} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
K_2 &= 1, 1.7, 2.5 \text{ (1, 2, o 3 torones)} \\
N_d &= 1.5 \\
K_s &= 1.3 \\
H_{\text{nom.}} &= 0.5 \text{ [HP]} \\
C_{\text{motriz}} &= 630 \text{ [mm]} & C_{\text{arrastre}} &= 2150 \text{ [mm]}
\end{aligned}$$

En el caso de la cadena motriz, se evalúa la potencia tabulada mediante la ecuación 9, entregado un valor de 0.574 [HP]. Según la tabla D-2 del Anexo, una cadena torón simple debería ser del tipo ANSI 60, mientras que una de doble o triple torón deberían ser del tipo ANSI 40. Utilizando la aplicación en la que se basa esta mejora, se elegirá una cadena de doble torón del tipo ANSI 40.

Su largo en “número de pasos” estará determinado por la ecuación (6) y los datos de la tabla D-1, resultando 134 pasos. La distancia corregida entre ruedas, utilizando este número de pasos, la ecuación (7) y la ecuación (8) resulta en 631.2[mm].

Se considerará el mismo tipo de cadena ANSI 40 para el sistema de arrastre, pero en este caso su largo será de 390 pasos. Por otro lado, la distancia ajustada entre ruedas será de 2152 [mm].

Esta cantidad de pasos cumple con la recomendación entregada por Budynas R. & Nisbett JK. (2008), la cual indica que “*Resulta preferible tener un número impar de dientes en la catarina (17, 19, ...) y un número par de pasos en la cadena para evitar un eslabón especial*”.

Finalmente, para determinar el diámetro de cada una de las ruedas, se utilizará la siguiente ecuación, en dónde p es el paso, y N el número de dientes de la catenaria:

$$D = \frac{p}{\sin\left(\frac{180}{N}\right)} \quad (16)$$

Así, para cada una de las ruedas dentadas se obtienen los siguientes diámetros primitivos:

Tabla 2-6: Diámetro primitivo de las catarinas a utilizar.

Rueda	Diámetro Primitivo
Motriz (17 dientes)	69.116 [mm]
Movida (51 dientes)	206.299 [mm]

Con lo anterior la propuesta de mejora en el apartado de recibidores cuenta con:

- 1) Conjunto Motriz
- 2) Conjunto de arrastre
- 3) Deslizadores

En total, a lo largo de la bancada útil de 7 metros, se utilizarán 4 deslizadores y 4 conjuntos de arrastre, siendo alimentados únicamente por un conjunto motriz en la zona central. Esto reducirá el uso del puente mecánico, y por lo tanto el **tiempo** que se demora en el proceso de trefilado.

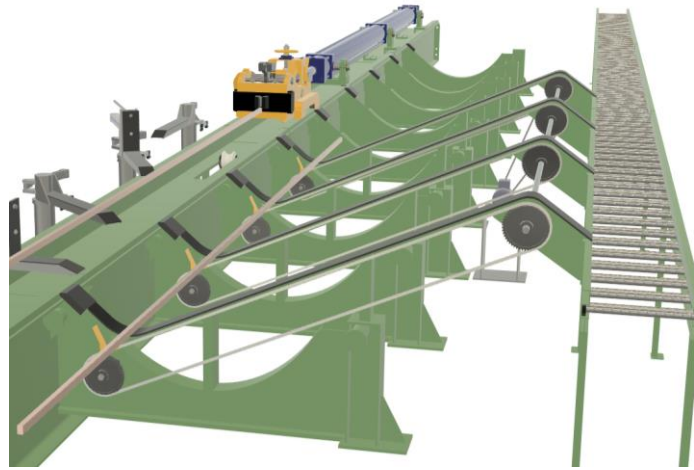


Figura 2-30: Vista del recibidor lateral.

2.2.4 Desarrollo mejora en Bloque de Trefilado

Si bien se mantendrá la estructura general del bloque de trefilado, se realizarán mejoras en su funcionamiento, integrando los sistemas que tuvo el equipo originalmente.

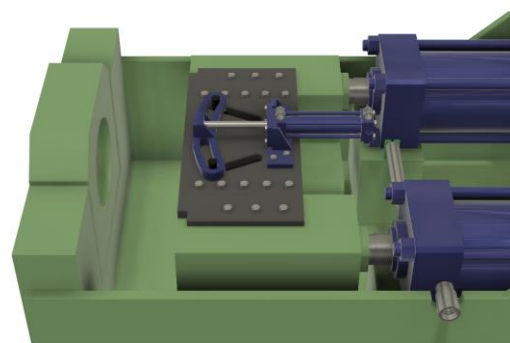
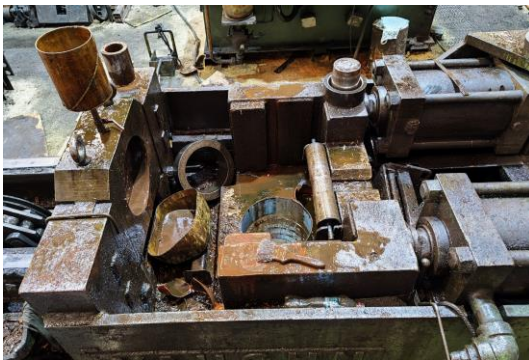


Figura 2-31: Bloque de Trefilado y su propuesta de mejora.

Requerimientos:

- Volver a hacer funcionar los cilindros de posicionamiento, para que la máquina tenga mejor sujeción al tirar. Esto implica disponer de un carro móvil en el bloque que contenga un cilindro neumático que sujete la barra al posicionar (Mordazas Schumag: explicar).
- Entregar soporte para reducir las flexiones y con ello marcas superficiales.
- Se asume que los cilindros solo requieren de mantenimiento.
- Incluir algún tipo de amortiguación para reducir el impacto del trolley con el bloque.

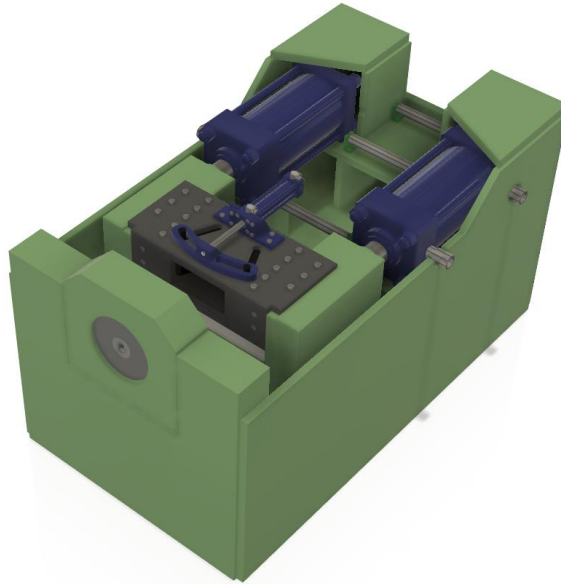


Figura 2-32: Bloque de Trefilado modificado.

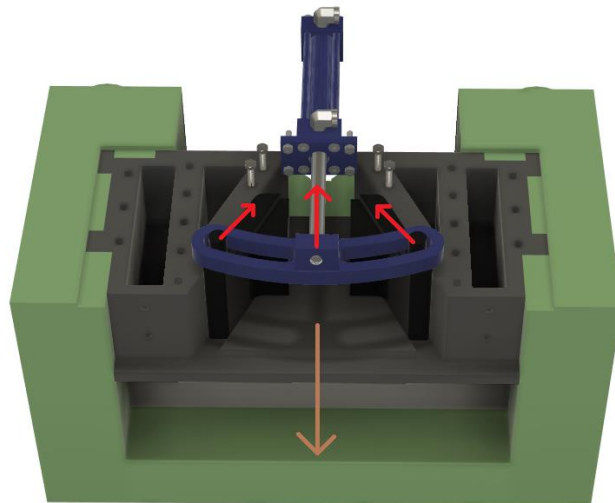


Figura 2-33: Sistema de apriete con mordazas.

Se diseñó un bloque de mordazas que permitan afirmar la barra para realizar el primer trefilado y asomar la punta de una manera mucho más simple. Este sistema se basa en el que utilizan otros equipos de la planta, tanto en su accionamiento hidráulico, como en el método cónico de apriete que está dispuesto de forma opuesta al sentido del trefilado, de esta manera el apriete aumenta gracias al roce que genera la barra con las mordazas.

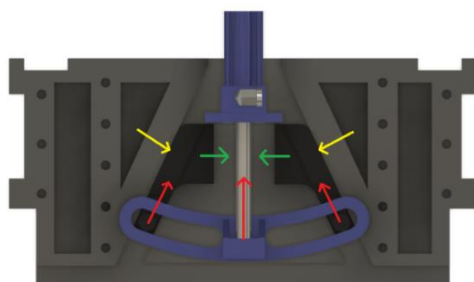


Figura 2-34: Esquema de funcionamiento del bloque de mordazas.

2.2.5 Costo aproximado de la mejora

A continuación, se presenta una tabla resumen de los costos asociados a la implementación de la mejora en el banco de trefilado. La descripción completa de la lista de materiales y componentes se encuentra en el [Anexo F](#). Estos valores son aproximados en base al mercado y no son resultado de cotizaciones formales.

Por otro lado, esta propuesta considera los costos asociados a la cobertura de la demanda durante las detenciones del equipo, lo que se traduce en horas extras utilizadas para la generación de stock.

Tabla 2-7: Costo preliminar de la mejora

ítem	Costo
Mejora Bancada	\$1 368 710
Mejora Trolley	\$1 666 000
Mejora Bloque de Trefilado	\$7 638 000
Mejora Botadores	\$2 421 000
Mejora Recibidor Lateral	\$3 565 000
Costo Total Ajustado	\$24 988 065

Para el total ajustado se ha considerado un factor de 1.5 sobre la suma total, que busca sobreestimar el costo y cubrir posibles fluctuaciones en los valores estimados. Con esto, el valor de la mejora alcanza casi \$25 000 000 de pesos chilenos sin considerar la unidad hidráulica del cilindro mayor.

Al ser la Unidad Hidráulica un elemento que se debe fabricar según requerimientos resulta complejo estimar su costo. Una bomba OilGear D-23030 reacondicionada que entrega hasta 3000 [psi] y 627 [L/min] tiene un valor de \$45 000 000, por lo tanto, se estimará que un Power Pack que cumpla con los requisitos mostrados en el ítem 2.2.1 podría tener 4 veces el valor mencionado. Esto significa que en total la mejora tendría un valor aproximado de **\$205 000 000** de pesos chilenos, aún sin considerar el costo de implementación el cual se describe a continuación.

Para calcular el costo derivado de las detenciones del equipo hay que entregar un contexto previo asociado al ritmo productivo de la empresa. En un mes promedio se producen 80 toneladas de cobre ETP distribuidos en diferentes formas de barras. Esta producción es alcanzada siguiendo una programación del horno que es escalonada por semanas. Por lo tanto, en un mes se tiene entre 12 a 14 días efectivos de producción de barras. Esto significa que diariamente se producen cerca de 100 extrusiones⁴ diarias. Estas extrusiones se realizan en dos turnos en la prensa, 8:00 a 18:00 y 20:00 a 06:00, mientras que el horno produce 24/7.

⁴ La extrusión es el proceso realizado en la prensa, previo al trefilado, que entrega una barra de aproximadamente 7 metros de largo, cuyo peso es de 60kg cada una.

Evaluando un sueldo de \$550.000, sin considerar los bonos por meta en una jornada de 45 horas semanales, cada hora extra de trabajo debería ser pagada a un costo de \$4600 pesos, y según indica la ley, se establece un máximo de 2 horas extra por jornada.

Por último, las barras significan un ingreso cercano a \$1.000.000.000 de pesos mensuales para el cliente, representando casi el 60% de los ingresos de esta empresa en el año 2022.

En el ítem 2.2.6 se muestra la propuesta de implementación en particular, la cual será utilizada en el cálculo de stock mostrado a continuación:

Tabla 2-8: Costo preliminar de la implementación.

Periodo	Duración	Producción estimada (Extrusiones de 7 metros)	Stock Acumulado.	Costo
Etapas de preparación.	1 mes: 12 días productivos.	1380	180	\$165.600 + \$776.250 ⁵
Etapas 1	Semana sin producción de Billets			
Post etapas 1	1 semana, 5 días productivos	575	255	\$69.000 + \$323.438
Etapas 2	1 semana, 5 días productivos	575	330	\$69.000 + \$323.438
Etapas 3	Semana sin producción de Billets			
Post etapas 3	1 semana, 5 días productivos	650	480	\$69.000 + \$323.438
Etapas 4	Semana sin producción de Billets			
Post etapas 4	2 meses, 35 días productivos.	4550	1530	\$322.000 + \$2.264.063
Etapas 5	1 mes: 12 días productivos.	-1500	30	-
Costo preliminar de la implementación				\$4.705.227

El stock de barras debe almacenarse dentro de las instalaciones de la empresa. Un paquete de 30 barras ocupará cerca de 60[cm]x25[cm]x7000[cm], se pueden apilar hasta 5 paquetes verticalmente, necesitando una superficie de 42[m²] para almacenar las 1530 barras reservadas en el stock. Esta producción extra permite ahorrar \$315.360.000 de pesos chilenos que sería provocada por la pérdida de pedidos.

Por lo tanto, el capital aproximado que la empresa deberá invertir en la mejora de su banco de trefilado será cercano a los 250 millones de pesos chilenos. Comparando este valor con el mercado, un banco reacondicionado de tecnología piñón/cadena, con las mismas características de fuerza y tiene un costo cercano a \$130.000.000 pesos chilenos en el mercado internacional, sin considerar el envío asociado.

Esta propuesta de mejora, como se dijo anteriormente, mejora la capacidad productiva de la empresa, ya que, en un mismo tiempo podría producirse hasta un 30% más, aumentando la capacidad diaria de 100 barras a 130 barras sin la necesidad de incluir horas extraordinarias a la jornada, esto significaría un aumento en las ventas de hasta \$270.000.000 al mes.

⁵ Se ha utilizado una tarifa de cliente libre equivalente a \$375, se ha considerado 1.5[h] de funcionamiento del equipo con potencia de 115kW.

2.2.6 Propuesta de Implementación

Se ha desarrollado un esbozo de planificación, que busca priorizar el tiempo de producción. De esta manera se han creado etapas de implementación las cuales están interrumpidas por semanas productivas con el objetivo de formar stock y responder a la programación de la empresa.

La empresa trabaja en base a contratos, y con programaciones semestrales de trabajos en hornos, produciendo normalmente una semana Billets de tubos y en otras, billets de barras. Fuera de eso, los meses de enero, febrero y marzo tienden a ser periodos de vacaciones en los cuales se ve reducida la fuerza laboral dentro de la planta. Debido a que se necesita disponibilidad de gente en los trabajos que se describirán a continuación, la programación será pensada desde el mes de abril en adelante.

En resumen, se han formulado 4 etapas de detención de equipo y una etapa de trabajos en paralelo que adelantaría actividades sin detener el equipo. Posterior a eso, se ha programado una etapa de pruebas y correcciones, para finalmente dar paso al análisis e implementación de las recomendaciones.

De esta manera, previo a la primera etapa resulta necesario adquirir los elementos necesarios para desarrollar la mejora. Por lo tanto, durante los meses previos se deben realizar las órdenes de compra de elementos comerciales, y las órdenes de fabricación de los elementos no comerciales.

Esta planificación está creada buscando corregir problemas pequeños que tengan una gran relevancia, para luego implementar las mejoras más significativas, ya que de esta manera con acciones pequeñas de corrección podría reducirse hasta en 25 segundos el tiempo dedicado en trefilar una barra que en promedio ronda los 60 segundos debido a la falta de eficacia en el agarre. A continuación, se presenta a grandes rasgos la planificación propuesta.

Tabla 2-9: Esbozo de planificación

Etapa 1	Con detención	<ul style="list-style-type: none"> - Modificación Trolley. - Retiro de elementos eléctricos sin uso. - Acciones leves sobre Bloque de trefilado y bancada. 	Min: 1 semana producción		
	Etapa 2	Sin detención	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño de nuevo panel de instrumentos. - Mantenimiento cilindros Bloque de Trefilado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensamble de deslizadores (Recibidor Lateral) - Ensamble Botadores/Sostenedores 	
			Etapa 3	Con detención	<ul style="list-style-type: none"> - Modificación Bloque de trefilado. - Conexión eléctrica provisoria a panel de instrumentos.

Etapa 2			
Etapa 3	Min: 1 semana productiva		
Etapa 4	Con detención	- Instalación de botadores y sostenedores	8 semanas productivas
		- Instalación eléctrica de botadores y sostenedores. (Sin conectar)	
		- Montaje de recibidores laterales	
		- Habilitación eléctrica provisoria de los recibidores.	
Etapa 5	Parada de equipo	- Desmontar actual sistema de tracción.	
		- Montar nuevo sistema de tracción	
		- Modificar Trolley	
		- Realizar conexiones de automatización definitivas (quitar provisionarias)	
		- Conectar y habilitar el nuevo PLC.	

Dicho esto, a continuación, se describirá en detalle los trabajos propuestos en la planificación.

Etapa de Preparación.

Ya se mencionó que es una etapa de preparación, con el objetivo de adquirir la mayor cantidad de elementos que permitan desarrollar las mejoras. En este punto resulta primordial realizar las órdenes de trabajo de corte y armado.

- Botadores: corte de tubos, placas y su unión
- Deslizadores (recibidor lateral): corte de placas, flexión de placas y su unión.
- Base del motor (recibidor lateral): corte de plazas y ensamble.

La maestría prevista a realizar estos trabajos está dentro del mismo holding e incluso dentro de la misma propiedad física, de esta manera, podría coordinarse de mejor manera el desarrollo de estos trabajos. Se estima un periodo de entre uno y dos meses para que estos trabajos sean terminados.

Las órdenes de compra son normalmente mucho más rápidas en su resolución, por lo tanto, pueden realizarse a lo largo de la espera de los productos no comerciales.

Por último, dentro de esta misma etapa se debe instruir al equipo eléctrico de diseñar un programa PLC basado en el original de la máquina y en las nuevas instrucciones desarrolladas en este documento. El equipo debería entregar una propuesta de conexiones y de elementos necesarios para que la automatización sea lo más completa posible.

A) Trabajos etapa 1; Con detención de equipo.

La etapa 1 está prescindida por la modificación al trolley que significa:

- Desarmar completamente el Trolley
- Retirar el Trolley de la bancada y llevarlo a zona de máquinas.

Mientras el trolley se encuentra siendo modificado y reparado por la maestranza interna de la empresa, el equipo mecánico deberá:

- Retirar cilindros del bloque de trefilado.
- Realizar orificios en la bancada, para la instalación del cilindro de tracción.
- Cambiar el cilindro neumático de agarre.

Una vez terminada la recuperación del trolley por parte del equipo de maestranza, se procederá a ensamblar el trolley nuevamente, de manera que se mejore su eficacia de agarre, sin modificar aún parte de los elementos que lo unirán al futuro sistema de tracción.

Al ser un trabajo que involucre la detención del equipo, los encargados de máquina deberán contribuir a la limpieza del equipo y sus alrededores, facilitando de esta manera el trabajo del equipo eléctrico que en todo este periodo buscará retirar cables y elementos que no estén en funcionamiento.

B) Trabajos etapa 2; Sin detención de equipo

La etapa de trabajos número 2 es una etapa paralela. Comienza cuando la etapa 1 se encuentra avanzada, con el trolley siendo trabajado por la maestranza de la empresa. Esta etapa es dependiente directo de la Ante Etapa, ya que para su correcto desarrollo requiere que las órdenes de fabricación y compra estén terminadas, por lo tanto, está condicionado su comienzo.

Los trabajos de esta etapa están separados en tres:

- Mantenimiento de cilindros del bloque de trefilado: cambio de sellos y prueba de funcionamiento. Ensamble del bloque de empuje: instalación cilindro hidráulico, mordazas de agarre, y cuerpo de empuje.
- Ensamble de los Botadores/Sostenedores: Unir soporte base con los brazos respectivos; ensamblar cilindros neumáticos; conectar mangueras; unir guías de deslizamiento. Esto dejará 2 Sostenedores y 2 Botadores listos para ensamblar en el banco de trefilado.
- Ensamble de los deslizadores del recibidor lateral: ubicar rodamientos, ejes, cadenas, catarinas y los eslabones especiales. Esto dejaría 4 cuerpos listos para montar en el banco de trefilado.

Eso por el lado del área mecánica de mantenimiento, dentro del área eléctrica se debe comenzar a

planificar el diseño de un nuevo panel de instrumentos para controlar el equipo. Este deberá mantener dentro de lo posible la distribución actual que posee el banco de trefilado, con el objetivo de cuidar la operabilidad del equipo y evitar capacitaciones extras.

C) Trabajos etapa 3; Con detención de equipo

Es una de las mejoras más importantes para mejorar la eficacia de agarre y con ello, la reducción de hasta 25 segundos en el proceso de trefilado de una barra. Es el complemento para la mejora del Trolley. Para realizar esta etapa el bloque de empuje, los cilindros, las mangueras y la central hidráulica deben estar listos para su montaje.

- Montaje de cilindros hidráulicos de empuje.
- Montaje de bloque de empuje
- Comunicación cilindros/central hidráulica.

Eso en el área mecánica, para el área eléctrica se requiere:

- Conexión de la central hidráulica
- Comunicación provisoria con el panel de instrumentos

Si bien la lista de trabajos a realizar es reducida, son trabajos que requieren al menos una semana laboral, por lo tanto, una vez realizadas estas labores se debe considerar una semana productiva, que, con estas mejoras, debería mejorar la productividad.

D) Trabajos etapa 4; Con detención de equipo

Los trabajos desarrollados en la segunda parte de la etapa dos deberían estar completos para desarrollar esta etapa. Tanto botadores como el recibidor lateral deben estar completamente ensamblados y listos para su montaje en la máquina.

- Realizar orificios para montar los soportes de los botadores.
- Ubicar Botadores.
- Realizar las conexiones neumáticas aún sin habilitación.

En cuanto al área eléctrica, se deben realizar trabajos de montaje, pero sin habilitación:

- Conectar cables de señales, finales de carrera, pero sin conexiones a PLC.

El objetivo es que, en el momento de la detención total del equipo, todo esté listo para conectar al nuevo PLC. Esto permite no interrumpir el funcionamiento actual del banco, de esta manera no influir de sobre manera en la producción.

Una vez realizado el montaje de los botadores, se debe realizar el montaje del recibidor lateral. Son cuatro deslizadores, con dos catarinas cada uno, que permitirán que el tiempo de traslado de las barras a la zona de terminación pase de 15 a tan sólo 5 segundos, y al mismo momento en que el trolley retorna a su posición.

- Soldar base de cada uno de los deslizadores a los actuales arcos recibidores.
- Conectar el eje que comunica los diferentes deslizadores al motor.
- Realizar el montaje del motor y la cadena impulsadora.

El área eléctrica, se deben realizar las conexiones del motor eléctrico, tanto a la alimentación como

dejarlo habilitado provisoriamente.

Por último, se debe considerar al menos dos semanas productivas antes de realizar la detención total del equipo. Con las mejoras que se han realizado hasta este momento, en el mismo tiempo que se producen 4 barras, podrían producirse 6. Por lo tanto, si se consideran las 60 barras que pueden trefilarse en un día, esta cifra podría aumentarse a 90.

E) Trabajos etapa 5; Detención total de equipo

Es la última etapa de montaje y con ello la más importante, es la etapa en donde todas las mejoras deberán ser conectadas, comunicadas y en donde el sistema de tracción se cambia completamente.

En el área mecánica del equipo de mantenimiento se deberán realizar trabajos asociados al desmontaje y montaje de los sistemas de tracción:

- Desmontar cadena impulsadora.
- Desmontar piola y tambor
- Desmontar motor eléctrico y caja reductora (una vez que haya sido desconectado de la corriente y del PLC)

El área eléctrica deberá en el apartado de desmontaje desconectar completamente el apartado eléctrico de la máquina, y realizar las desconexiones necesarias del PLC para habilitar el nuevo programa.

Gracias a que se ha considerado un motor eléctrico con la misma tensión de alimentación, no será necesario realizar mayores cambios en la alimentación eléctrica del nuevo sistema de tracción.

Una vez desmontado todo el viejo sistema de tracción deberá montarse el nuevo, para ello es necesario:

- Realizar el corte en la bancada para el soporte del vástago.
- Montar el soporte de vástago, con sus conexiones neumáticas.
- Desmontar el resorte del Trolley e instalar el nuevo sistema roscado de ajuste.
- Montar las bases que sostendrán el cilindro de tracción.
- Montar el cilindro de tracción.
- Unir el cilindro al trolley mediante el eslabón.
- Montar la central hidráulica de tracción.
- Realizar todas las conexiones hidráulicas y neumáticas faltantes en el equipo.
- Realizar el llenado de la central hidráulica.

Por otro lado, el equipo eléctrico de mantenimiento deberá habilitar el funcionamiento del banco, de esta manera todas las conexiones provisionales ahora deberán ser conectadas al PLC definitivo para habilitar completamente la automatización del equipo.

- Conectar central hidráulica al PLC y al circuito eléctrico de la planta.
- Conectar la automatización de los elementos faltantes, eliminar por completo Cables en exceso.
- Conectar todo lo faltante al nuevo programa.
- Habilitar completamente el nuevo panel de instrumentos.

Parte de estos trabajos pueden realizarse en paralelo ya que el banco estará detenido por completo por un tiempo estimado de un mes.



Figura 2-35: Banco de trefilado finalizada la implementación.

Luego de terminar esta etapa entrará en una marcha blanca en vacío para luego realizar pruebas con carga y comprobar que todo esté correctamente implementado. De existir correcciones y reparaciones deben realizarse a la brevedad dentro de este periodo de pruebas.

Por último, se deberá realizar con el análisis de las recomendaciones propuestas para que el proceso en general sea muchísimo más eficiente.

3. CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El plan de mejora presentado en este documento queda a disposición del cliente quien tendrá la decisión final en la implementación. A lo largo del desarrollo de esta propuesta se ha conseguido presentar una propuesta de modificación al diseño actual del Banco de Trefilado utilizado por el cliente con una implementación completamente factible que soluciona el problema planteado al inicio de este trabajo.

Esta propuesta contribuye a la reducción de la tasa de rechazo debido a faltas a las normas de calidad gracias a dos de los 6 componentes mejorados. Uno de estos cuerpos es el Bloque de Trefilado, el cual con la mejora propuesta reducirá las flexiones en voladizo que se producen en la zona trasera de la barra las cuales generan tanto marcas superficiales como flexiones no deseadas. Por otro lado, la incorporación de un sistema de tracción hidráulico le entrega mayor continuidad a la fuerza ejercida, quitando las marcas superficiales producidas por el paso de la cadena en el piñón, obteniendo con esto una menor tasa de rechazo de las piezas.

Además, con la mejora conjunta del Bloque de Trefilado y el Trolley, es posible mejorar el uso del material, ya que se requerirá una punta de menores dimensiones gracias a la eficacia de agarre mejorada. De esta manera, al cortar la punta de tiro habrá menos material de residuo. Esta eficacia mejorada de agarre reducirá en hasta 25 segundos el tiempo utilizado en el trefilado, lo cual significa producir en promedio hasta 16 barras de cobre en el mismo tiempo que se producen 10.

Elementos periféricos como los botadores y los recibidores laterales tienen una influencia en el tiempo de proceso, reduciendo el tiempo de traslado de 148 segundos a tan sólo 50 segundos en un paquete de 10 barras. Además, esto contribuye a que el proceso sea continuo quitándole la carga operativa al trabajador en las actividades de traslado de barras mediante el uso de puente mecánico.

Para llevar a cabo este proyecto, es necesario realizar una inversión aproximada de \$250 000 000 la cual está subdividida en tres aspectos. En primer lugar, la inversión en el equipo, la inversión en horas extras para cubrir la demanda durante la implementación, y un estimado de costo por atraso en los pedidos. Este último ítem de costos se espera reducir al mínimo mediante la generación de stock previo, que pueda cubrir la demanda en las detenciones del equipo.

Dicho lo anterior, se puede concluir que se ha logrado cumplir con los requerimientos del cliente y solucionado el problema propuesto asociado a las faltas en la norma de calidad, esperando que la mejora reduzca la tasa de rechazos debido a este ítem desde un 10% a un 5%, lo que significa disminuir las pérdidas debido a este apartado en hasta \$30 000 000 mensuales. El ideal de la empresa en este apartado es de un 3%, equivalente a 3 barras de 7 metros trefiladas el cual podría ser alcanzable trabajando en las recomendaciones propuestas.

Sin embargo, la propuesta debe estar complementada con mejoras futuras las cuales serán descritas en el siguiente apartado.

3.1 Recomendaciones

Para obtener el mayor provecho de la propuesta realizada en el capítulo anterior, en este capítulo se proponen las siguientes recomendaciones para la empresa, las cuales complementan el trabajo realizado en el mejoramiento del banco de trefilado. Las recomendaciones están realizadas de forma muy general, con el objetivo de motivar al mejoramiento continuo de la planta.

3.1.1 Automatización

Debido a los límites acotados del proyecto, esta área queda fuera del alcance, pero su realización es mandatoria para que la mejora se desempeñe de forma óptima. El equipo cuenta actualmente con automatización mediante el uso de PLC, muchas de las funciones del equipo están desactivadas, pero si es posible volver activarlas ya que están presentes en el programa del equipo. En ellas se muestra que el equipo originalmente contaba con 6 botadores, y 6 sensores encargados de activarlos. Por lo tanto, se recomienda realizar una actualización al sistema de automatización del equipo que considere:

- Velocidades de avance variable para el cilindro (utilizando la bomba de caudal variable)
- Active los soportes de barras, y los botadores según el paso del trolley.
- Repliegue los botadores, y verifique que estén en posición antes de retornar el carro.
- Realice el trefilado según requerimiento del operador.



Figura 3-1: PLC actual del equipo.

Para ello es necesaria la integración de equipos físicos, de los cuales algunos cuales ya han sido mencionados anteriormente en la mejora de los botadores:

- Modificar la botonería, sin cambiar la posición de los botones (mantiene misma operabilidad)
- Incluir paradas de emergencia.
- Control de salida de los sostenedores (sensores)
- Control de salida de los botadores (sensores)
- Reemplazo del cilindro de agarre.
- Incluir en PLC, el control asociado al bloque de trefilado.

3.1.2 Rediseñar el wax-tank de la Prensa de Extrusión.

El wax-tank de la Prensa 1200 corresponde al lugar en dónde se enfrían las barras una vez son extruidas. Posee dos zonas de importancia, la cámara de nitrógeno y la piscina de enfriado.

La cámara de nitrógeno es utilizada para evitar oxidación en las barras, pero su diseño no es

óptimo para la extrusión, ya que obliga a las barras a doblarse antes de ser extraídas. La justificación del diseño (que data del año 2010) es que la cámara de nitrógeno no puede tener contacto con el agua, y debido a esto la salida no puede ser completamente recta. Este diseño provoca gran parte de las flexiones que poseen las barras al momento de ser trefiladas.



Figura 3-2: cámara de nitrógeno del wax-tank

La recomendación a la empresa es revisar el diseño de la Prensa 2300 (línea de tubos, mencionada en la [Figura 1-3](#)), la cual posee una tobera de enfriamiento con un tiraje recto en la que el agua de enfriado no entra en contacto con la cámara de nitrógeno.

Esta es posiblemente la recomendación más costosa de realizar, sin embargo, sería la que solucionaría uno de los mayores problemas desde la base.

3.1.3 Puesta en marcha del Punteador de barras

La empresa dispone de un equipo hecho exclusivamente para hacer puntas a barras de distintas dimensiones, pero se encuentra detenido a un lado del banco de trefilado. Este equipo por sí sólo reemplazaría los dos equipos que actualmente son utilizados para esta función. Es el mejor complemento a la mejora en el banco, ya que influiría principalmente en la efectividad con la que el trolley agarra la barra.

Para poner en marcha este equipo, es necesario realizar la instalación eléctrica correspondiente, ya que la tensión necesaria para su funcionamiento no está disponible en su zona de funcionamiento, pero sí en otras zonas de la planta, por lo tanto, podría realizarse el enlace eléctrico. Por otro lado, resulta necesario revisar que toda sus conexiones eléctricas y elementos mecánicos se encuentren en condiciones de operar.

Esta recomendación contribuiría a la normalización del punteo, formando puntas cuasi idénticas, y de esta manera desperdiciar menos material y mejorar el agarre al momento de trefilar.

3.1.4 Mejoramiento del enlace entre punteo y banco.

Aún con la implementación de la mejora, seguiría faltando reducir un uso del puente mecánico para solucionar en gran medida el problema de los traslados que restan eficiencia al proceso de trefilado. Este traslado corresponde al que se realiza entre la zona de punteo y la cama de rodillos que alimenta el banco de trefilado. Entre ambas zona se encuentra una separación de aproximadamente 8 metros, con estructuras que no se encuentran comunicadas entre ellas, según se muestra en la imagen a continuación:



Figura 3-3: Distribución de los equipos de la empresa.

La recomendación consiste en conectar ambas estructuras, e incluir algún método de transporte, idealmente cintas que transporten las barras hacia la cama de rodillos una vez sea punteada, así se evita la acumulación de barras, y el uso del puente mecánico, según lo indicado en el capítulo 1.

3.1.5 Mejoramiento del transportador de terminación.

El receptor lateral propuesto en el ítem 2.2.5 entrega las barras a un transportador de rodillos que alimenta a la zona de terminación, se recomienda realizar una reparación de esta estructura, integrando rodillos con recubrimiento blando que no genere rayas o golpes a las barras al momento de caer o ser deslizadas por los operadores hacia la zona de terminación.

Sin ir más lejos, existen transportadores dentro de la empresa con dimensiones similares que se encuentran en desuso y podría ser integrados en esta zona.



Figura 3-4: Transportador.

3.1.6 Control de calidad y normalización.

Ya se ha mencionado anteriormente que si bien la empresa reconoce la norma chile NCh. 256 OF72 como la norma que guía la calidad de sus productos, en el desarrollo de esta propuesta se ha visto cómo no existe un total apego a la norma, principalmente en el apartado del control de calidad.

Se recomienda incorporar un control de calidad al final de la línea productiva, para comprobar bajo la norma el cumplimiento de los estándares que motivan este trabajo: dimensionales, rectitud y calidad superficial.

Por otro lado, resulta necesario establecer normas asociadas al corte de puntas y al dimensionado de los productos en la zona de terminación ya que muchas veces se pierde un exceso de material en el primer corte. A su vez, resulta necesario fabricar tochos de diferentes dimensiones que se adecúen de mejor manera a las dimensiones finales de los productos, para reducir de esta manera los reprocesamientos.

3.1.7 Mantenimiento

Mucho de los problemas encontrados en el desarrollo de este trabajo fueron producidos por la falta de una planificación de mantenimiento, y un abuso de las labores correctivas por sobre las preventivas. Se recomienda comenzar a desarrollar un plan de mantenimiento preventivo en la planta, ya que la confiabilidad de la mejora propuesta, y su durabilidad están totalmente ligados a un mantenimiento preventivo.

BIBLIOGRAFÍA

- COCHILCO (2021). *El mercado de productos semielaborados de cobre*. Obtenido de: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/EI%20mercado%20de%20productos%20semielaborados%20de%20cobre%20con%20rpi.pdf>
- Banco Central de Chile (2022). *Reporte estadístico de producción y exportación de cobre*. Obtenido de: https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/enlaces/Informes/BOLETIN/listado/BD002003_Content.pdf
- Kalpakjian S. y Schmid S.R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología 5ta ed.* Pearson Education.
- Askeland D., Wright W. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales 7ma ed.* Cengage Learning.
- Budynas R., Nisbett JK. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley 8va. Ed.* McGraw-Hill/Interamericana.
- Vidosic, J. P. (1957). *Machine design projects*. New York: Ronald Press Co.
- Callister W. (1995). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*.
- ASM International. (1998). *Metals Handbook Desk Edition, 2nd ed.*
- Instituto Nacional de Normalización (1972). *NCh 256 Of.72: Cobre. Cobres aleados y aleaciones de cobre. Barras, perfiles y platinas. Terminología. Especificaciones generales y métodos de ensayo*.
- Instituto Chileno del Acero (2000). *Manual de diseño para estructuras de Acero, método de factores de carga y resistencia*.
- Rodríguez O. (2017), *Metodología para el estudio y diseño tecnológico del proceso secuencial de estirado multi-etapa de alambre y barras de sección circular*. Universidad de Málaga. Obtenido de: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/14910>
- Aguilar L., Hernández M. y López L. *Diseño y construcción de un equipo didáctico para trefilado de alambre de cobre puro*. Universidad de El Salvador. Obtenido de: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/11065/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20equipo%20did%C3%A1ctico%20para%20trefilado%20de%20alambre%20de%20cobre%20puro.pdf>
- Guachamín J., Betancourt L. *Diseño y construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos a ser implementado en laboratorio de máquinas y herramientas del departamento de ciencias de la energía y mecánica*. Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador. Obtenido de: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/7683/T-ESPE-047589.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Escamilla A. (s.f.). *Materiales de Partida*. Universidad de Sevilla. Obtenido de: biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20385/fichero/04-MaterialesDePartida.pdf

ANEXO

Anexo A. Fenómeno de endurecimiento por deformación en frío de los metales

El endurecimiento por deformación en frío es un fenómeno que es posible gracias a la naturaleza cristalina de los metales, es decir, la presencia de un ordenamiento de sus átomos o iones en las tres direcciones del espacio (Escamilla, s.f.). A medida que este ordenamiento es más regular y homogéneo, el material es más propenso a experimentar un endurecimiento por deformación.

A medida que los metales presentan un ordenamiento cristalino más regular y homogéneo son más propensos a experimentar un endurecimiento por deformación. El acero, el aluminio, y el cobre, son conocidos por presentar este fenómeno.

El endurecimiento en frío no es más que un aumento en el número de dislocaciones⁶ dentro de la estructura cristalina de un material, la cual inicialmente es del orden de 10^6 [cm] de líneas de dislocación por centímetro cúbico de material. Al aplicar un esfuerzo superior al límite elástico, las dislocaciones de moverán sobre su plano de deslizamiento hasta que se crea una nueva línea de dislocación. Este mecanismo es conocido como **fuelle de Frank-Read**, y podría incrementar el número de dislocaciones hasta llegar a 10^{12} [cm] de líneas de dislocación por centímetro cúbico de material.

A medida que se aumenta el número de dislocaciones, estas se encuentran con otro tipo de defectos cristalinos como podrían ser los límites de grano, defectos de borde o fases intermedias. Al encontrarse con estos defectos, no pueden desplazarse, y la reducción de deslizamiento resulta en un aumento de la rigidez del material y con ello, aumenta su resistencia a la deformación, y con ello se reduce la ductilidad.

Si se realiza repetidamente una deformación en frío o se reduce un gran porcentaje en un solo trabajo, se llegará al límite máximo de trabajo en frío, y el material al mínimo esfuerzo se romperá, por ello se debe trabajar en una zona de equilibrio que no arriesgue tanto el porcentaje de elongación. En el caso del cobre, mostrado en la figura A-1, al realizar un porcentaje de trabajo en frío de 25%, su porcentaje elongación se ve reducida en un 15% aproximadamente, aumentando casi 30.000 [psi] (206.8 [MPa]) de Límite elástico, y en cerca de 15.000[psi] (103.4 [MPa]) su resistencia a la tracción. Se puede ver entonces, que en el caso del cobre la mejora de sus propiedades es bastante positiva frente al porcentaje de elongación perdido.

⁶ Las dislocaciones (o defectos cristalinos lineales), son imperfecciones o irregularidades que ocurren en la estructura cristalina de un metal, y son las responsables de la deformación plástica, y de la ductilidad de los materiales. Su movimiento e interacción produce el endurecimiento por deformación, recristalización y otros fenómenos.

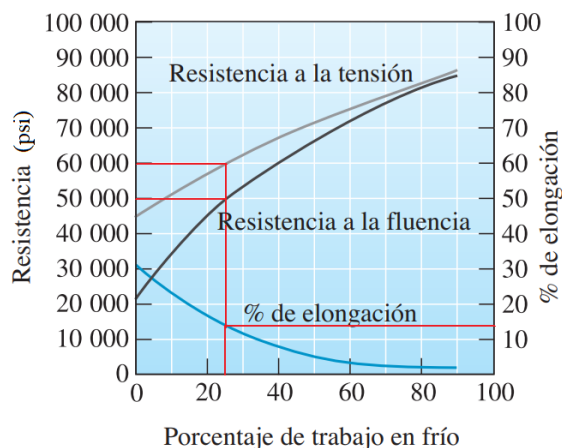


Figura A-1: Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.
(Fuente: Askeland D., 2017, Ciencia e Ingeniería de los Materiales 7ma ed.)

Anexo B. Factores de Seguridad

Según indica Vidosic, J. P. (1957), se puede recomendar el uso de determinados factores de seguridad basados en el tipo de aplicación al que será enfrentado el equipo a diseñar. Estas recomendaciones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla B-1: Factores de seguridad recomendados.
Nota Adaptado de: Vidosic, J. P. (1957). *Machine design projects*

Aplicaciones	Factor de seguridad
Para materiales confiables y comprobados, usados bajo condiciones controladas y sujetos a carga y esfuerzos que pueden determinarse con exactitud.	1.3 – 1.5
Para materiales bien conocidos, en condiciones de medio ambiente razonables, sujetos a carga y esfuerzos que puedan calcularse fácilmente.	1.5 – 2
Para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias, sujetos a cargas y esfuerzos calculables.	2 – 2.5
Para materiales poco experimentados o para materiales frágiles en condiciones poco severas de medio ambiente, carga y esfuerzo.	2.5 – 3
Para materiales no confiables, usados para condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo. Deberá también usarse con materiales conocidos que vayan a usarse en condiciones ambientales inciertas o sujetos a cargas y esfuerzo inciertos.	3 – 4

Debido a la ubicación de la planta y la disposición del equipo, las condiciones ambientales a las que se enfrentarán no son severas, así mismo, se puede calcular con facilidad los esfuerzos y cargas al cual será enfrentado en su operación, aunque son cargas altas, por lo tanto, se elige un factor de seguridad de 1.5, que corresponde al mínimo recomendado en el segundo apartado de la tabla B-1.

Anexo C. Fuerzas de trefilado requeridas por cada producto.

El catálogo de productos de la empresa que está destinado a fabricarse en el Banco de Trefilado Vaughn 75.000 lbs, consta de 18 barras de sección rectangular, 4 de sección triangular, 15 pletinas, y 11 barras de sección redonda, que en conjunto suman 48 productos de distintas formas y tamaños. A continuación, se presenta un resumen de los distintos productos, representando sus dimensiones y áreas iniciales y finales, junto al porcentaje de trabajo en frío (o reducción de sección) y las fuerzas de trabajo y diseño utilizando el factor de seguridad del anexo anterior.

Tabla C-1: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras rectangulares.

Rectangulares								
Inicial			Final				Fuerzas	
Ancho [mm]	Alto [mm]	A ₀ [mm ²]	Ancho [mm]	Alto [mm]	A _f [mm ²]	Reducción [%]	Trabajo [N]	Diseño [N]
20	20	400	16	16	256	36	43 472	65 207
23	36	828	19	32	608	27	60 479	90 719
23	38	874	19	34	646	26	62 309	93 463
21	41	861	17	37	629	27	64 067	96 100
23	42	966	19	38	722	25	65 989	98 984
24	44	1056	20	40	800	24	68 318	102 477
25	44	1100	21	40	840	24	68 817	103 225
29	42	1218	25	38	950	22	69 303	103 954
26	44	1144	22	40	880	23	69 333	104 000
29.4	42.1	1237	25.4	38	968	22	69 624	104 436
35	39	1365	31	35	1085	21	70 779	106 168
29	44	1276	25	40	1000	22	70 976	106 464
28	47	1316	24	43	1032	22	72 979	109 469
26	50	1300	22	46	1012	22	74 640	111 959
34	45	1530	30	41	1230	20	74 740	112 109
29	49	1421	25	45	1125	21	75 196	112 794
34	47	1598	30	43	1290	19	76 311	114 467
29	54	1566	25	50	1250	20	79 457	119 185

Tabla C-2: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras triangulares

Triangulares								
Inicial			Final				Fuerzas	
Ancho [mm]	Alto [mm]	A ₀ [mm ²]	Ancho [mm]	Alto [mm]	A _f [mm ²]	Reducción [%]	Trabajo [N]	Diseño [N]
34	34	501	30	30	390	22	28 725	43 088
42	39	819	38	35	665	19	37 855	56 782
42.1	42.1	767	38	38	629	18	33 734	50 601
55	26	715	51	22	561	22	39 548	59 322

Tabla C-3: Magnitudes asociadas a la fabricación de pletinas.

Pletinas								
Inicial			Final			Reducción [%]	Fuerzas	
Ancho [mm]	Alto [mm]	A ₀ [mm ²]	Ancho [mm]	Alto [mm]	A _f [mm ²]		Trabajo [N]	Diseño [N]
24	9	216	20	5	100	32	38 127	57 191
29	9	261	25	5	125	28	44 557	66 835
34	9	306	30	5	150	26	50 965	76 448
34	14	476	30	10	300	25	53 535	80 303
44	9	396	40	5	200	16	63 753	95 629
44	14	616	40	10	400	16	64 714	97 071
54	14	756	50	10	500	14	75 914	113 870
64	24	1536	60	20	1200	10	86 722	130 083
64	14	896	60	10	600	10	87 127	130 691
74	24	1776	70	20	1400	8	96 022	144 033
74	19	1406	70	15	1050	7	96 355	144 532
84	24	2016	80	20	1600	32	105 359	158 038
84	14	1176	80	10	800	28	109 581	164 371
104	24	2496	100	20	2000	26	124 102	186 153
124	14	1736	120	10	1200	25	154 538	231 806

Tabla C-4: Magnitudes asociadas a la fabricación de barras redondas.

Redondas						
Inicial		Final		Reducción [%]	Fuerzas	
D ₀ [mm]	A ₀ [mm ²]	Ancho [mm]	A _f [mm ²]		Trabajo [N]	Diseño [N]
23.05	417	19.05	285	32	38 127	57 191
26.23	540	22.23	388	28	44 557	66 835
29.00	661	25.00	491	26	50 965	76 448
29.40	679	25.40	507	25	53 535	80 303
48.45	1844	44.45	1552	16	63 753	95 629
49.00	1886	45.00	1590	16	64 714	97 071
54.80	2359	50.80	2027	14	75 914	113 870
79.00	4902	75.00	4418	10	86 722	130 083
80.20	5052	76.20	4560	10	87 127	130 691
92.90	6778	88.90	6207	8	96 022	144 033
114.00	10207	110.00	9503	7	96 355	144 532

Anexo D. Tablas utilizadas en el cálculo de cadenas.

Tabla D-1: Dimensiones de cadenas estándares de rodillo americanas: torón sencillo.

Número de cadena ANSI	Paso, pulg (mm)	Ancho, pulg (mm)	Resistencia mínima a la tensión, lbf (N)	Peso promedio, lbf/pie (N/m)	Diámetro del rodillo, pulg (mm)	Espaciamiento de torones múltiples, pulg (mm)
25	0.250 (6.35)	0.125 (3.18)	780 (3 470)	0.09 (1.31)	0.130 (3.30)	0.252 (6.40)
35	0.375 (9.52)	0.188 (4.76)	1 760 (7 830)	0.21 (3.06)	0.200 (5.08)	0.399 (10.13)
41	0.500 (12.70)	0.25 (6.35)	1 500 (6 670)	0.25 (3.65)	0.306 (7.77)	—
40	0.500 (12.70)	0.312 (7.94)	3 130 (13 920)	0.42 (6.13)	0.312 (7.92)	0.566 (14.38)
50	0.625 (15.88)	0.375 (9.52)	4 880 (21 700)	0.69 (10.1)	0.400 (10.16)	0.713 (18.11)
60	0.750 (19.05)	0.500 (12.7)	7 030 (31 300)	1.00 (14.6)	0.469 (11.91)	0.897 (22.78)
80	1.000 (25.40)	0.625 (15.88)	12 500 (55 600)	1.71 (25.0)	0.625 (15.87)	1.153 (29.29)

Tabla D-2: Capacidad nominal de potencia de cadenas de paso único en torón sencillo de una catarina de 17 dientes.

Velocidad de la catarina, rpm	Número ANSI de cadena					
	25	35	40	41	50	60
50	0.05	0.16	0.37	0.20	0.72	1.24
100	0.09	0.29	0.69	0.38	1.34	2.31
150	0.13*	0.41*	0.99*	0.55*	1.92*	3.32
200	0.16*	0.54*	1.29	0.71	2.50	4.30
300	0.23	0.78	1.85	1.02	3.61	6.20

Tabla D-3: Factores de corrección de dientes, K_1 .

Número de dientes en catarina impulsora	Potencia preextremo, K_1	Potencia posextremo, K_1
11	0.62	0.52
12	0.69	0.59
13	0.75	0.67
14	0.81	0.75
15	0.87	0.83
16	0.94	0.91
17	1.00	1.00
18	1.06	1.09
19	1.13	1.18
20	1.19	1.28
N	$(N_1/17)^{1.08}$	$(N_1/17)^{1.5}$

Tabla D-4: Factores de corrección de dientes, K_2 .

Número de torones	K_2
1	1.0
2	1.7
3	2.5
4	3.3
5	3.9
6	4.6
8	6.0

Anexo E. Evaluación de un cilindro de mayores dimensiones

E.1) Desarrollo del Sistema de Tracción

En ese caso se necesita de un cilindro de 15 metros de largo. Dependiendo de la fuerza a utilizar es el tipo de bomba que se utilizará en la central hidráulica. Este equipo será elegido según la disponibilidad comercial, priorizando que el motor que impulse la bomba sea de una potencia igual o menor a la que actualmente utiliza el equipo (150HP) con el objetivo de no afectar negativamente al costo operacional.

Entre los requerimientos que debe tener el sistema de tracción se encuentra:

- Tener una velocidad de tiraje entre 0.5[m/s].
- El sistema de tracción debe tener un retorno en vacío rápido de 0.75[m/s]
- Se aprovechará un metro de bancada para incluir un punto de deslizamiento debido a posibles deformaciones.

La actualización del sistema de tracción mejorará la calidad del producto al ejercer una fuerza constante de trefilado quitando las marcas producidas por el paso del engrane y la cadena. Adicionalmente la implementación de este sistema de tracción reduciría los tiempos dedicados al mantenimiento, ya que un solo sistema reemplazaría la tracción y el retorno.

Si se evalúa un cilindro similar al que posee la empresa actualmente, se considera un cilindro de un vástago de 3.5[in], con un bore de 8". Si se evalúan 2500 [psi] (1.7237×10^7 [Pa]) de presión de trabajo, utilizando la presión máxima de la unidad hidráulica que posee la empresa para esta aplicación, alcanzando una fuerza de 450 000 [N]. La carrera del cilindro será de 15 metros de largo, a diferencia de los 7 metros que posee actualmente el cilindro propuesto.

E.2) Complemento sistema de tracción

La mejora buscará adecuar este elemento estructural a la nueva configuración. La bancada es el elemento por donde desliza el trolley, mide 17.5 metros de largo de los cuales 15 metros son aprovechables en la producción. En aspectos generales la bancada tiene las siguientes dimensiones y se ve de la siguiente forma:

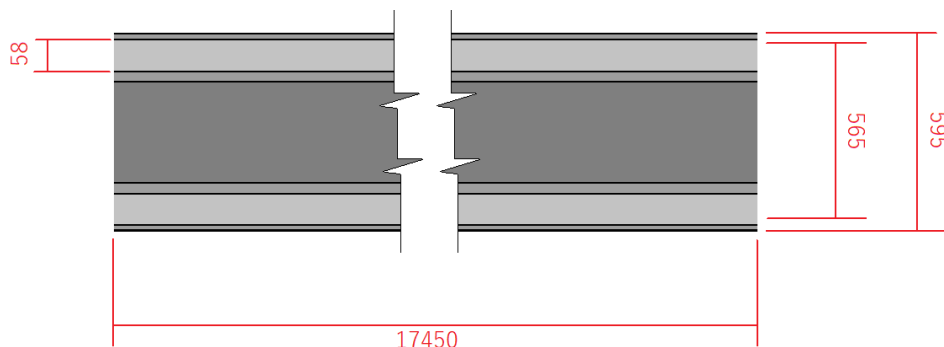


Figura E-1: Dimensiones de la bancada.
(Vista en planta, dimensiones en mm)

Los cambios que se realizarán en la bancada están asociados al aprovechamiento de su zona central, actualmente utilizada para que la cadena deslice. En esta zona central se incluirán los rodillos de soporte que evitarán que el vástago del cilindro hidráulico tenga una deflexión excesiva.

El vástago del cilindro en una primera aproximación posee un diámetro de 3.5” y un largo de 15 metros. Utilizando la información entregada por las Tablas Auxiliares presentadas en el Manual de Diseño para estructuras del Instituto Chileno del Acero, es posible aproximar el comportamiento de la deflexión del vástago al de una viga de sección circular empotrada en sus extremos. De esta manera, se puede realizar el siguiente análisis:

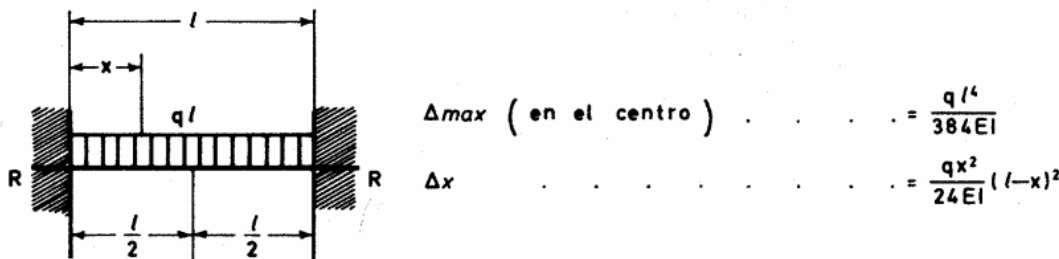


Figura E-2: Esquema de deflexión de una viga empotrada con carga distribuida uniformemente.
(Fuente: ICHA, 2000, *Manual de diseño de estructuras de acero*)

En este caso, utilizando un perfil circular, el momento inercial tendrá un valor de:

$$I_{\ominus} = \pi \cdot \frac{D^4}{64} = \pi \cdot \frac{(3,5 \cdot 0.0254)^4}{64} = 3.066 \times 10^{-6} \text{ [m}^4\text{]}$$

Para el Acero 40Cr, normalmente utilizado en la creación de vástagos de grandes dimensiones, se tiene además un valor de E igual a 205 850 [MPa]. El largo total para considerar es de 15 metros, se considera como carga el peso por metro del vástago, el cuál será de 478.0 [N]. Con estos valores, la deflexión máxima será de 99.8[mm]. Si se realiza una aproximación simulada, se consigue un valor de 99[mm]:

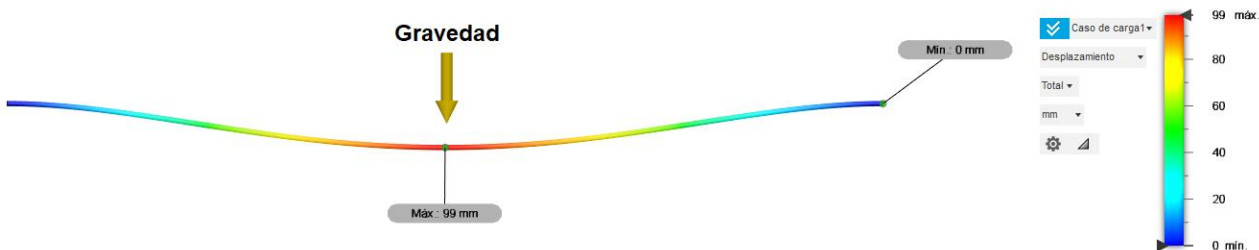
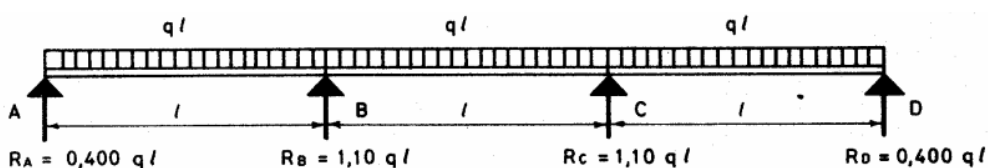


Figura E-3: Deflexión simulada, ajustado 0.5x

Se hace por lo tanto imprescindible incluir apoyos para el vástago a lo largo de la bancada, y la respuesta ante esta problemática la entrega nuevamente el Manual de Diseño del ICHA.



$$\Delta_{max} (0,446l \text{ desde A ó D}) = 0,0069 \frac{ql^4}{EI}$$

Figura E-4: Esquema de deflexión de una viga empotrada con carga distribuida uniformemente en tramos.
(Fuente: ICHA, 2000, Manual de diseño de estructuras de acero)

Cada segmento l mide 5 metros de largo, y la carga por metro sigue siendo la misma. Suponiendo dos soportes con una reacción equivalente a $1.1ql$, la deformación se reduce considerablemente. El punto de mayor deflexión estará ubicado a $0.446l$ equivalentes a unos 2.23[m], en este punto el valor de la deflexión es de 3.3[mm].

De hecho, si se simula esta nueva situación, se obtiene un valor de deflexión de 1.78[mm].

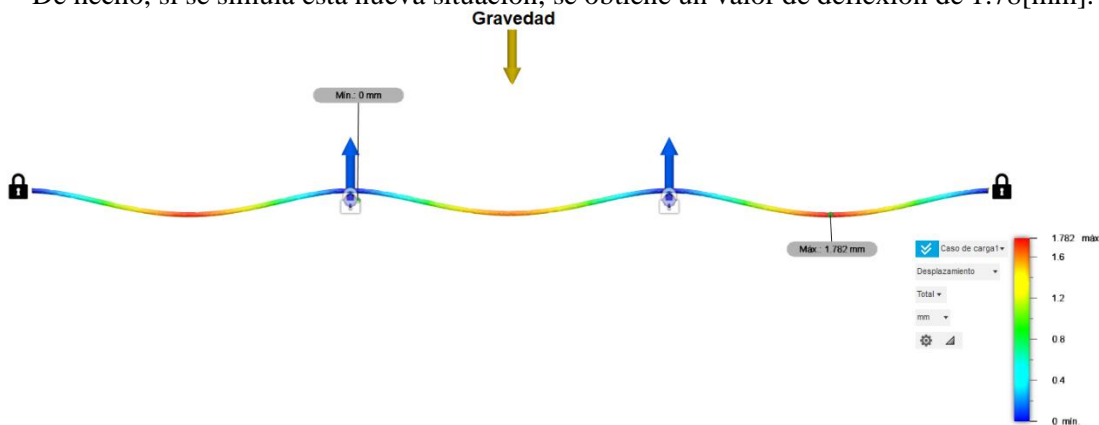


Figura E-5: Deflexión simulada del segundo caso, ajustado 0.5x

En base a esto, se crean los requerimientos para la modificación de la bancada:

- Se dispondrán 2 soportes a lo largo de la bancada, el primero a 5 metros del cilindro, y el siguiente a 10 metros de este.
- Estos soportes deben ser capaces de entregar una fuerza de 2000N, para ello se utilizará un

cilindro hidráulico que pueda retraer e impulsar el soporte.

- El contacto soporte-vástago, deberá ser mediante un rodillo compuesto de algún polímero.

Para incluir los soportes en la bancada es necesario realizar cortes en los segmentos centrales de la misma, a una distancia cercana a 7.5 y 10.5 metros aproximadamente del inicio de la bancada.

Se realiza el cálculo del cilindro neumático considerando una presión de 4[bar] para el trabajo se ha optado por elegir un cilindro de 80[mm] de bore, con un recorrido de 200[mm], el cuál es capaz de desarrollar los 2000N requeridos, junto a un desplazamiento lineal vertical del rodillo de aproximadamente 260[mm]. Con esto, se asegura que el vástago del cilindro de tracción no tendrá una deflexión considerable, y se asegura que al momento de pasar el trolley, el soporte estará retraído y no influirá en su desplazamiento.



Figura E-6: Representación de los soportes del vástago.

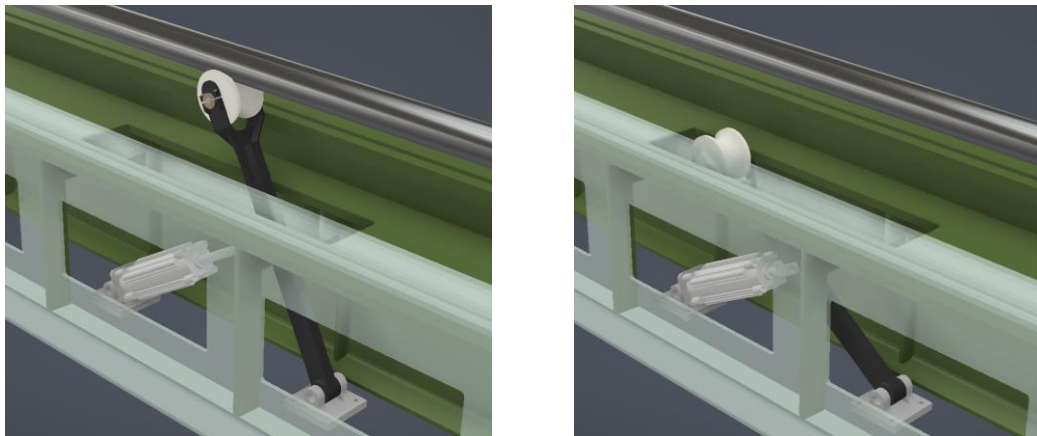


Figura E-7: Esquema movimiento de los soportes.

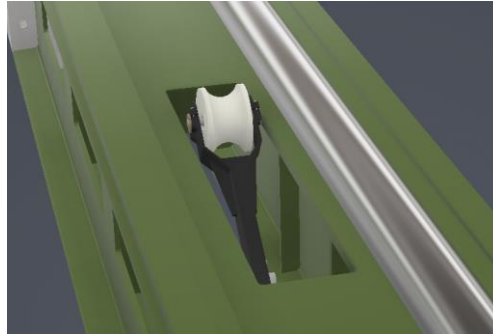


Figura E-8: Corte propuesto en la bancada.

Para poder implementar el sistema de tracción hidráulico es necesario que se realicen estos cambios en la bancada, ya que el vástago necesita sujeción en su desplazamiento, por lo tanto, las modificaciones realizadas a la bancada no son directamente una solución a los problemas planteados, sino que complementan al sistema de tracción.

Anexo F. Tabla de componentes y precios aproximados

Según lo comentado en el ítem 2.2.5, se muestra a continuación la lista preliminar de elementos más importantes para llevar a cabo la mejora. Estos valores son multiplicados por un factor 1.5 al momento de sacar el total en el ítem antes mencionado.

Tabla F-1: Lista preliminar de elementos para mejorar la bancada.

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapas	Observación
Bancada	Brazo de soporte	No Comercial	1	\$81 000	6	Fabricación particular.
	Rueda acanalada en U, nylon. Diámetro ext: 140 mm U: 3.5"	No Comercial	1	\$368 710	A-6	Material para fabricar. 1[m]x150[mm]
	Rodamiento 6003	Comercial	2	\$50 000	A-6	
	Cilindro Neumático Bore: 80mm Carrera: 200mm	Comercial	1	\$175 000	6	
	Válvula neumática 5/2	Comercial	1	\$	6	
	Final de carrera (Posición del trolley)	Comercial	5	\$45 000	6	
	Horquilla para vástago McMaster-Carr 62205K49	Comercial	1	\$85 000	6	
	Soporte de Montaje McMaster-Carr 62205K44	Comercial	1	\$185 000	6	
	Soporte de Cilindro McMaster-Carr 62205K48	Comercial	2	\$230 000	6	
	Barra Bronce 50[mm]x300[mm]	Comercial	1	\$125 000	1-6	Para varias aplicaciones.
	Perno anclajes 1/2" x 4 1/4"	Comercial	8	\$24 000	1-6	Para varias aplicaciones.
Coste aproximado de la mejora				\$1 368 710		

Para realizar la mejora se requiere una basta cantidad de productos tanto comerciales como no comerciales, de los cuales se puede obtener un costo preliminar para cada una de las mejoras. Cuando se indique en el costo N/D, indica un costo que aún no ha sido determinado.

El término *varias aplicaciones* indica que el producto será utilizado en otros cuerpos del banco de trefilado, de estas manera, únicamente se suman en su primera aparición.

Tabla F-2: Lista preliminar de elementos para mejorar el Trolley

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapas	Observación
Trolley	Barra Bronce 50[mm]x300[mm]	Comercial	1	-	1-6	Mencionado en Tabla 2-7
	Eslabón de enlace Acero A36 espesor 50[mm]	No Comercial	1	\$450 000	A-1	Precio aproximado a una placa de 500[mm]x500[mm] Más corte en maestranza.
	Barra redonda SAE1060 Pasador sist. tracción	Comercial	1	\$75 000	A-1	Material para fabricar. 60[mm]x300[mm]
	Barra redonda SAE1060 Pasador sist. tracción	Comercial	1	\$105 000	A-1	Material para fabricar. 75[mm]x300[mm]
	Barra redonda SAE1060 Para mordazas	Comercial	1	\$45 000	A-1	Material para fabricar. 35[mm]x400[mm]
	Rueda acero 140[mm]x40[mm]	Comercial	4	\$520 000	1	
	Rueda tipo tensor	Comercial	4	\$128 000	1	Según disponibilidad.
	Estructura de soporte cuerpo de tirado	No Comercial	1	\$295 000	6	Estructura, hilo, y rueda.
	Descanso UCF207/SS	Comercial	1	\$48 000		
	Coste aproximado de la mejora				\$1 666 000	

Tabla F-3: Lista preliminar de elementos para mejorar el Bloque de Trefilado

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapas	Observación
Bloque de Trefilado	Set sellos hidráulicos para cilindros Bore 6” Vástago 3”	Comercial	2	\$150 000	2	Fabricación particular.
	Manguera hidráulica 1SN – 1”	Comercial	1	\$320 000	3	50[m] Para 4 segmentos.
	Válvula electrohidráulica 5/2	Comercial	1	\$256 000	A-3	Para cilindro de apriete.
	Válvula electrohidráulicas 5/2.	Comercial	2	\$712 000	A-3	Para cilindros de empuje.
	Estructura base. Cuerpo guía de mordazas. Aproximadamente 40kg.	No Comercial	1	\$545 000	A-3	Aproximado según 3 veces precio/peso comercial.
	Final de carrera	Comercial	1	\$15 000	3	
	Cilindro hidráulico Bore: 2” Carrera: 160mm	Comercial	1	\$140 000	3	De apriete
	Power Pack 200 litros. 1500 PSI 250 L/min	Comercial	1	\$5 500 000	3	Precio aproximado. Depende de requerimientos
	Coste aproximado de la mejora				\$7 638 000	

Tabla F-4: Lista preliminar de elementos para mejorar los botadores

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapas	Observación
Botadores	Cilindro neumático Bore: 50mm Carrera: 600mm	Comercial	2	\$460 000	4	
	Cilindro neumático Bore: 40mm Carrera: 600mm	Comercial	4	\$620 000	4	
	Válvulas electroneumáticas 5/2	Comercial	6	\$360 000	4	
	Tubo acero 130mm x 8[mm]	Comercial	1	\$385 000	A-4	Tubo 6 metros. Valor estimado. Para corte en maestrana.
	Placa acero A36 Espesor 15[mm]	Comercial	3	\$ 705 000	4	Varias Aplicaciones. Para corte en maestrana.
	Cajas eléctricas simples	Comercial	8	\$54 000	4	
	Perno anclajes 1/2" x 4 1/4"	Comercial	24	\$72 000	4	Para varias aplicaciones.
	Rodamiento Lineal 20mm (interior)	Comercial	2	\$30 000	4	
	Barra de acero 20[mm]x745[mm]	Comercial	2	\$120 000	4	Precio por 1 metro.
Coste aproximado de la mejora				\$2 421 000		

Tabla F-5: Lista preliminar de elementos para mejorar el recibidor lateral.

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapas	Observación
Recibidor Lateral	Cadena ANSI40 Doble torón 390 pasos	Comercial	4	\$798 720	5	Precio por longitud.
	Cadena ANSI40 Doble torón 134 pasos	Comercial	1	\$72 000	5	
	Rueda dentada cadena 51 dientes	N/D	9	\$810 000	5	Precio estimado
	Rueda dentada cadena 17 dientes	N/D	1	\$30 000	5	Precio estimado
	Final de carrera	Comercial	4	\$60 000	5	
	Rodamiento Flange-Mount SKF FY30 WDW	Comercial	8	\$320 000	5	
	Enlace cadena para traslado.	No Comercial	8	N/D	5	
	Unión de ejes 30[mm] interior	Comercial	2	\$200 000	5	
	Eje de acero 30[mm]x2000[mm]	Comercial	4	\$400 000	5	
	Motor eléctrico trifásico 1HP	Comercial	1	\$190 000	5	
	Placa acero A36 Espesor 10[mm]	Comercial	2	\$440 000	5	Para deslizadores.
	Perfil U 100[mm]x50[mm]x3[mm]	Comercial	1	\$30 000	5	Largo de 6 metros.
	Base motor Placa acero 10[mm]	No Comercial	1	\$195 000	5	Corte en maestrancia.
	Perno anclajes 1/2" x 4 1/4"	Comercial	6	\$18 000	4	Para varias aplicaciones.
	Coste aproximado de la mejora				\$3 565 000	

Tabla F-6: Lista preliminar de elementos para mejorar el sistema de tracción.

Mejora	Elemento	Tipo	Cant.	Costo aproximado	Etapa	Observación
Sistema Tracción	PowerPack 1500PSI 1460L/min 1000L	Comercial	1	N/D	6	A pedido según requerimiento.
	Aceite Hydra 68 1000L	Comercial	50	\$3 000 000	6	Se considera que no viene. Se evalúa con el valor del más usado en planta.
	Soportes fijos de Cilindro	No Comercial	2	\$1 300 000	6	Fabricación en maestranza.
	Soporte móvil de Cilindro	No Comercial	1	\$500 000	6	Fabricación en maestranza.
	Ruedas para soporte móvil.	Comercial	2	\$120 000	6	
	Coste aproximado de la mejora				N/D	