



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEJORAS DE AUTOMATIZACIÓN ENFOCADAS A LA REDUCCIÓN DEL FACTOR
HUMANO EN LA FABRICACIÓN DE CABLES DE ACERO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MIGUEL NICOLÁS INOSTROZA CARUZ

PROFESOR GUÍA:
LEONEL NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
AQUILES SEPULVEDA OSSES
JUAN PABLO VERGARA MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: MIGUEL NICOLÁS INOSTROZA CARUZ
FECHA: MAYO 2018
PROF. GUÍA: LEONEL NÚÑEZ LAZO

MEJORAS DE AUTOMATIZACIÓN ENFOCADAS A LA REDUCCIÓN DEL FACTOR HUMANO EN LA FABRICACIÓN DE CABLES DE ACERO

El proceso de manufactura de cables de acero no ha sido sometido a grandes innovaciones a lo largo de los años, siendo su principal avance tecnológico el paso del trenzado manual de alambres a un trenzado realizado por máquinas especializadas. De todas formas, el proceso sigue manteniendo una gran dependencia de la intervención del operador de la máquina, dependiendo a su vez de la experiencia de este. Es por esto que se hace necesario una actualización tecnológica del proceso, incorporando nuevas tecnologías que permitan automatizar la manufactura del producto y revalorizar el trabajo realizado por los operadores, aumentando la eficiencia y calidad del proceso completo.

El objetivo general del proyecto es reducir o eliminar la influencia del operador en la calidad del producto y la seguridad y productividad del proceso de fabricación de cables de acero para liberar tiempo del operador utilizado actualmente en actividades que podrían ser automatizadas. Los objetivos específicos son: i. Identificar las intervenciones del operador durante la producción; ii. Identificar nuevas tecnologías de instrumentación y automatización, que permitan reemplazar labores efectuadas por un operador; iii. Cuantificar el impacto de introducir tecnologías que reemplacen la intervención del operador; iv. seleccionar alternativas a desarrollar, v. desarrollar propuestas de mejoras tecnológicas enfocadas a la instrumentación y automatización de los procesos de producción de cables; y vi. evaluar técnica-económicamente las propuestas de mejora.

La metodología para desarrollar el proyecto contempla tres etapas principales, las cuales son: i. Diagnóstico e identificación de oportunidades de mejora en terreno, ii. Ingeniería conceptual y básica de propuestas de mejora, y iii. Desarrollo de evaluación técnica-económica de las propuestas desarrolladas.

Los principales resultados y conclusiones del proyecto son: i. La intervención del operador durante la fabricación de cables de acero se puede clasificar en accidentales y labores de ajuste, las cuales pueden ser automatizadas; ii. Se encuentran diez oportunidades de mejora aplicables al proceso de fabricación de cables de acero; iii. Se desarrollan, al nivel de ingeniería básica, cinco propuestas de mejora las cuales son: Detección de corte de alambre en bobinado, ajuste automático de frenos para bobinas de máquinas cerradoras, control automático de torque en carretes de máquinas cerradoras, mejoramiento del sistema de lubricación de torones y motorización independiente de take up; iv. Para efectuar las mejoras propuestas se requiere una inversión inicial de 25,2 [MCLP] que pronostica un ahorro de 60,4 [MCLP] anuales. Este se compone de 21.087 HH de producción, 19,1 MCLP por concepto de No conformidades, siendo la propuesta con mayores beneficios la "Detección de corte de alambre en bobinado" con un VAN de 22 [MCLP], una TIR del 181 % y un PRI de 0,4 años.

Dedicada a mi familia, por su apoyo incondicional durante estos años

Agradecimientos

A Margarita, Miguel, Martin y Lenka por ser el pilar que me ha sostenido estos años, por siempre creer en mí y apoyarme en todas mis decisiones, sin ustedes esto no hubiese sido lo mismo.

A mis amigos de la vida que aunque cada vez los veo menos siempre han estado ahí cuando es necesario.

A mi profesor guía Leonel Nuñez, por la ayuda brindada para sacar adelante la memoria, sobretodo en el último trayecto que es el más difícil.

A mis amigos de la universidad, los compañeros de sección, los amigos de la pasta, los de mecánica y en especial a los tropikalizimos, por hacer de la universidad mi segunda casa, que las buenas historias y los buenos momentos no se acaben.

A la gente de BBRG Santiago, por creer en mí y darme la posibilidad de crecer en lo profesional y como persona, que los lazos que pude formar en esta etapa no se pierdan en el tiempo.

A mi equipo de Taekwondo y a mi Sabonim, por enseñarme lo bonito de hacer deporte y que el rival más fuerte a vencer siempre es uno mismo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivo general	2
1.4. Objetivos específicos	2
1.5. Alcances	2
2. Antecedente específicos	3
2.1. Componentes de un cable	3
2.1.1. Alambre	4
2.1.2. Alma	4
2.1.3. Torón	4
2.1.4. Cable	5
2.2. Proceso de fabricación de cables de acero	6
2.2.1. Bobinado	7
2.2.2. Torcido	8
2.2.3. Cerrado	16
2.3. Proyecto BBMS: Aumento en la productividad	16
2.4. Evaluación técnica-económica de proyectos	20
2.4.1. Periodo de retorno de la inversión (PRI)	21
2.4.2. Valor actual neto (VAN)	21
2.4.3. Tasa interna de retorno (TIR)	21
3. Metodología	22
3.1. Diagnóstico e identificación de oportunidades en planta	22
3.2. Benchmark	22
3.3. Selección de oportunidades de mejora	23
3.4. Desarrollo de propuestas	27
3.5. Evaluación técnico-económica	27
4. Resultados	28
4.1. Oportunidades de mejora	28
4.1.1. Estado actual	28
4.1.2. Intervención del operador	29
4.2. Selección de oportunidades de mejora	30
4.2.1. Bobinado	31

4.2.2. Torcido	34
4.2.3. Cerrado	38
4.2.4. Resumen	41
4.3. Benchmark	42
4.3.1. BBRG Willington Quay	42
4.4. Ingeniería conceptual	44
4.4.1. Mejoras en el sistema de lubricación de torones	44
4.4.2. Control automático de torque en take up	45
4.4.3. Detección de cortes de alambre en bobinado	46
4.4.4. Motorización independiente para Take up	48
4.4.5. Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora	48
4.5. Ingeniería básica	49
4.5.1. Mejoras en el sistema de lubricación de torones	49
4.5.2. Control automático de torque en take up	57
4.5.3. Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora	58
4.5.4. Detección de cortes de alambre en bobinado	65
4.5.5. Motorización independiente para Take up	73
4.6. Evaluación económica	76
4.6.1. Beneficios	76
4.6.2. Costo	81
4.6.3. Indicadores de evaluación de proyectos	83
4.6.4. Proyecto de inversión	87
Conclusiones	88
Bibliografía	91

Índice de Ilustraciones

2.1. Componentes de un cable Fuente: [1]	3
2.2. De izquierda a derecha las construcciones Seale, Warrington y Filler Seale. Fuente: [1]	5
2.3. Cable compuesto por seis torones compuestos de 36 alambres cada uno, envolviendo un alma acero. Fuente: [1]	5
2.4. Esquema del proceso de fabricación de cables de acero. Fuente: Elaboración propia en base a [1]	6
2.5. Esquema de una bobina (1) cara de la bobina, (2) catalina y (3) núcleo. Fuente: Elaboración propia	7
2.6. Mecanismo ordenador. Fuente: Elaboración propia	8
2.7. Mesa de rodillos para máquina bobinadora. Fuente: Elaboración propia	8
2.8. Esquema de partes de una máquina torcedora. Fuente: Elaboración propia en base a planos.	9
2.9. Columpio de una máquina torcedora planetaria. Fuente: Elaboración propia	10
2.10. Guías de alambre en una máquina tubular. Fuente: Elaboración propia	10
2.11. Placa divisora para la distribución de alambres. Fuente: Elaboración propia	11
2.12. Dado de formación. Fuente: Elaboración propia	12
2.13. Sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia	12
2.14. A la izquierda un torón sin compactar y a la derecha el mismo torón pero compactado. El torón compactado utiliza de manera más eficiente el área de la circunferencia inscrita. Fuente: Elaboración propia en base a [1]	13
2.15. Arreglo de postformadores dispuestos en distinta orientación. Fuente: Elaboración propia	13
2.16. Capstan doble con ranuras, las flechas rojas indican la dirección en la cual es jalado el torón. Fuente: Elaboración propia.	14
2.17. Devanador electrónico. Fuente: Elaboración propia.	14
2.18. Distribución de bobinas en máquina tubular. Fuente: Elaboración propia en base a [1]	15
2.19. Distribución de bobinas en máquina planetaria . Fuente: Elaboración propia en base a [1]	15
2.20. Preformador máquina cerradora . Fuente: Cerrado de cables [2]	16
4.1. Comparación de bobina defectuosa con una correctamente bobinada. Fuente: Elaboración propia	31
4.2. Buje con anillo interior en V. Fuente: Elaboración propia	32

4.3. Funcionamiento del devanador mecánico con actuador neumático. En azul se muestra el sentido de giro del eje y en rojo el movimiento del buje según su posición Fuente: Elaboración propia	32
4.4. Sistema de alambre cortado en máquinas bobinadoras Fuente: Elaboración propia	34
4.5. Sistema de transmisión de potencia por balatas Fuente: Elaboración propia	36
4.6. Puntos donde el operador ejerce fuerza para asegurar que el capstan arrastre el torón. Fuente: Elaboración propia	37
4.7. Sistema de frenado por catalina, (1) catalina, (2) cordel de freno y (3) ancla. Fuente: Elaboración propia	40
4.8. Sistema de placas o barras aisladas detectoras de cortes de alambre. Fuente: Elaboración propia en base a [3]	42
4.9. Sistema de detección de alambre cortado luego de la formación del torón. Fuente: Elaboración propia en base a [3]	43
4.10. A la izquierda se observa un sistema de freno mediante una cadena con insertos, a la derecha se observa un cordel de freno tenso alrededor de una catalina Fuente: Elaboración propia en base a [3]	44
4.11. Diseño conceptual del estanque de grasa Fuente: Elaboración propia	45
4.12. Diseño conceptual del sistema de control de tensión en el take up Fuente: Elaboración propia	46
4.13. Sistema de control de tensión mediante rodillo <i>Dancer</i> . Fuente: Elaboración propia	47
4.14. Diseño conceptual del sistema mecánico de control de tensión de freno en bobinas Fuente: Elaboración propia	49
4.15. Geometría y condiciones de borde a considerar en el modelo de transferencia de calor. Fuente: Elaboración propia	50
4.16. Discretización de la región a modelar. Fuente: Elaboración propia	51
4.17. Distribución de temperaturas en el estanque sin aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia	53
4.18. Distribución de temperaturas en el estanque con un recubrimiento aislante de lana de vidrio. Fuente: Elaboración propia	54
4.19. Dimensiones sensor ultrasonico UGT584. Fuente: [4]	55
4.20. Isométricas sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia	56
4.21. Variación en la trayectoria del cable producto del aumento del radio en el carrete. Fuente: elaboración propia	57
4.22. Disposición equipo controlador de tensión durante el enrollado de cables. Fuente: Elaboración propia	58
4.23. Fuerzas que actúan al desenrollar la bobina. Fuente: Elaboración propia	59
4.24. Diagrama de cuerpo libre freno de banda. Fuente: [5]	59
4.25. Variación en la tensión del alambre según el radio de extracción, cuando existe una fuerza de frenado constante Fuente: Elaboración propia	60
4.26. Variación en la tensión del torón según el radio de extracción, al usar el controlador de tensión . Fuente: Elaboración propia	64
4.27. Elemento tensor para la máquina T0632 . Fuente: Elaboración propia	64
4.28. Diseño y medidas del resorte de tracción para la máquina T0632. Fuente: Elaboración propia	65

4.29. Diseño y montaje de sistema mecánico de control de freno para la máquina T0632. Fuente: Elaboración propia	66
4.30. Fotografía de la bobinadora B0713B perteneciente a la miniplanta IDB, se muestran los distintos componentes y su disposición Fuente: Elaboración propia	67
4.31. Fotografía de la bobinadora B1027C perteneciente a la miniplanta IDB, se muestran los distintos componentes y su disposición Fuente: Elaboración propia	68
4.32. Fotografía de la bobinadora B1045A perteneciente a la miniplanta PALA, se muestran los distintos componentes y su disposición Fuente: Elaboración propia	69
4.33. Conjunto polea cuentametros cabezal tipo 1. Fuente: Elaboración propia. . .	70
4.34. Polea modificada con placas de Ertalon. Fuente: Elaboración propia.	70
4.35. Mesa de rodillos aislada eléctricamente. Fuente: Elaboración propia.	71
4.36. Polea a aislar en bobinadora de PALA. Fuente: Elaboración propia.	72
4.37. Conjunto eje aislado, a la izquierda se muestra el rediseño del eje y a la derecha el eje con los componentes aislantes. Fuente: Elaboración propia.	73
4.38. Costo y cantidad de no conformidades asociadas a engrase incorrecto Fuente: Elaboración propia.	77
4.39. Costo y cantidad de no conformidades asociadas a falta de torque en el take up. Fuente: Elaboración propia.	78
4.40. Costo y cantidad de no conformidades asociadas preformación inadecuada Fuente: Elaboración propia.	79
4.41. Esquema del controlador de tensión. Fuente: Elaboración propia	96
4.42. Dimensiones del controlador de tensión. Fuente: Elaboración propia	96
4.43. Diseño final del seguidor. Fuente: Elaboración propia	99
4.44. Diseño final del seguidor. Fuente: Elaboración propia	102

Índice de Tablas

2.1. Indicadores OEE y MO para las miniplantas de Pala e IDM Fuente: Elaboración propia en base a [6]	17
2.2. Indicadores OEE y MO para la miniplanta de IDM Fuente: Elaboración propia en base a [6]	18
2.3. Indicadores OEE y MO para la miniplanta de HPC&Almas Fuente: Elaboración propia en base a [6]	18
2.4. Indicadores OEE y MO esperados para las miniplantas de Pala e IDM Fuente: Elaboración propia en base a [6]	19
2.5. Indicadores OEE y MO esperados para la miniplanta de IDB Fuente: Elaboración propia en base a [6]	19
2.6. Indicadores OEE y MO esperados para la miniplanta de HPC&Almas Fuente: Elaboración propia en base a [6]	20
3.1. Factor de tiempo	23
3.2. Factor de frecuencia. Fuente: Elaboración propia.	24
3.3. Impacto en calidad (I_c) Fuente: Elaboración propia.	24
3.4. Factor de probabilidad (F_P). Fuente: Elaboración propia a partir de [7]	25
3.5. Factor de exposición (F_E). Fuente: Elaboración propia en base a [7]	25
3.6. Factor de consecuencia (F_C). Fuente: Elaboración propia en base a [7]	26
3.7. Impacto en seguridad (I_s). Fuente:Elaboración propia	26
4.1. Actividades realizadas en la máquina T0712D Fuente: Elaboración propia	30
4.2. Evaluación de impacto de intervenciones en bobinado Fuente: Elaboración propia	34
4.3. Evaluación de impacto de intervenciones en torcido Fuente: Elaboración propia	38
4.4. Evaluación de impacto de actividades en cerrado Fuente: Elaboración propia	41
4.5. Ranking general de impacto en el proceso Fuente: Elaboración propia	41
4.6. Propiedades grasa asfáltica. Fuente: Elaboración propia en base a [8]	50
4.7. Datos de entrada para resolver el modelo.	52
4.8. Datos técnicos sensor ultrasónico. Fuente: Elaboración propia en base a [4]	55
4.9. Datos técnicos calefactor y sensor de temperatura bandeja de aplicación	56
4.10. Datos de entrada para cálculos cinemáticos del controlador de tensión	62
4.11. Tabla resumen con la deformación total del resorte	63
4.12. Especificaciones técnicas resorte	63
4.13. Cálculos tensión seguidor curvo	63
4.14. Especificaciones técnicas para diseño del resorte Fuente: Elaboración propia	65
4.15. Ventajas y desventajas para mejoras en bobinado Fuente: Elaboración propia	71

4.16. Máquinas para realizar upgrade en el Take up Fuente: Elaboración propia . . .	74
4.17. Configuración evaluada para cada una de las máquinas Fuente: Elaboración propia	75
4.18. Ahorro económico por concepto de energía para el sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia.	76
4.19. Ahorro HH por mejora en el sistema de lubricación Fuente: Elaboración propia.	77
4.20. Ahorro de HH por instalar el sistema de ajuste automático de freno. Fuente: Elaboración propia.	80
4.21. Ahorros por incluir el sistema de detección de alambres cortados en bobinado Fuente: Elaboración propia	81
4.22. Costos "Mejoras en el sistema de lubricación de torones"Fuente: Elaboración propia	82
4.23. Costos " Control automático de torque en take up" Fuente: Elaboración propia	82
4.24. Costos "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras "Fuente: Elaboración propia	82
4.25. Costos "Detección de cortes de alambre en bobinado"Fuente: Elaboración propia	82
4.26. Costos "Motorización independiente para Take up "Fuente: Elaboración propia	83
4.27. Flujo de caja "Mejoras al sistema de lubricación"Fuente: Elaboración propia	84
4.28. Indicadores de evaluación para "Mejoras en el sistema de lubricación"	84
4.29. Flujo de caja "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras"Fuente: Elaboración propia	85
4.30. Indicadores de evaluación para "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras"	85
4.31. Flujo de caja " Control automático de torque en take up" Fuente: Elaboración propia	86
4.32. Indicadores de evaluación para " Control automático de torque en take up" .	86
4.33. Flujo de caja "Detección de cortes de alambre en bobinado"Fuente: Elaboración propia	87
4.34. Indicadores de evaluación para "Detección de cortes de alambre en bobinado"	87
4.35. Proyecto de inversión Fuente: Elaboración propia	88
4.36. Factores A,m para distintos materiales Fuente [5]	100

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

Prodinsa es la única empresa en Chile que produce cables de acero, los cuales son utilizados para pesca, minería y maniobras de izaje.

El proceso productivo de la empresa se divide en tres fases principales: bobinado de alambre, torcido de torones y cerrado de cables. Actualmente estas etapas se llevan a cabo con una gran dependencia del operador de la máquina, el cual realiza labores de supervisión durante gran parte de la jornada; esto que se traduce en una reducida ocupación del operador durante el proceso, dado que solo actúa si se produce algún incidente.

Las principales causas de los problemas que aparecen en la manufactura de cables son: cortes de alambre en las distintas etapas del proceso, variaciones de tensión en las bobinas de torón y ordenado disparejo de los cables finales en las bobinas o carretes. Una detección automatizada y a tiempo de estos inconvenientes durante el proceso, permite liberar al operador de las tareas de supervisión y dedicarlo a actividades de mayor valor.

1.2. Motivación

La presente memoria tiene como motivación, estudiar el proceso de fabricación de cables de acero e investigar sobre nuevas tecnologías que puedan ser insertadas en el proceso, con el fin de independizar la calidad del producto, la seguridad y productividad del proceso, del factor humano y, de esta forma, disminuir los costos de producción de cables de acero de alta calidad.

1.3. Objetivo general

Reducir o eliminar la influencia del operador en la calidad del producto y la seguridad y productividad del proceso de fabricación de cables de acero, para liberar tiempo del operador utilizado actualmente en actividades que podrían ser automatizadas.

1.4. Objetivos específicos

- i Identificar las intervenciones del operador durante la producción .
- ii Identificar nuevas tecnologías de instrumentación y automatización, que permitan reemplazar labores efectuadas por un operador.
- iii Cuantificar el impacto de introducir tecnologías que reemplacen la intervención del operador.
- iv Seleccionar alternativas a desarrollar.
- v Desarrollar propuestas de mejoras tecnológicas enfocadas a la instrumentación y automatización de los procesos de producción de cables.
- vi Evaluar técnica-económicamente las propuestas de mejora.

1.5. Alcances

El presente trabajo se desarrolla en la empresa Prodinsa y considera los siguientes alcances:

- El análisis se lleva a cabo en los tres procesos principales de la producción de cable, es decir: bobinado de alambre, torcido de torones y cerrado de cables.
- El trabajo considera el análisis, propuestas y desarrollo de soluciones; las cuales engloban principalmente soluciones tecnológicas.
- El proyecto contempla generar un diagnóstico de problemas, oportunidades y propuestas de solución para las distintas máquinas de la empresa.
- La ingeniería básica de las soluciones se realiza para una o dos máquinas representativas, dejando en claro los lineamientos de diseño para facilitar la replicación para las demás máquinas.
- La implementación de las soluciones propuestas queda fuera del proyecto de título.

Capítulo 2

Antecedente específicos

2.1. Componentes de un cable

Con el fin de disponer de un lenguaje común para asegurar un correcto entendimiento del presente trabajo, se estima necesario aplicar un definir conceptos para referirse a los componentes de cada cable. El cable de acero es una máquina simple, compuesta de un conjunto de elementos que transmiten fuerzas, movimientos y energía entre dos puntos, de una manera determinada para lograr un fin determinado. La Figura 2.1 muestra los distintos componentes de un cable de acero, los cuales se describen a continuación [1].

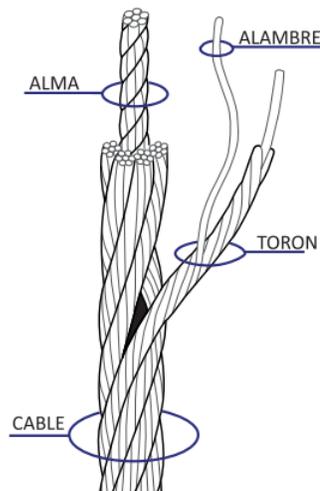


Figura 2.1: Componentes de un cable
Fuente: [1]

2.1.1. Alambre

Es el componente básico del cable de acero, el cual se fabrica en diversas calidades, según el uso al que se destine el cable final.

El alambre de acero es el componente básico del cable de acero. Se fabrica con acero de alto carbono de distintos grados o calidades, los cuales dependen de los requerimientos finales del cable.

Las calidades no sólo se refieren a la resistencia a la tracción, sino también a la resistencia a las torsiones axiales, plegados (o dobleces), y si están o no recubiertos con zinc (galvanizado). En el caso de los alambres galvanizados, existen normas para su recubrimiento con zinc, tanto en el espesor de la capa como en su concetricidad y adherencia.

Todas las características de los alambres de acero están especificadas en la Norma ISO 2232, que rigen para los cables.

2.1.2. Alma

Es el eje central del cable donde se enrollan los torones. Ésta puede ser de acero, fibra natural o de polipropileno. Su función es servir como base del cable, conservando su redondez, soportando la presión de los torones y manteniendo las distancias o espacios correctos entre sí.

Distintos tipos de almas para cables son:

- Fibras naturales.
- Fibras sintéticas.
- Torón de acero.
- Acero independiente.
- Acero plastificado.

2.1.3. Torón

Los torones están formados por un determinado número de alambres torcidos helicoidalmente en torno a un alambre central, y dispuestos en una o más capas. A cada configuración de cantidad y disposición de alambres se le llama construcción. Existen distintos tipos de construcción, las cuales se diferencian según la cantidad de alambres, número de capas, disposición y diámetro de alambres. Las construcciones más comunes de cables son Seal, Warrington, Warrington Seal y Filler Seal. Algunas de estas construcciones se muestran en la Figura [2.2](#)

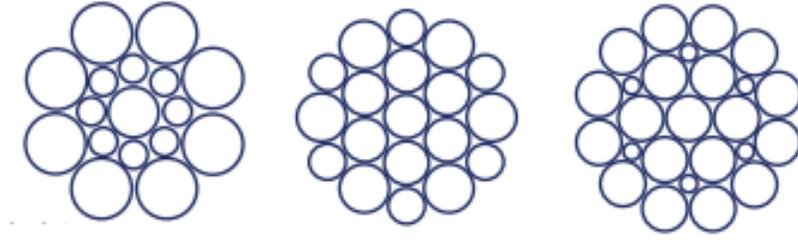


Figura 2.2: De izquierda a derecha las construcciones Seale, Warrington y Filler Seale.

Fuente: [1]

2.1.4. Cable

Se le llama cable de acero al producto final, constituido por el conjunto completo de torones torcidos en torno a un alma central. Se distinguen por su diámetro, construcción (cantidad de torones y alambres), tipo de alma, grado de alambre, tipo de lubricación, dirección de cableado (regular o cruzado, derecho o izquierdo (RD, RI, LD o LI)) y terminaciones opcionales (martillado, inyección de plástico, etc.).

En cuanto a las aplicaciones de los cables, éstas son clasificadas en dos grupos: estáticas y dinámicas. Las aplicaciones estáticas son aquellas en las que el cable permanece cargado constantemente, fijo en ambos extremos y no pasa por poleas ni tambores, como es el caso de los cables utilizados en puentes, postes, y antenas. Por otro lado, las aplicaciones dinámicas son aquellas en las que los cables están sometidos a cargas variables, recorren poleas y se enrollan en tambores, como en el caso de las palas mineras, ascensores y grúas en general. La Figura 2.3 muestra la vista en corte de un cable de acero.

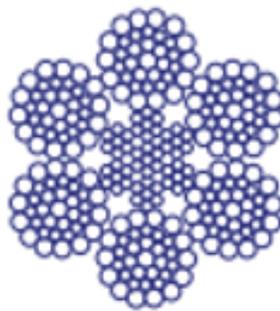


Figura 2.3: Cable compuesto por seis torones compuestos de 36 alambres cada uno, envolviendo un alma acero.

Fuente: [1]

2.2. Proceso de fabricación de cables de acero

La planta de cables se encuentra dividida en varias mini plantas independientes de producción y organizadas por el producto que fabrica cada una.

1. Mini planta Almas : Fabricación de las almas para los cables de acero.
2. Mini planta HPC : Fabricación de cables para la industria de la construcción.
3. Mini planta IDM : Fabricación de cables para la industria pesquera.
4. Mini planta IDB : Fabricación de cables para la industria portuaria.
5. Mini planta PALA : Fabricación de cables para la industria minera.

Estas miniplantas están compuestas por un grupo de máquinas y personas que trabajan en equipo. Los operarios son capaces de realizar más de una actividad productiva en línea, logrando así una gran flexibilidad y eficiencia, lo que permite suministrar cables, repuestos y servicios, con características técnicas de embalaje a la medida y necesidades del cliente, en un plazo de entrega menor al que normalmente ofrece el mercado.

El proceso de fabricación de cables de acero comienza con la preparación de bobinas con alambre de acero, las cuales son cargadas en las máquinas torcedoras para fabricar torones. Una vez que todos los torones necesarios para fabricar el cable son fabricados, se comienza con el proceso de cerrado, cuyo producto final es un cable terminado. La Figura 2.4 muestra una visión general del proceso de fabricación de cables de acero. A modo de complemento, a continuación se detallan los tres sub procesos necesarios para fabricar un cable de acero.

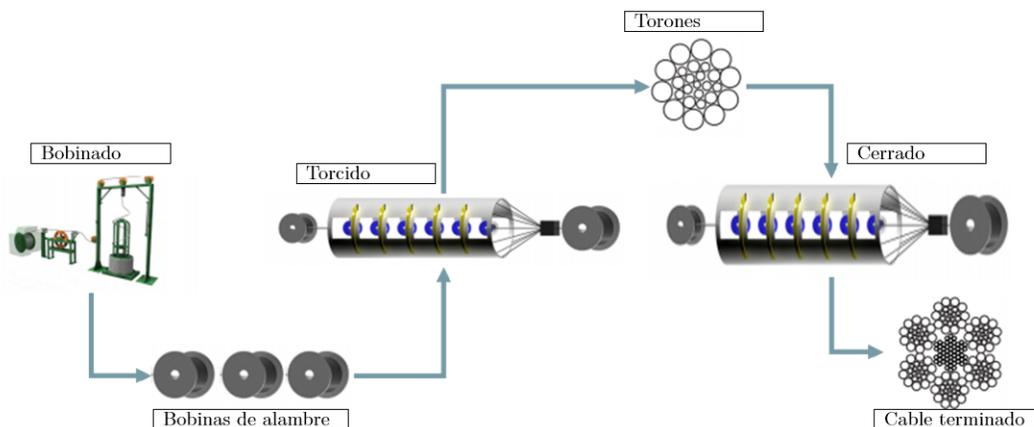


Figura 2.4: Esquema del proceso de fabricación de cables de acero.

Fuente: Elaboración propia en base a [1]

2.2.1. Bobinado

El bobinado es el primer sub proceso al cual se somete la materia prima para ser convertida en cables de acero y su objetivo principal es preparar las bobinas con alambre, necesario para fabricar los torones durante el proceso de torcido. Las bobinas son un componente de las máquinas torcedoras y cerradoras. La Figura 2.5 se muestra el esquema de una bobina y sus partes mas importantes.

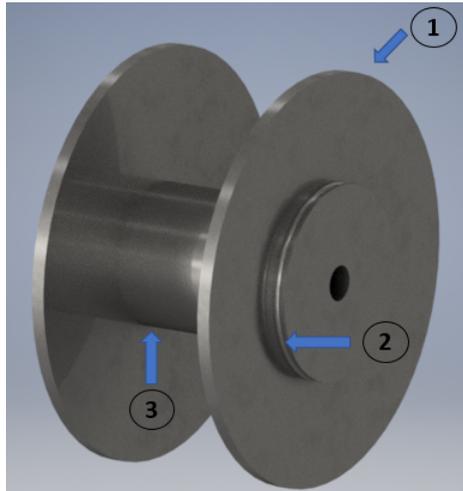


Figura 2.5: Esquema de una bobina (1) cara de la bobina, (2) catalina y (3) núcleo.

Fuente: Elaboración propia

El proceso de bobinado consiste en traspasar la cantidad necesaria de alambre desde un recipiente (entregado por el proveedor de materia prima) a la bobina correspondiente. Este proceso se lleva a cabo en las maquinas bobinadoras de alambre, las que consisten esencialmente en un motor, el cual es el encargado de hacer girar la bobina de tal forma que el alambre se enrolle sobre el núcleo de ésta al mismo tiempo que extrae el alambre desde el bulto de materia prima. adicionalmente existe un dispositivo encargado de distribuir el alambre de manera homogénea dentro de la bobina. La Figura 2.6 muestra a su izquierda una bobina instalada en la máquina bobinadora, con el ordenador de alambre funcionando (recuadro rojo), y a la derecha se observa el movimiento que realiza el mecanismo distribuidor de alambre.

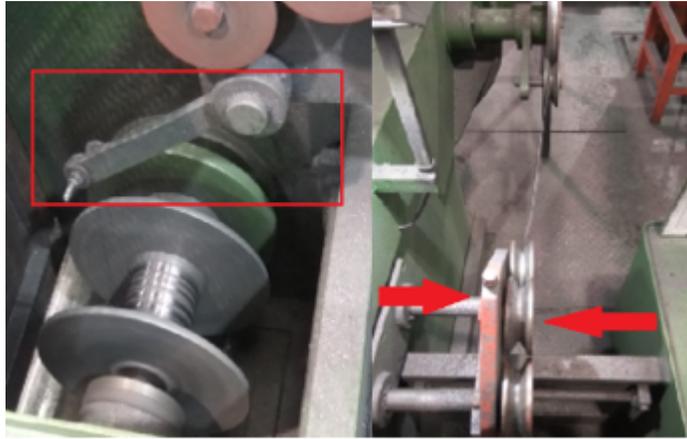


Figura 2.6: Mecanismo ordenador.
Fuente: Elaboración propia

Entre la salida del bulto de materia prima y la máquina bobinadora se encuentra una mesa de rodillos, cuya función es deformar mecánicamente el alambre con el fin de eliminar la vida de este¹. La Figura 2.7 muestra una mesa de rodillos con el alambre pasando entre ellos.



Figura 2.7: Mesa de rodillos para máquina bobinadora.
Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Torcido

El torcido es el proceso de conformación de torones. La conformación de torones consiste en disponer alambres de manera helicoidal y ordenada en capas en torno a un núcleo. Para esto se requiere coordinar un movimiento de rotación con otro de avance lineal, de manera que, los alambres se ubiquen en su única posición correcta y adquieran la forma helicoidal deseada. Todas las características físicas de un torón están definidas en una ficha técnica y deben ser logradas por medio del proceso de torcido [9].

¹Se define como vida del alambre la tendencia del mismo a enrollarse en una dirección arbitraria.

El proceso de torcido se hace en máquinas torcedoras, en las cuales, se carga cada uno de los alambres que conformará posteriormente el torón. Los alambres se cargan y enrollan en una bobina. La sección de la máquina destinada a recibir una bobina de alambre se denomina columpio.

La Figura 2.8 muestra la distribución de los componentes en una máquina tubular (para el caso de una maquina planetaria, la distribución es la misma, sólo que en vez del tubo están las órbitas). Donde: (1) es el pay off, (2) el tubo, (3) sistema de lubricación y dado de formación, (4) compactadores y postformadores, (5) capstan y (6) Take up y devanador.

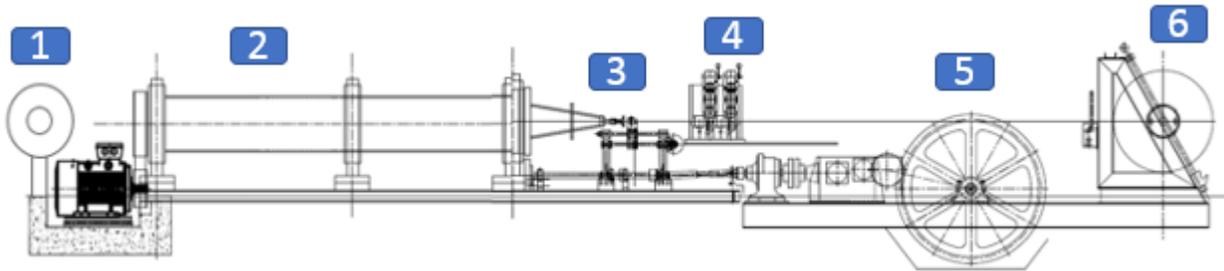


Figura 2.8: Esquema de partes de una máquina torcedora.

Fuente: Elaboración propia en base a planos.

A continuación, se describen las partes principales de una máquina torcedora.

- **Pay off:** Dispositivo ubicada atrás de la máquina torcedora, que tiene el propósito de sostener la bobina que contiene al elemento que toma la posición central en el torón. Excepcionalmente, para alambres centrales delgados, para algunas máquinas, el elemento central se carga en el primer columpio y donde el pay-off sostiene otro alambre de la construcción del torón.
- **Columpio:** Es el componente de la máquina torcedora destinado a recibir y sostener las bobinas cargadas con alambres (Figura 2.9). La cantidad de columpios en la torcedora determina la cantidad máxima de alambres que puede contener un torón fabricado en esa máquina.



Figura 2.9: Columpio de una máquina torcedora planetaria.

Fuente: Elaboración propia

- **Guías:** Corresponden a piezas que suelen ser rodillos o anillos de material de alta dureza y resistencia al desgaste, distribuidas a lo largo de la estructura principal de la torcedora, las que señalan la ruta única desde los columpios hasta el frente de la máquina para cada uno de los alambres (Figura 2.10). Además de definir la trayectoria de los alambres, las guías minimizan la fricción entre los alambres y la máquina en su viaje desde la bobina al punto de formación del torón.



Figura 2.10: Guías de alambre en una máquina tubular.

Fuente: Elaboración propia

- **Placa divisora:** Es una placa con agujeros, que distribuye los alambres de forma ordenada y sin cruces, para lograr que se ubiquen en la posición determinada durante el diseño según la construcción de éste (Figura 2.11).



Figura 2.11: Placa divisora para la distribución de alambres.
Fuente: Elaboración propia

- **Dado:** Es un elemento que fuerza a los alambres a tomar la posición correcta y definitiva, según la construcción geométrica, dentro del torón y con el menor roce posible. Se ubica en el punto de formación natural del torón, restringiendo el área en que los alambres se distribuyen (Figura 2.12). El dado es un bloque de acero, perforado con el diámetro del torón y partido por la mitad en uno de sus ejes de simetría. La ranura central es definida por diseño, en la mitad del eje de simetría y es específico para cada torón. Al tener el diámetro del torón fuerza a que los alambres reunidos tomen su posición recta y definida; que éste esté compuesto por dos mitades, permite su fácil instalación y desinstalación. Además, la forma del dado, tanto en la entrada como en la salida y en todos sus bordes, tiene radios de curvatura, que permiten que los alambres pasen a través de él, con el menor roce posible para evitar dañar la superficie de los alambres. La superficie del dado es pulida y rectificada, lo que ayuda a reducir el roce.
- **Sistema de Lubricación:** Consiste en un conjunto de dispositivos que permiten aplicar el lubricante al torón en el punto de formación. Posee de un estanque que contiene y licúa la grasa, manteniendo ésta última a una temperatura que permite su estado líquido. Para la recirculación de la grasa se utiliza una rueda semi sumergida que arrastra la grasa, aprovechando su viscosidad, parecido al mecanismo utilizado por los molinos de agua. Una vez que la grasa alcanza el punto más alto, cae sobre el punto de formación del torón a través de una canaleta inclinada. La Figura 2.13 muestra un sistema de lubricación de torones.



Figura 2.12: Dado de formación.
Fuente: Elaboración propia



Figura 2.13: Sistema de lubricación.
Fuente: Elaboración propia

- **Compactador:** Dispositivo mecánico encargado de reducir la sección transversal del torón a través de la aplicación de presión radial, que deforma el torón empujando el material hacia el centro. La Figura [2.14](#) muestra la comparación entre un torón sin compactar y uno compactado.

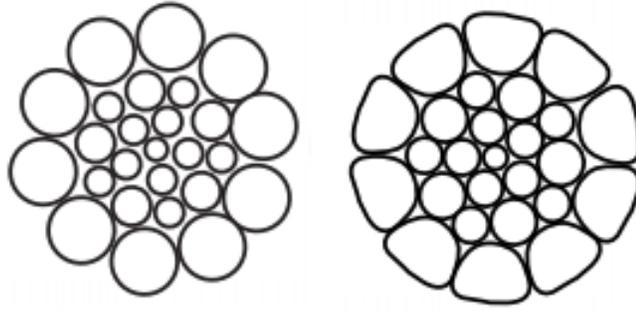


Figura 2.14: A la izquierda un torón sin compactar y a la derecha el mismo torón pero compactado. El torón compactado utiliza de manera más eficiente el área de la circunferencia inscrita.

Fuente: Elaboración propia en base a [1]

- **Postformador:** Utillaje compuesto por rodillos alineados y alternados, entre los cuales pasa el torón forzado a describir una trayectoria sinusoidal, cuya amplitud de onda va decreciendo. Un arreglo regular considera la utilización de dos postformadores en línea: uno para generar sinusoides en el sentido vertical y otro en sentido horizontal (Figura 2.15). La particularidad de éste utillaje es eliminar el torque interno del torón, es decir, eliminar la vida de éste.



Figura 2.15: Arreglo de postformadores dispuestos en distinta orientación.

Fuente: Elaboración propia

- **Capstan:** Dispositivo de tracción, en el cual se enrolla el torón para producir la fuerza de tiro, la cual hace avanzar los alambres a través de la máquina torcedora. Existen dos tipos principales: simple y liso, que consta de un sólo tambor o volante, en el cual se enrolla el torón y desliza lateralmente para avanzar desde la vuelta de entrada hasta la vuelta de salida; el otro es doble y acanalado, en el cual el torón se enrolla pasando por dos tambores donde, en cada paso de un tambor a otro, cambia de ranura para avanzar desde la ranura de entrada hasta la ranura de salida (Figura 2.16).



Figura 2.16: Capstan doble con ranuras, las flechas rojas indican la dirección en la cual es jalado el torón.

Fuente: Elaboración propia.

- **Devanador:** También conocido como ordenador o repartidor, es un dispositivo a través del cual pasa el torón y cuya finalidad es repartir o distribuir el torón homogéneamente a lo ancho de una bobina o carrete. Actúa desplazándose lateralmente, con un recorrido que lleva al torón entre cada extremo interior de la bobina (Figura 2.17).



Figura 2.17: Devanador electrónico.

Fuente: Elaboración propia.

- **Take up:** Dispositivo ubicado en frente de la máquina, destinado a recibir y enrollar en el carrete el torón que se está fabricando. Además, éste genera la tensión necesaria del torón a la salida del capstan para lograr el abrazamiento que, a su vez, necesita el capstan para ejercer su función de tiro.

Torcedora tubular

Las torcedoras tubulares están compuestas por un tubo giratorio, dentro del cual se disponen las bobinas, en columpios situados sobre el eje de giro (Figura 2.18). En este tipo de máquinas el alambre se enhebra por guías fijadas al tubo, de esta forma, el tubo es el encargado de torcer los alambres para formar el torón.

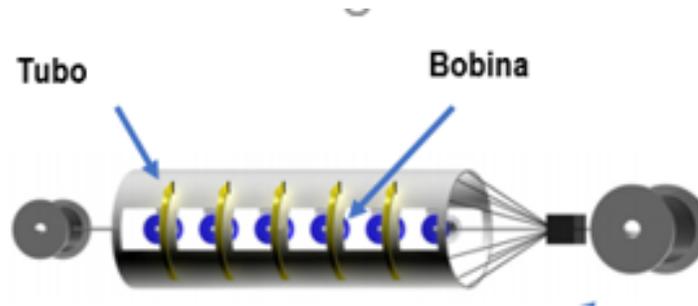


Figura 2.18: Distribución de bobinas en máquina tubular.

Fuente: Elaboración propia en base a [1]

Torcedora planetaria

Las torcedoras planetarias cumplen la misma función que las torcedoras tubulares, con la diferencia principal de que las bobinas se ubican sobre columpios dispuestos fuera del eje de giro, orbitando alrededor de éste. Esta disposición de las bobinas permite reducir el tamaño de la máquina, pero a su vez los componentes deben ser más resistentes debido a que el peso de la estructura se distribuye alrededor del eje de giro, aumentando el momento de inercia de la máquina.

A lo largo de toda la estructura, las bobinas se agrupan en arreglos denominados órbitas (Figura 2.19), las cuales se unen entre ellas mediante acoples mecánicos. A modo de ejemplo una máquina planetaria de 36 bobinas y 6 bobinas por órbita tiene un total de 6 órbitas, es decir, 5 acoples mecánicos.

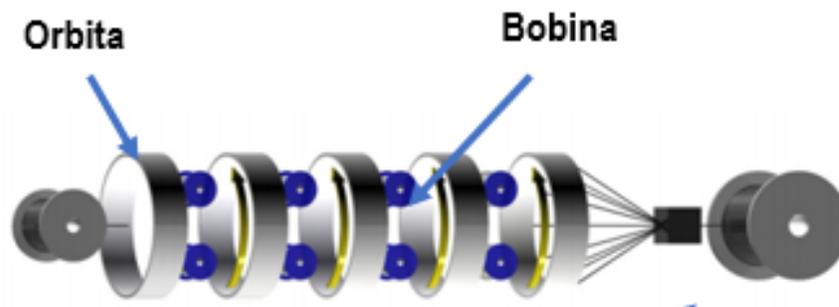


Figura 2.19: Distribución de bobinas en máquina planetaria .

Fuente: Elaboración propia en base a [1]

2.2.3. Cerrado

Durante el cerrado los torones de alambre son torcidos alrededor del alma con el fin de obtener un cable cerrado y listo para su uso. Las máquinas utilizadas en este proceso trabajan sobre el mismo principio que las máquinas torcedoras, con la salvedad de que utilizan bobinas de torón y no de alambre [2].

Un punto a destacar es que las maquinas cerradoras poseen un preformador en lugar de una placa divisora, el cual se encarga de preformar la hélice que debe realizar el torón, con el fin de reducir el esfuerzo al que es sometido en el cerrado. En la Figura 2.20 se aprecia un preformador de máquina cerradora, donde los rodillos son los encargados de determinar la trayectoria del torón para así formar la hélice.

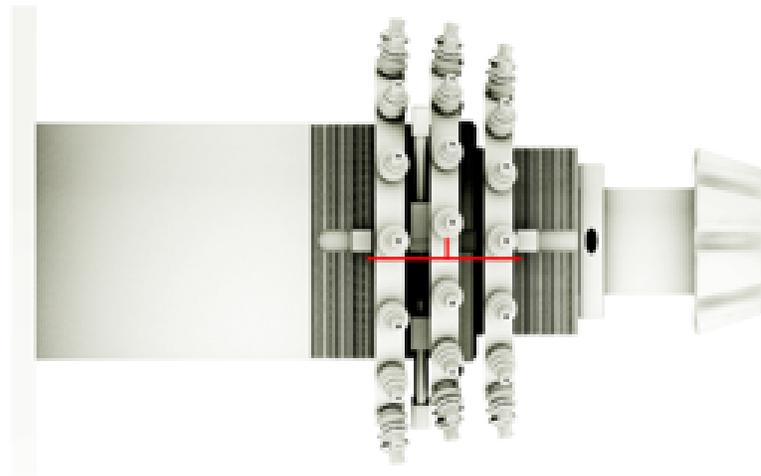


Figura 2.20: Preformador máquina cerradora .
Fuente: Cerrado de cables [2]

2.3. Proyecto BBMS: Aumento en la productividad

A comienzos del año 2017 la empresa Prodinsa comenzó un proyecto hacia la excelencia operacional llamado BBMS (*Bridon - Bekaert manufacturing system*). Un componente importante del BBMS consiste en la disminución de los costos de producción, para alcanzar este objetivo; se realizó un diagnóstico con el fin de: evaluar el estado actual de los niveles de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*, Eficiencia efectiva de los equipos) y MO (*Man occupation*, Ocupación hombre) en la planta de cables [6]. Las ecuaciones 2.1 y 2.2 muestran como se calculan estos indicadores.

$$OEE = \frac{\text{Horas de funcionamiento reales máquina}}{\text{Horas de funcionamiento planificadas máquina}} \quad (2.1)$$

$$MO = \frac{\text{Horas hombre de intervención en el proceso}}{\text{Horas hombre disponibles}} \quad (2.2)$$

La primera etapa del estudio consistió en identificar donde se deben aplicar las mejoras en productividad; para esto, se evaluó la existencia de cuellos de botella en la producción, los resultados arrojaron que ninguna de las máquinas de la empresa son consideradas cuellos de botella (OEE menores al 95 %), por lo cual las mejoras en productividad deben ser enfocadas a maximizar la ocupación hombre. En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran los porcentajes de OEE y MO de las distintas máquinas.

Tabla 2.1: Indicadores OEE y MO para las miniplantas de Pala e IDM
Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	OEE Real [%]	MO Real [%]
Pala	B504	40	23
Pala	B505	40	23
Pala	P3625	30	42
Pala	P4824	62	43
Pala	P0855	10	23
IDM	B500	34	25
IDM	B501	34	25
IDM	B502	34	25
IDM	B503	34	25
IDM	B1027	34	25
IDM	T2518A	21	77
IDM	T2518B	26	78
IDM	T4116	22	57
IDM	T4116B	15	67
IDM	T4118	19	66
IDM	T0840	12	56

Con el fin de aumentar los niveles de MO en la planta de cables, se hizo una medición de tiempos de las distintas acciones necesarias para la preparación de una máquina (Setup). Ésta medición de tiempos permitió generar el WLM (*Work load model*, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es tener una referencia clara de la cantidad de HH necesarias para la producción de cables de acero.

Una vez generado el WLM, se generó una propuesta de una nueva metodología de trabajo ligada a la polifuncionalidad de los operadores y ocupando las HH disponibles sólo para las labores de Setup, evitando la labor de supervisión que realiza el operador una vez que la máquina se encuentra en funcionamiento. Dicha propuesta considera generar distintas estaciones de trabajo, donde uno o más operadores tienen cargo un grupo de máquinas. Las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 muestran los nuevos puestos de trabajo, las máquinas por las que están compuestos y los valores esperados de OEE y MO.

Tabla 2.2: Indicadores OEE y MO para la miniplanta de IDM
Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	OEE Real [%]	MO Real [%]
IDB	B506	78	40
IDB	B802	78	40
IDB	B801	78	40
IDB	B702	78	40
IDB	B701	78	40
IDB	B700	78	40
IDB	T2512	36	63
IDB	T2518C	23	69
IDB	T3612A	22	63
IDB	T3612C	17	81
IDB	T0632	25	51
IDB	T0733	10	39

Tabla 2.3: Indicadores OEE y MO para la miniplanta de HPC&Almas
Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	OEE Real [%]	MO Real [%]
HPC&ALMAS	B1040A	34	29
HPC&ALMAS	B1040B	34	29
HPC&ALMAS	B600	34	29
HPC&ALMAS	B800	34	29
HPC&ALMAS	B803	34	29
HPC&ALMAS	B601	34	29
HPC&ALMAS	B601	34	29
HPC&ALMAS	T0622	10	13
HPC&ALMAS	T0710A	34	31
HPC&ALMAS	T0710B	38	33
HPC&ALMAS	T0712A	40	37
HPC&ALMAS	T0712B	16	15
HPC&ALMAS	T0712C	41	37
HPC&ALMAS	T0712D	60	49
HPC&ALMAS	T0712E	50	45
HPC&ALMAS	T0912	18	35
HPC&ALMAS	T0922	34	34
HPC&ALMAS	T1810	50	62
HPC&ALMAS	T1812	25	44
HPC&ALMAS	T2410	38	55
HPC&ALMAS	T2512B	36	60
HPC&ALMAS	P1825BT	15	25
HPC&ALMAS	P4225	26	26
HPC&ALMAS	T0716	4	13
HPC&ALMAS	T0725	14	32
HPC&ALMAS	T1222	15	17

Tabla 2.4: Indicadores OEE y MO esperados para las miniplantas de Pala e IDM
 Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	Puesto de trabajo	OEE esperado [%]	MO esperado [%]
Pala	B504	1	54	30
Pala	B505	1	54	30
Pala	P3625	2	39	55
Pala	P4824	2	65	44
Pala	P0855	2	21	43
IDM	B500	3	45	32
IDM	B501	3	45	32
IDM	B502	3	45	32
IDM	B503	3	45	32
IDM	B1027	3	45	32
IDM	T2518A	4	23	83
IDM	T2518B	5	28	83
IDM	T4116B	4	18	76
IDM	T4118	4	22	73
IDM	T0840	6	16	67

Tabla 2.5: Indicadores OEE y MO esperados para la miniplanta de IDB
 Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	Puesto de trabajo	OEE esperado [%]	MO esperado [%]
IDB	B506	3	73	40
IDB	B802	3	73	40
IDB	B801	3	73	40
IDB	B702	3	73	40
IDB	B701	3	73	40
IDB	B700	3	73	40
IDB	T2512	6	39	67
IDB	T2518C	5	27	75
IDB	T3612A	5	25	71
IDB	T3612C	5	19	87
IDB	T0632	6	30	57
IDB	T0733	4	15	55

Tabla 2.6: Indicadores OEE y MO esperados para la miniplanta de HPC&Almas
Fuente: Elaboración propia en base a [6]

Miniplanta	Máquina	Puesto de trabajo	OEE esperado [%]	MO esperado [%]
HPC&ALMAS	B1040A	7	45	37
HPC&ALMAS	B1040B	7	45	37
HPC&ALMAS	B600	7	45	37
HPC&ALMAS	B800	7	45	37
HPC&ALMAS	B803	7	45	37
HPC&ALMAS	B601	7	45	37
HPC&ALMAS	B602	7	45	37
HPC&ALMAS	T0710A	10	43	38
HPC&ALMAS	T0710B	10	46	39
HPC&ALMAS	T0712A	9	40	37
HPC&ALMAS	T0712B	8	31	27
HPC&ALMAS	T0712C	8	48	42
HPC&ALMAS	T0712D	10	61	51
HPC&ALMAS	T0712E	10	54	48
HPC&ALMAS	T0912	8	29	53
HPC&ALMAS	T0922	9	34	34
HPC&ALMAS	T1810	8	52	62
HPC&ALMAS	T1812	8	31	53
HPC&ALMAS	T2410	9	42	58
HPC&ALMAS	T2512B	9	36	60
HPC&ALMAS	P1825BT	11	25	37
HPC&ALMAS	P4225	11	36	32
HPC&ALMAS	P0716	10	13	35
HPC&ALMAS	P0725	11	26	47
HPC&ALMAS	T1222	11	32	32

Con el fin de poder cumplir con las metas del proyecto, se debe asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas sin la necesidad de la supervisión del operador, una vez que se haya concluido la etapa de setup.

2.4. Evaluación técnica-económica de proyectos

En los proyectos de ingeniería es necesario definir indicadores para la evaluación de su desempeño económico, de tal forma de tomar decisiones en base a indicadores cuantitativos. Los principales indicadores de proyectos son [10]:

2.4.1. Periodo de retorno de la inversión (PRI)

Este indicador calcula el tiempo en que el proyecto tarda en recuperar la inversión según la ecuación [2.3](#).

$$PRI = \frac{I_i}{A_i} \quad (2.3)$$

Donde I_i representa el costo de inversión y A_i el ahorro proyectado, mientras que el sub-índice i indica la propuesta a la cual representan.

El valor obtenido de PRI dependerá de la unidad de tiempo con la cual se representa el A_i .

2.4.2. Valor actual neto (VAN)

Este indicador corresponde a la suma de los flujos de efectivo del proyecto para un tiempo cero. Para un proyecto en el que se están evaluando N periodos, el VAN se calcula según la ecuación [2.4](#).

$$VAN_i = -I_i + \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+r)^j} \quad (2.4)$$

Donde F representa el flujo del proyecto en el periodo j , r y representa la tasa de descuento del proyecto, la cual aumenta en función del riesgo financiero y representa el valor del dinero en el tiempo. Un proyecto que retorne flujos de efectivo posee un VAN mayor a cero.

2.4.3. Tasa interna de retorno (TIR)

Este indicador se define como la tasa de interés a la que el proyecto posee VAN igual a cero. Luego, la TIR se puede calcular igualando a cero la ecuación [2.4](#) lo que resulta:

$$0 = -I_i + \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+TIR_i)^j} \quad (2.5)$$

Otra forma de entender la TIR es un porcentaje que mide la viabilidad de un proyecto o empresa, determinando la rentabilidad de los cobros y pagos actualizados generados por una inversión.

Capítulo 3

Metodología

La metodología de trabajo empleada para desarrollar los objetivos del proyecto es la siguiente::

3.1. Diagnóstico e identificación de oportunidades en planta

Esta etapa se desarrolla una recopilación de la información relativa al proceso de fabricación de cables de acero, se divide en las siguientes etapas:

- **Levantamiento de la condición actual en planta:** Corresponde a un levantamiento de los datos técnicos de cada máquina.
- **Identificación de puntos de intervención del operador en la máquina:** Contempla un seguimiento en terreno del proceso de fabricación de cables de acero, e incluye una descripción de las intervenciones, identificando riesgos (seguridad), consecuencias de no realizar la intervención (calidad) , tiempo utilizado y frecuencia con la cual se realiza la intervención (productividad).

3.2. Benchmark

Una vez identificados los puntos de intervención del operador durante el funcionamiento de la máquina, se procede a investigar si existe algún método automático o una nueva tecnología que permita evitar estas intervenciones y si actualmente se utiliza en alguna planta de BBRG (*Bridon-Bekaert the ropes group*).

Con el fin de realizar el intercambio de información se genera un formato tipo de consulta, donde se especifica:

- Intervención del operador, indicando su impacto en productividad, seguridad y calidad.
- Proceso en el cual se realiza.
- Especificaciones de la máquina a modificar.

Esta información se envía vía correo electrónico al encargado global de tecnologías de BBRG y los responsables de cada planta, donde se les solicita que informen si es que posee un sistema que automatice las intervenciones y en qué consiste éste.

3.3. Selección de oportunidades de mejora

Evaluación de impacto de intervenciones: Una vez realizado el levantamiento de intervenciones realizadas por el operador se debe realizar un primer filtro, con el fin de enfocarse en las oportunidades que generan un alto impacto. Para este motivo, se cuantifica su impacto en función de la productividad, la seguridad y la calidad.

- Impacto en productividad (I_p): Para medir el impacto en productividad se realizan mediciones en terreno correspondientes al tiempo asociado a la intervención y la frecuencia con la cual se realiza.

Con el fin de normalizar el impacto medido de cada intervención, se discretizan las mediciones en escalas ascendentes con valores de 1 a 5. La Tabla 3.1 muestra la escala discreta para medir el impacto en tiempo asociado a la intervención y de igual manera la Tabla 3.2 muestra la escala discreta para medir el impacto en frecuencia.

Tabla 3.1: Factor de tiempo

Descripción	Factor de tiempo (F_t)
La actividad no forma parte del procedimiento y no posee un tiempo asociado	1
La actividad demora en realizarse entre 0 y 30 segundos	2
La actividad demora en realizarse entre 30 segundos y 1 minuto	3
La actividad demora en realizarse entre 1 y 2 minutos	4
La actividad demora en realizarse entre 2 y 3 minutos	5

Tabla 3.2: Factor de frecuencia.
Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Factor de frecuencia (F_f)
De una vez a la semana a una vez por mes.	1
Por lo menos una vez por turno.	2
Entre 1 y 5 veces por turno.	3
Entre 5 y 10 veces por turno.	4
Más de 10 veces durante el turno.	5

Una vez realizada la discretización de la escala, el impacto en productividad queda determinado por la suma del factor de tiempo y el factor de frecuencia, según se determina por el equipo de ingeniería de BBRG Santiago :

$$I_p = F_t + F_f \quad (3.1)$$

- Impacto en calidad (I_c): Para medir el impacto en calidad, de las distintas intervenciones, se crea una escala discreta (ascendente, con valores 1 a 5) basada en el historial de no conformidades² de la planta de cables. La escala de impacto en calidad se puede apreciar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Impacto en calidad (I_c)
Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Impacto en calidad (I_c)
No hay impacto en calidad	1
No hay registro de no conformidades	2
Existen no conformidades asociadas a este problema en otras máquinas en los últimos 5 años	3
Existen no conformidades asociadas a este problema en otras máquinas este año	4
Existen no conformidades asociadas a este problema en esta máquina o similares ³	5

- Impacto en seguridad (I_s): Para evaluar el impacto en seguridad que significa realizar las distintas intervenciones durante el proceso, se utiliza el método "Fine & Kinney"⁴ el cual corresponde a una metodología cualitativa para cuantificar el riesgo de una actividad.

El método consiste en evaluar tres indicadores asociados al riesgo: probabilidad, exposición y consecuencia. Para esto, se le asigna a cada indicador un valor discreto tabulado

²Una no conformidad de proceso se define como cualquier producto con errores en la fabricación detectado antes de ser entregado al cliente; el historial de no conformidades registra la fecha en la cual se produjo, el motivo de la no conformidad, la máquina a la cual se adjudica y el costo monetario del producto perdido.

³Dos máquinas se consideran similares si: son de igual naturaleza (Tubular o planetaria), tienen igual función (torcedora o cerradora) y si su Take up es similar (Independiente o unido mecánicamente al tubo).

anteriormente:

- Probabilidad (F_P): La probabilidad hace referencia a la posibilidad de que ocurra un accidente en la labor a realizar. Para esto, se toma en consideración el registro de accidentes o cuasi accidentes ocurridos en los últimos tres años. Los valores para asignar la probabilidad se encuentran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Factor de probabilidad (F_P).
Fuente: Elaboración propia a partir de [7]

Descripción	Valor
Muy alta. Es esperado que el evento ocurra, es casi cierto que el evento ocurra.	100
Alta. Es completamente posible, no es nada extraño que el evento ocurra.	6
Mediana. Coincidencia muy rara, pero se sabe que ha ocurrido.	3
Baja. Sería una coincidencia rara, pero posible.	1
Muy baja. Coincidencia extremadamente remota pero concebible.	0,5
Extremadamente baja. Remotamente posible.	0,2
Coincidencia prácticamente imposible. Jamás ha ocurrido.	0,2

- Exposición (F_E): La exposición hace referencia a cuantas veces el operador se ve expuesto al riesgo, es decir, la frecuencia con la cual se realiza la acción riesgosa.

Tabla 3.5: Factor de exposición (F_E).
Fuente: Elaboración propia en base a [7]

Descripción	Valor
Continua. Muchas veces durante el turno.	10
Frecuente. Diariamente, por lo menos una vez por turno.	6
Ocasionalmente. De una vez a la semana a una vez al mes.	3
Irregularmente. De una vez al mes a una vez al año.	2
Raramente. Cada bastantes años.	1
Posible. No se sabe que haya ocurrido, pero no se descarta.	0,5

- Consecuencia (F_C): La consecuencia mide el peor daño que puede ocurrir al realizar la acción.

Tabla 3.6: Factor de consecuencia (F_C).
Fuente: Elaboración propia en base a [7]

Descripción	Valor
Catastrofica. Numerosas víctimas fatales. La empresa no puede funcionar, por lo menos, por un mes.	100
Desastrosa. Pocas víctimas fatales, la empresa no puede funcionar por algún tiempo.	40
Muy seria. Una muerte o incapacidad permanente total (depende de terceros para vivir).	15
Grave. Alto porcentaje de incapacidad o daño irreversible. Ej: amputación o pérdida de brazo o pierna.	10
Grave. Moderado porcentaje de incapacidad o daño irreversible. Incapacidad permanente parcial, no depende de terceros. Ej: amputación de una mano.	7
Grave. Bajo porcentaje de incapacidad o daño irreversible. Ej: amputación o pérdida de oreja, un dedo.	5
Importante Inadecuado para trabajo. Accidente con tiempo perdido.	3
Leve. Solo atención de policlínico, accidente con tiempo perdido.	1

Una vez asignados los valores de probabilidad, exposición y consecuencia, se calcula el riesgo total de la acción mediante la ecuación 3.2, según lo definido por el método Fine & Kinney [7]. Debido a que la escala Kinney puede tomar valores mayores a 400, la escala se discretiza en cinco rangos de riesgo, a los cuales se les asigna un valor de 1 a 5 para cuantificar su impacto en seguridad, tal como lo muestra la Tabla 3.7.

$$Riesgo = F_P \cdot F_E \cdot F_C \quad (3.2)$$

Tabla 3.7: Impacto en seguridad (I_s).
Fuente:Elaboración propia

Descripción	Impacto en seguridad (I_s)
Riesgo Kinney menor a 20.	1
Riesgo Kinney menor a 70 y mayor a 20.	2
Riesgo Kinney menor a 200 y mayor a 70.	3
Riesgo Kinney menor a 400 y mayor a 200.	4
Riesgo Kinney mayor a 400.	5

Una vez cuantificado el impacto en los distintos criterios, de todas las oportunidades de mejora encontradas en la primera etapa del proyecto se cuantifica el impacto total de cada oportunidad de mejora; para esto, se genera un ranking elaborando una suma directa de los tres indicadores 3.3 anteriormente descritos (productividad, calidad y seguridad), según recomendaciones del área de ingeniería de BBRG Santiago. Como resultado, se obtiene un ranking con un impacto total asignado a cada oportunidad, donde un valor de 20 corresponde al valor máximo de impacto y 4 al valor mínimo.

$$I_{total} = I_p + I_s + I_c \quad (3.3)$$

3.4. Desarrollo de propuestas

Ingeniería conceptual de alternativas de solución: La etapa de ingeniería conceptual desarrolla la generación de distintas alternativas de mejora basadas en los problemas identificados en las etapas anteriores, obteniendo los distintos principios de funcionamiento para cada una de las alternativas de mejora, así como la identificación de los equipos principales necesarios para llevar a cabo estas mejoras. Una vez generado el listado de alternativas, se realiza un análisis cualitativo de cada una de las alternativas propuestas, de tal manera de realizar un último filtro para pasar a la etapa de ingeniería básica de las alternativas.

Ingeniería básica de alternativas de solución: El primer paso a realizar en esta etapa consiste en seleccionar una o dos máquinas representativas de cada oportunidad de mejora, para la cual se desarrolla la solución seleccionada en la etapa de ingeniería conceptual. El diseño consiste en el dimensionamiento de los distintos componentes necesarios para el funcionamiento, además de identificar y esclarecer los lineamientos de diseño necesarios para replicar la solución en las demás máquinas.

3.5. Evaluación técnico-económica

La evaluación se realiza de manera independiente para cada una de las alternativas encontradas, cumpliendo las siguientes etapas.

- Evaluación técnica: Busca recopilar todos los requerimientos técnicos para llevar a cabo la alternativa presentada.
- Evaluación económica: La evaluación económica presenta datos cuantitativos para tomar la decisión de si realizar o no la inversión. Para esto, se realiza un flujo de caja que considera el costo de implementación de la mejora y sus beneficios económicos, de esta forma se calculan los indicadores de valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de retorno de la inversión (PRI).

Capítulo 4

Resultados

4.1. Oportunidades de mejora

4.1.1. Estado actual

Durante las primeras semanas de trabajo en planta se realiza un levantamiento de la condición técnica actual de todas las máquinas que considera el proyecto. Con el fin de clasificar todas las máquinas bajo un mismo estándar se utilizan los siguientes criterios, según el tipo de máquina:

Torcedoras y cerradoras

- **Operación:** Se indica si la máquina es usada como torcedora o cerradora. En caso de ser utilizada para las dos funciones, se considera el uso más recurrente según el historial de producción.
- **Tipo de máquina:** Se indica si la máquina es tubular o planetaria.
- **Enhebrado:** Criterio válido sólo para máquinas tubulares, donde se indica si los torones (alambres en el caso de torcedoras) recorren el tubo por su interior o por el exterior.
- **Tipo de Capstan:** Se registra si el capstan es simple o doble, liso o acanalado, y si posee movimiento independiente (motor independiente) o se encuentra unido mecánicamente al motor principal de la máquina.
- **Control de tensión de freno en bobinas:** Se registra el método por el cual se controla la tensión en las bobinas de torón (alambre en caso de máquinas torcedoras) dentro de la máquina.
- **Tipo de Take up:** Se indica si el Take up de la máquina posee movimiento independiente o si está unido mecánicamente al motor principal de la máquina.
- **Devanador:** Se indica el tipo de devanador que posee la máquina, el cual puede ser mecánico, eléctrico, hidráulico o el sistema *perfect winding*.
- **Estanque de grasa:** Se indica si la lubricación se realiza antes o después de formarse el torón.

- Alarmas de proceso: se indica la cantidad, ubicación y tipo de las distintas alarmas que posee la máquina.

Bobinadoras

- Sensor de alambre cortado: Se indica si la máquina posee un detector de alambres cortados; en caso de poseer, se indica la ubicación de éste.
- Devanador: Se indica el tipo de devanador que posee la máquina, el cual puede ser mecánico, eléctrico o hidráulico.
- Frenos: Se indica si la máquina bobinadora posee freno o se efectúa la detención por inercia.

El listado completo de la condición actual de las distintas máquinas de la empresa se encuentra en la sección de anexos, en el Anexo N°1.

4.1.2. Intervención del operador

Durante el seguimiento en terreno se realiza un “shadowing⁴” a los distintos operadores encargados del funcionamiento de la máquina a observar, de ésta forma se permite recopilar información sobre las intervenciones que se realizan una vez que se encuentra terminado el proceso de setup, los datos que se recopilan engloban: tiempo, lugar, motivo y frecuencia de la intervención. Con el fin de ordenar y asegurar el cumplimiento del seguimiento en terreno a todas las máquinas, se prepara una carta gantt para ésta etapa, la cual se basó principalmente en la disposición de las máquinas dentro de la fábrica, con el fin de poder realizar seguimiento a más de una máquina al mismo tiempo.⁵

Durante el seguimiento se registran todas las intervenciones a la máquina durante el turno, tomando en cuenta el tiempo de intervención, la frecuencia con la cual se realiza y si se realiza con la máquina funcionando o no. La tabla [4.1](#) muestra una planilla de ejemplo con los datos del seguimiento realizado a la máquina T0712D.

Al finalizar ésta etapa se encuentra que la intervención del operador durante el funcionamiento de la máquina, se puede clasificar en dos grupos principales: actividades de procedimiento (ajuste de parámetros en la máquina luego de cierto metraje o tiempo de giro) y actividades circunstanciales (el operador pasa gran parte del tiempo monitoreando el correcto funcionamiento de la máquina con el fin estar ahí en caso de cualquier falla no prevista).

⁴El Shadowing, también llamado “en la sombra del usuario”, es una manera empírica y práctica de aprender de la conducta de una persona a la que se acompaña.

⁵Con el fin de agilizar la etapa del levantamiento de datos en terreno, se utiliza como representativo el levantamiento realizado en máquinas similares, por lo cual hay máquinas a las cuales no se les realiza un seguimiento.

Tabla 4.1: Actividades realizadas en la máquina T0712D

Fuente: Elaboración propia

Máquina : T0712D			
Nº	Actividad	Tiempo [min]	Frecuencia
1	Descargar bobinas.	01:15	Setup
2	Cargar bobinas.	01:15	Setup
3	Fijar bobina a columpio.	00:30	Setup
4	Tensar frenos de bobinas.	01:20	Setup
5	Enhebrar tubo.	02:00	Setup
6	Cambiar engranajes de paso.	06:00	Setup
7	Cambiar sentido de giro.	15:00	Setup
8	Colocar dado.	06:00	Setup
9	Regular distancia preformador.	05:00	Setup
10	Montar bobina take up.	00:45	Varias veces por turno
11	Cargar bobina take up.	00:30	Varias veces por turno
12	Chequear especificaciones del torón.	03:00	Una vez por orden
13	Compactar torón.	05:00	Setup
14	Enrollar torón en bobina frontal.	00:45	Varias veces por turno
15	Tensar torón en el take up.	00:15	Varias veces por turno
16	Ubicar alarmas de alambre cortado.	03:00	Setup
17	Ubicar estrujador de grasa.	01:00	Setup
18	Soldar alambre.	01:30	Setup
19	Usar soplete en el sistema de lubricación.	01:30	Varias veces por turno
20	Limpiar compactadores.	01:15	Varias veces por turno
21	Recargar lubricante.	07:00	Una vez por turno
22	Revisar barras de alambre cortado.	00:30	Setup

4.2. Selección de oportunidades de mejora

Como uno de los objetivos principales del proyecto es liberar el tiempo que los operadores usan en intervenir la máquina mientras ésta se encuentra en funcionamiento, se descartan todas las actividades relacionadas al setup de la máquina. A continuación, se describen las intervenciones realizadas durante el funcionamiento de las máquinas correspondientes a los

tres procesos a estudiar.

4.2.1. Bobinado

Regular parámetros de ordenado

La calidad del proceso de bobinado se mide principalmente en una distribución homogénea de alambre al interior de la bobina, de tal manera de no producir variaciones de tensión bruscas en el alambre una vez que comienza el proceso de torcido, para así evitar el entrecruzamiento de alambres. La figura 4.1 muestra una bobina con desperfectos (izquierda) en el proceso, y otra con una distribución homogénea del alambre (derecha).



Figura 4.1: Comparación de bobina defectuosa con una correctamente bobinada.
Fuente: Elaboración propia

Actualmente existen tres tipos de sistemas de ordenado que se utilizan en las máquinas bobinadoras de BBRG Santiago, las cuales son:

- Ordenador hidráulico: Un motor hidráulico hace girar un sinfín sobre el cual se mueve el distribuidor de alambre, para que el distribuidor pueda moverse en ambas direcciones, el motor hidráulico cambia su sentido de giro mediante el uso de interruptores de fin de carrera.
- Ordenador mecánico con actuador neumático: El eje sobre el cual se mueve el distribuidor de alambre es un eje liso que se encuentra unido a través de correas con el motor central de la máquina bobinadora. El distribuidor se mueve a lo largo del eje gracias al arrastre que produce el eje con el buje del distribuidor, el buje del distribuidor posee un anillo interior en V (Figura 4.2) de tal forma de poder mover el distribuidor en distintas direcciones según como se apoya contra el eje; para cambiar el sentido de giro se utiliza un cilindro neumático, el cual cambia la posición del buje. Para que el ordenador se mueva con una velocidad homogénea en las dos direcciones el buje se debe encontrar totalmente centrado, lo cual no siempre es así ya que se observa que, para distintas

máquinas, la velocidad del ordenador es distinta (girando a la misma velocidad). La Figura 4.3 muestra cómo funciona el mecanismo de arrastre.

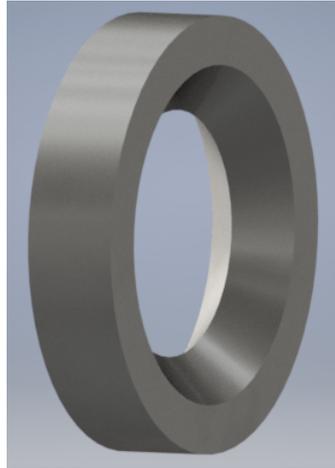


Figura 4.2: Buje con anillo interior en V.
Fuente: Elaboración propia

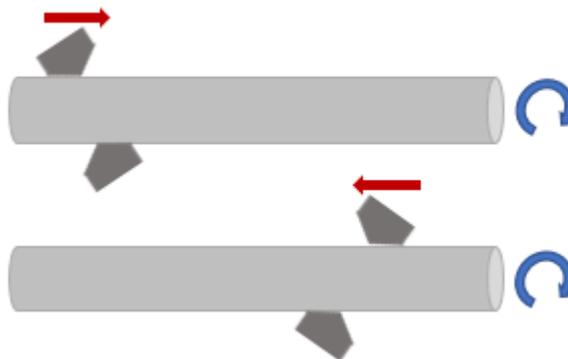


Figura 4.3: Funcionamiento del devanador mecánico con actuador neumático. En azul se muestra el sentido de giro del eje y en rojo el movimiento del buje según su posición
Fuente: Elaboración propia

- Ordenador mecánico sin actuador: Éste tipo de ordenador utiliza un mecanismo biela - manivela, el cual permite un movimiento horizontal recíprocante, adecuado para la repartición del alambre. Para éste tipo de sistema no es posible ajustar la velocidad horizontal con la que se mueve el ordenador, además de que es necesario intervenir una parte móvil de la máquina (durante el funcionamiento de ésta) para ajustar el recorrido del ordenador.

Para asegura un ordenado parejo del alambre, se debe manipular:

- La trayectoria del ordenador: debido a que las bobinas poseen distintas medidas, el operador debe ajustar la distancia (horizontal) que recorre el ordenador de alambre de tal manera que se ocupe todo el espacio disponible en la bobina. En máquinas con

devanador hidráulico y mecánicas con actuador neumático, la distancia de ordenado se ajusta mediante el movimiento de dos fines de carrera que al ser accionados permiten cambiar el sentido del movimiento del ordenador. El principal problema de éste sistema es que la posición de los fines de carrera no está a la vista del operador y el movimiento de éstos se realiza mediante unas perillas, las cuales no poseen medidas ni parámetros a seguir; por lo tanto, un ajuste correcto de la distancia de ordenado depende de la experiencia del operador, y se logra mediante ensayo y error una vez que el proceso está en marcha. En el caso de bobinadoras con ordenador mecánico sin actuador, el ajuste se realiza manualmente acortando o alargando el brazo del repartidor.

- La velocidad de movimiento del ordenador: la velocidad del ordenador es necesaria para asegurar que, a medida que la bobina se va llenando, el tiempo en el que el repartidor completa una vuelta debe ir aumentando; de tal manera de asegurar que el alambre alcanza a recorrer una vuelta completa antes que el ordenador cambie de posición. En los sistemas mecánicos de ordenado, el operador no puede modificar la velocidad con la cual se mueve el ordenador, ya que ésta depende de la velocidad con la cual gira la bobina; lo que permite que para distintos diámetros de alambre se tenga la misma velocidad de repartición. En las bobinadoras que poseen ordenador hidráulico, la velocidad se puede modificar aumentando o disminuyendo la potencia de la central hidráulica; sin embargo la variación de velocidad solo se sustenta en la experiencia del operador.

Corte de alambre

Al realizar el levantamiento de condición actual de máquina, se observa que no todas las máquinas bobinadoras poseen alarmas de alambre cortado y que el sistema usado (en las que poseen) no funciona correctamente.

El detector de alambre cortado funciona en base a la conductividad eléctrica del alambre; para ésto, se aísla eléctricamente la mesa de rodillos y un relé registra si existe masa⁶ entre la mesa de rodillos y el resto de la máquina. Al perderse éste contacto eléctrico (corte o falta de alambre), el relé se activa deteniendo la máquina, (Figura 4.4). En ésta Figura (1) representa el bulto de materia prima, (2) la mesa de rodillos y (3) la máquina bobinadora. Al existir alambre entre (1) y (2), éste cierra el circuito eléctrico (línea negra) y permite el funcionamiento de la máquina. Ante un corte del alambre, el circuito queda abierto y la máquina se detiene; sin embargo si el corte de alambre se produce entre (2) y (3) y el alambre sigue haciendo contacto entre (1) y (2), el sistema no detecta el corte de alambre.

⁶De manera genérica la masa es simplemente una vía de retorno hacia la fuente eléctrica, la corriente en un circuito siempre tiene que volver de alguna manera u otra hacia la fuente.

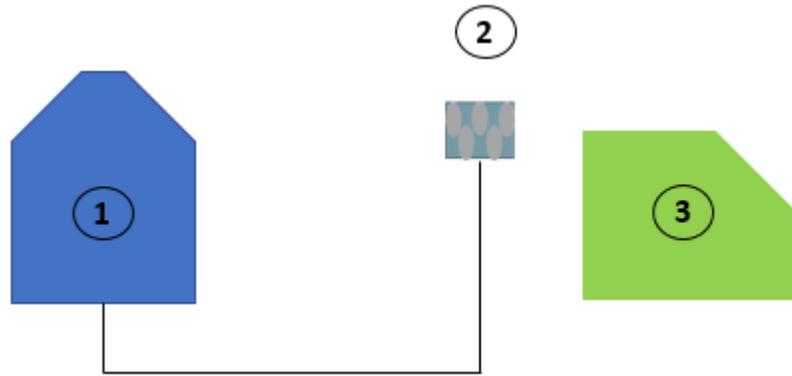


Figura 4.4: Sistema de alambre cortado en máquinas bobinadoras
Fuente: Elaboración propia

Debido a que la mayoría de los cortes de alambre se producen en la mesa de rodillos (debido a la deformación mecánica a la cual se somete el alambre), esto provoca que la mayoría de los cortes de alambre no sean detectados ya que, una vez ocurrida la fractura, un extremo del alambre sigue en contacto con los rodillos (los rodillos ejercen presión para deformar el alambre), mientras que el otro extremo es jalado por la bobina que se encuentra girando. El extremo atrapado en la mesa de rodillos sigue cerrando el circuito eléctrico entre la máquina y la mesa, de tal forma que el sistema no detecta el corte de alambre. Es ahí donde el operador debe estar atento para detener la máquina cuando se produce un corte de alambre, el cual es detectado por el sonido que produce el extremo libre de alambre al golpear la máquina bobinadora.

Al evaluar el impacto de éstas intervenciones se obtienen los siguientes resultados (tabla 4.2).

Tabla 4.2: Evaluación de impacto de intervenciones en bobinado
Fuente: Elaboración propia

Intervención	F_f	F_t	I_c	I_s	Impacto total
Corte de alambre en bobinado	4	5	1	1	11
Mejorar sistema de ordenado	5	2	2	1	10

4.2.2. Torcido

Sistema de lubricación

El sistema de lubricación funciona de la manera descrita anteriormente en la sección 2.2.2 y posee los siguientes problemas.

- Solidificación del lubricante: Debido a que la superficie del estanque se encuentra en contacto con el ambiente y la fuente de calor (junto con el sensor de temperatura) se

encuentran en la base del estanque, la temperatura del lubricante dentro del estanque no es homogénea, siendo mínima en la interfase lubricante-aire. Ésta disminución en la temperatura provoca un endurecimiento del lubricante, ocasionando que éste no escurra correctamente sobre el torón. Para solucionar éste problema, el operador calienta el lubricante mediante el contacto directo con la llama de un soplete a gas. Debido a que la mayoría de los lubricantes utilizados en la fabricación de cables de acero son a base de petróleo, éstos son de naturaleza inflamable. Por ende, el uso del soplete provoca una situación de riesgo.

- Falta de lubricante en el estanque: Debido a la limitación de espacio que existe para disponer componentes en la máquina, en muchos casos la capacidad del estanque no es suficiente para que funcione sin recargas durante todo un turno (incluso para toda una OF⁷), debido a ésto el operador debe monitorear (visualmente) la cantidad de lubricante que posee el estanque, para así efectuar a tiempo la recarga. En caso de que el operador no advierta la falta de lubricante, el cable (o torón) sigue fabricándose produciendo no conformidades o poniendo en riesgo la calidad del producto.
- Indicador de funcionamiento del sistema: El sistema de lubricación no posee un componente encargado de monitorear el funcionamiento del sistema de lubricación, es decir, si está o no aplicando el lubricante al torón. Debido a ésto, el sistema de lubricación funciona de manera totalmente independiente al resto de la máquina, siendo labor del operador detener la producción si el sistema de lubricación deja de funcionar.

Control de tensión en la bobina/carrete del take up

Para que el capstan logre tirar correctamente el torón/cable, se debe asegurar el abrazamiento del torón alrededor de éste, abrazamiento que es producto de la tensión que genera el take up. Debido a que la bobina/carrete del take up aumenta su peso (y su radio) a medida que avanza la producción, el torque necesario para mantener el take up en movimiento y asegurar el abrazamiento del torón sobre el capstan debe aumentar, lo cual se realiza manualmente por el operador.

En la planta de cables se utilizan dos tipos de take up, los cuales se detallan a continuación:

- Take up unido mecánicamente al motor principal de la máquina: En éste sistema el torque del take up proviene desde el motor principal de la máquina y es transmitido, por un sistema mecánico hasta el take up mediante un sistema de balatas (Figura 4.5), en la que (1) son balatas que deslizan sobre un disco (3) y mueven la bobina del take up, (2) son pernos para regular el apriete de las balatas y por ende el torque en el take up y (3) es un disco móvil unido mecánicamente al motor principal, el cual posee una velocidad constante durante todo el proceso, transmitiéndose un torque constante pero a velocidad variable. El torque se ajusta manualmente por parte del operador mediante el apriete de las balatas, y a mayor apriete mayor roce entre los discos y por consecuente mayor torque en el take up.

⁷Orden de fabricación, hace referencia todo el tiempo necesario para fabricar un producto.

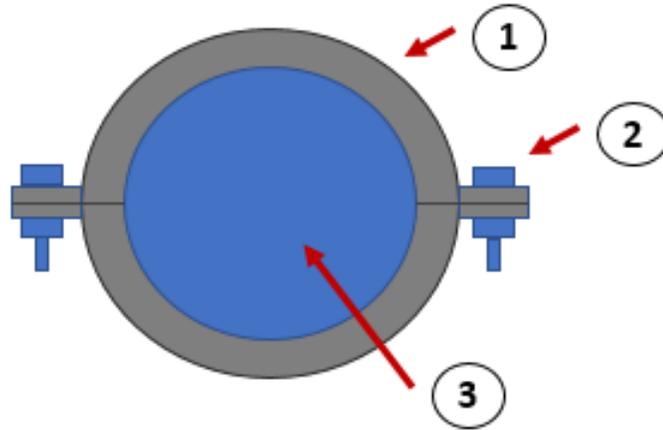


Figura 4.5: Sistema de transmisión de potencia por balatas
Fuente: Elaboración propia

- Take up independiente: En este tipo de sistemas el take up posee un motor (eléctrico o hidráulico) independiente al del motor principal de la máquina. Para efectuar el control de torque en este tipo de motores, se utiliza un potenciómetro junto a un variador de frecuencia (caso de motor eléctrico), o se regula la potencia de la central (caso de un motor hidráulico), en ambos casos, el torque se ajusta desde el tablero de operación de la máquina, disminuyendo la intervención directa del operador con la máquina.

Para realizar el correcto control de torque, el operador realiza dos acciones:

- Medición de tensión: Mediante inspección visual de la catenaria que se forma entre el capstan y el take up; o manualmente, ejerciendo fuerza sobre el torón entre el capstan y el take up mientras la máquina se encuentra en funcionamiento.
- Ajuste de tensión: El ajuste de tensión se realiza regulando el apriete de las balatas o con un potenciómetro, dependiendo del tipo de take up que se trate.

Como la medición de tensión se realiza con la máquina en movimiento y con la intervención manual del operador sobre el torón durante la fabricación, existe un riesgo de atrapamiento de la extremidad utilizada para la medición (mano principalmente).

Inspección de cantidad de alambre en bobinas

Durante el proceso de bobinado, las bobinas se cargan con la mayor cantidad de alambre que pueden contener; para luego ser cargadas en las maquinas torcedoras. Desde que las bobinas son cargadas, en la máquina hasta que la máquina queda lista para funcionar se pierden metros de alambre utilizados para preparar el torón, los cuales no quedan registrados en ninguna parte y pueden variar en cantidad dependiendo del operador.

Una vez que la máquina comienza a torcer los alambres para formar el torón, no se posee un indicador de la cantidad de alambre que hay en las bobinas más allá de la inspección visual que realiza el operador. Debido a que para completar la orden de fabricación en muchos casos

se requiere más de una carga de máquina, el operador debe estar revisando la cantidad de alambre en las bobinas para realizar el cambio en el momento justo. Ésto debido a dos motivos principales: disminuir la cantidad de scrap, y evitar que por falta de algún alambre el torón quede defectuoso. Por otra parte, existen torones especiales los cuales no pueden contener soldaduras de alambre en sus construcción.

Además, al realizar el cambio de bobinas para recargar la máquina, los alambres se deben soldar entre sí para seguir con la fabricación del torón. El hecho de no saber el momento en el cual se debe realizar la recarga provoca que muchas veces las soldaduras queden dentro del tramo a fabricar, afectando la calidad del producto. Como sugerencia, se debe tratar de que las soldaduras queden al comienzo del tramo a fabricar, para así poder cortar el sector con soldaduras. La actividad de inspeccionar la cantidad de alambre en las bobinas no afecta la seguridad del proceso, ya que no hay intervención directa del operador con la máquina.

Tensión inicial en máquinas con take up unido mecánicamente al motor principal

En las máquinas torcedoras con take up unido mecánicamente al tubo, al completar la fabricación de un tramo es necesario cambiar la bobina montada en el take up. Una vez realizado el cambio, el operador debe intervenir la máquina para asegurar una tensión inicial entre el capstan y el takeup, y así evitar el deslizamiento del torón en el capstan. Ésta intervención se realiza entre dos operadores; en el momento que uno de los operadores enciende la máquina el otro tira manualmente la bobina frontal de tal forma de asegurar la tensión o se carga sobre el torón entre el capstan y el take up para así aumentar la tensión y lograr que el capstan tire (Figura 4.6). Al no realizarse ésta acción, se pierde el rozamiento entre el capstan y el cable/torón, provocando un deslizamiento entre ambos y ocasionando problemas en el producto (principalmente degolladas⁸ y cerradas de paso⁹).

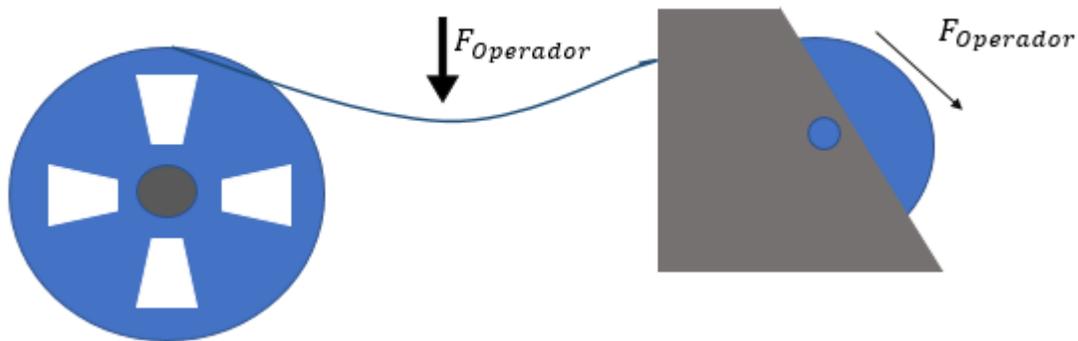


Figura 4.6: Puntos donde el operador ejerce fuerza para asegurar que el capstan arrastre el torón.

Fuente: Elaboración propia

⁸Una degollada es un corte violento del cable o torón producto del sobre enrollamiento del mismo. La principal causa de degolladas es la falta de movimiento horizontal producto de la pérdida del abrazamiento del cable/torón en el capstan.

⁹Una cerrada de paso consiste en la pérdida del paso especificado en la hoja técnica del cable o torón producto de variaciones en la velocidad lineal de fabricación del cable.

Ésta intervención se realiza siempre que se requiere que la máquina comience a girar (luego de cualquier detención). Ésto sumado a que se realiza con la máquina en movimiento provoca un alto riesgo de atrapamiento de las extremidades usadas en la intervención.

Malformaciones en el torón

El operador debe estar constantemente inspeccionando visualmente el torón para detener la máquina en caso de que aparezcan malformaciones en Éste, las cuales pueden ser cambios en el diámetro, cambios en el paso o defectos en la formación, las cuales afectan las características técnicas del producto.

Detención inesperada de partes móviles

Entre las labores que realiza el operador se encuentra el monitoreo del correcto funcionamiento de la máquina, verificando que todos los componentes móviles se encuentren en movimiento cuando es necesario. En caso de no ser así el operador debe estar atento para detener la máquina y así evitar repercusiones en la calidad del producto.

Ésta actividad es de muy rara ocurrencia, y hace referencia a la falla de la máquina más que a una actividad a realizar.

La Tabla 4.3 muestra la evaluación de impacto de las distintas intervenciones que realizan los operadores durante el funcionamiento de las máquinas torcedoras.

Tabla 4.3: Evaluación de impacto de intervenciones en torcido
Fuente: Elaboración propia

Intervención	F_f	F_t	I_c	I_s	Impacto total
Malfuncionamiento del sistema de lubricación.	3	3	5	4	15
Control de tensión en bobinas/ carretes take up.	5	3	4	1	13
Tensión inicial en máquinas con take up unido mecánicamente al motor principal.	4	2	3	2	11
Inspección de cantidad de alambre en bobinas.	3	4	1	1	9
Detección de malformaciones en el torón.	1	1	5	2	9
Detección de movimiento de partes móviles.	1	1	3	1	6

4.2.3. Cerrado

En cerrado se encuentran también algunas de las intervenciones identificadas en torcido, las cuales son:

- Fallas en el sistema de lubricación.
- Control de tensión en el take up.

- Detección de malformaciones en el cable.
- Detención inesperada de partes móviles.

Control de tensión en bobinas al interior del tubo / canasta

Cuando se cargan las bobinas con torón en las máquinas cerradoras, éstas se fijan a los columpios y se les aplica un freno, el cual es necesario para asegurar que el torón se extrae con una tensión adecuada para asegurar la preformación del cable y una correcta forma en la hélice.

Debido a que el radio en el cual se extrae el torón varía a medida que la bobina se vacía, la tensión con la cual se extrae el torón también cambia, afectando los parámetros de preformación fijados al inicio.

Otros aspectos relevantes de la tensión de freno son:

- Evitar que se enreden los alambres en su trayecto desde la bobina al punto de formación.
- Mantener el alambre en su trayectoria, describiendo cuerdas producto del giro de la máquina. La falta de tensión hace que los alambres describan cuerdas más amplias, las cuales se alejan del centro de la máquina y pueden enredarse en la estructura misma de la máquina o en alguna estructura adyacente.
- Evitar la acumulación de excesos de alambre producto de la falta de tensión en el frenado, lo cual puede provocar malformaciones en el torón o enredos en el punto de formación.

El frenado de la bobina es un sistema que mediante rozamiento opone resistencia al giro de la bobina y por consecuencia, a la salida del torón desde la bobina, haciendo que éste salga de la bobina con tensión. Por lo tanto, si se aplica más tensión de freno, los alambres salen con mayor tensión; por otra parte si se aplica menos tensión de freno, los alambres salen con menos tensión.

Los sistemas de tensión de freno son:

- Catalina: éste sistema de freno funciona de manera manual y se compone de una catalina solidaria a la bobina y un elemento de frenado solidario a la estructura de la máquina, que pasa a través de la garganta de la catalina, para producir roce entre ambos. Éste elemento de frenado puede ser de distinta naturaleza. En el pasado se utilizó una cuerda de fibra natural, como sisal, impregnado en algún lubricante; posteriormente fue reemplazado por elementos sintéticos, de mayor regularidad; luego por elementos sintéticos con núcleo de acero, para disminuir la elongación y así permitir que el frenado fuera constante a lo largo del tiempo.

El sistema de freno está compuesto por una catalina, un elemento de frenado y un ancla (Figura 4.7). El ancla es el dispositivo que tiene la máquina para fijar un extremo del elemento de frenado. Para regular la fuerza que el elemento de frenado ejerce en contra de la catalina, se puede regular para modificar la fuerza con que el elemento de frenado actúa sobre la catalina. El ancla regula la fuerza que hace el elemento de frenado sobre

la catalina y, por consecuente, la fuerza de frenado (roce). Existen variaciones de éste sistema, pero el principio de funcionamiento es el mismo para todos.

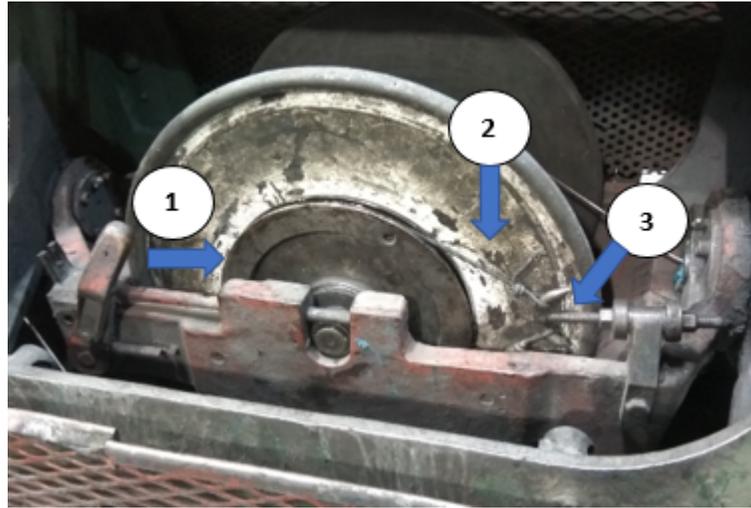


Figura 4.7: Sistema de frenado por catalina, (1) catalina, (2) cordel de freno y (3) ancla.
Fuente: Elaboración propia

- Al regular el roce, se regula el frenado de la bobina.
- Al regular el frenado de la bobina, se regula la tensión.
- Sistema de control por celdas de carga: Éste sistema permite un control automático de la tensión de freno en las bobinas de torón de las máquinas cerradoras. El sistema consiste en celdas de carga dispuestas en las guías de la máquina, las cuales registran la tensión de cada uno de los torones y ajustan los frenos en caso de ser necesario. Éste ajuste se realiza mediante motores eléctricos instalados en cada uno de los columpios de las máquinas cerradoras, los cuales se encuentran conectados entre sí mediante un sistema de anillos de carbono que permite el traspaso de energía y señales eléctricas dentro de la máquina. Éste sistema actualmente se utiliza solo en tres máquinas.

Durante el cerrado, se regula el freno de forma que se logre alcanzar la tensión necesaria para la preformación. Por procedimiento, se dice que cada 200 metros de cable fabricado la tensión de los frenos se debe ajustar. En la realidad Ésto no ocurre, ya que la tensión se ajusta cuando el operador lo estima conveniente. Se observa que:

- Mayor tensión de freno obtiene una mayor preformación.
- Menor tensión de freno obtiene una menor preformación.

Además, se debe procurar que los frenos de las distintas bobinas estén regulados a una misma tensión, ya que de ésta forma se logra que la preformación de los torones sea homogénea entre ellos. La tabla [4.4](#) muestra la evaluación de impacto de la actividad “ Regular frenos de bobinas”.

Tabla 4.4: Evaluación de impacto de actividades en cerrado
Fuente: Elaboración propia

Intervención	F_f	F_t	I_c	I_s	Impacto total
Ajuste de tensión de freno en bobinas de máquinas cerradoras	3	3	5	1	12

4.2.4. Resumen

Finalmente, la tabla 4.5 muestra un ranking de las intervenciones identificadas según su impacto en el proceso. Con el fin de encauzar los esfuerzos a las mejoras que ocasionan un mayor beneficio, se desarrollan las cinco primeras del ranking.

Tabla 4.5: Ranking general de impacto en el proceso
Fuente: Elaboración propia

Prioridad	Oportunidad	Impacto en producción
1	Utilizar soplete para calentar grasas.	15
2	Control de tensión en bobinas/carretes take up.	13
3	Control de tensión en bobinas al interior de la máquina.	12
4	Corte de alambre en bobinado.	11
5	Tensión inicial en máquinas con take up unido mecánicamente al motor principal.	11
6	Mejorar sistema de ordenado.	10
7	Falta de grasa en el estanque.	10
8	Inspección de cantidad de alambre en bobinas.	9
9	Detección de malformaciones en el torón.	9
10	Detección de movimiento de partes móviles.	6

4.3. Benchmark

Una vez identificadas las intervenciones que se realizan por parte del operador en las distintas máquinas y procesos, se procede a realizar un *Benchmarking* con el fin de recopilar distintas alternativas de mejora actualmente utilizadas en distintas fábricas de cables de acero en el mundo.

4.3.1. BBRG Willington Quay

Detección de cortes de alambre antes del punto de formación

Durante el proceso de torcido de torones, el corte de alambre previo a la formación del torón es detectado mediante un sistema eléctrico que utiliza la conductividad eléctrica del alambre para detener la máquina.

El sistema emplea placas de metal aisladas eléctricamente las cuales al detectar contacto con un alambre (debido al giro de la máquina el alambre describe una hélice alrededor del tubo) activan un relé resistivo, el cual detiene la máquina [3]. La Figura 4.8 muestra dos tipos de barras aisladas utilizadas para la detección de alambres cortados.



Figura 4.8: Sistema de placas o barras aisladas detectoras de cortes de alambre.

Fuente: Elaboración propia en base a [3]

Detección de cortes de alambre luego del punto de formación

Para la detección de alambres cortados luego de la formación del torón se utiliza un interruptor de final de carrera con roldana, al cual se le anexa un alambre que se enrolla alrededor del torón, de tal manera que el torón desliza por dentro del anillo. En caso de producirse un corte de alambre, la deformación producida en el torón arrastra el anillo activando el limit switch, el cual a su vez envía la señal para que la máquina se detenga. Un punto a tener en cuenta es que éste tipo de sensores sólo detecta fracturas de alambre en el exterior del torón y sólo si éstas representan una deformación positiva en éste [3]¹⁰. La Figura 4.9 muestra el

¹⁰Se define como deformación positiva toda deformación que produzca un aumento en la dimensión del torón, como por ejemplo: acumulación de alambre, alambre levantado. En caso de cortarse un alambre central

funcionamiento del sistema descrito anteriormente.



Figura 4.9: Sistema de detección de alambre cortado luego de la formación del torón.

Fuente: Elaboración propia en base a [3]

Control de tensión en el Take up

El control de tensión en el take up se realiza manualmente por parte del operador a medida que el diámetro del carrete frontal aumenta. Éste control se realiza mediante un potenciómetro, el cual aumenta o disminuye el torque del motor que mueve el take up. La planta de BBRG Wellington Quay cuenta con un procedimiento estandarizado y su cumplimiento es constantemente verificado [3].

Sistema de lubricación

El sistema de lubricación consiste en un estanque con un calefactor instalado en la parte inferior de éste, cuyo control de temperatura se realiza en un controlador instalado en el panel de la máquina. Para depositar el lubricante en el torón, se utiliza un sistema de bombas y cañerías que llegan hasta el punto de formación. Las bombas además son las encargadas de la recirculación del lubricante. El sistema de lubricación no detecta la cantidad de lubricante con la que cuenta, no detecta si las cañerías están tapadas ni tampoco la temperatura en el punto de aplicación. El mayor problema de éste sistema es el tiempo que se requiere para hacerlo funcionar, ya que el lubricante debe encontrarse totalmente líquido antes de encender el sistema de recirculación. Ésto para evitar fallas en el sistema de bombeo [3].

Control de tensión en bobinas al interior de la máquina

La tensión en las bobinas es ajustada manualmente en base a la experiencia de los operadores, decidiendo ellos además cuando se realiza un ajuste en la tensión. Poseen distintos métodos para frenar las bobinas dentro de la máquina [3]. En la Figura 4.10 se aprecian dos sistemas similares a los utilizados en BBRG Santiago.

el torón tiende a disminuir su diámetro, por lo cual es sistema no detectaría la falla.



Figura 4.10: A la izquierda se observa un sistema de freno mediante una cadena con insertos, a la derecha se observa un cordel de freno tenso alrededor de una catalina

Fuente: Elaboración propia en base a [3]

4.4. Ingeniería conceptual

Una vez que se seleccionan las alternativas a desarrollar (sección 4.2.4), se realiza un diseño conceptual junto con la lista y justificación de los criterios de diseño que debe cumplir cada solución propuesta.

4.4.1. Mejoras en el sistema de lubricación de torones

Criterios de diseño

- **Movimiento de lubricante:** El sistema utilizado para el movimiento del lubricante dentro del estanque es el actualmente usado en la empresa, es decir, mecanismo de rueda y canal.
- **Temperatura homogénea:** Dentro del estanque de grasa debe existir una temperatura homogénea, disminuyendo el gradiente de temperatura.
- **Eficiencia energética:** Se debe minimizar el consumo de energía.
- **Temperatura adecuada:** El sistema debe asegurar que la grasa se encuentra líquida a lo largo de todo el camino, desde que sale del estanque hasta que llega al torón.
- **Detección de cantidad de grasa:** El estanque debe detectar la cantidad de grasa que posee y en caso de falta de grasa detener la máquina.
- **Vaciado de la grasa:** El estanque debe poseer la forma correcta para un fácil vaciado y posterior cambio de tipo de grasa.
- **Punto de aplicación:** El punto donde se aplica la grasa debe permitir ajustarse cuando sea necesario.
- **Detección de flujo:** El estanque debe identificar si existe solidificación de la grasa o si no está escurriendo sobre el torón.
- **Recirculación de grasa:** El exceso de grasa debe ser devuelto al estanque de grasa a través de un sistema de recirculación.

Diseño conceptual

La Figura 4.11 muestra un esquema del estanque de grasa a diseñar, donde se aprecian los calefactores en la parte superior del estanque para así asegurar la temperatura correcta en la interfaz lubricante-aire, un medidor de cantidad de grasa, un detector de flujo y el recubrimiento del estanque con un aislante térmico para así disminuir las pérdidas de calor y las pérdidas energéticas. El objetivo de este nuevo sistema es ser enlazado al PLC de la máquina, de tal forma de que cualquier problema en el funcionamiento permita detener la máquina de manera automática; además de asegurar una temperatura homogénea dentro del estanque de grasa, disminuyendo de ésta forma la probabilidad de que se produzcan tapones producto del endurecimiento de la grasa en el punto de aplicación.

Este diseño conceptual permite solucionar los problemas encontrados en la etapa de diagnóstico e identificación de oportunidades.

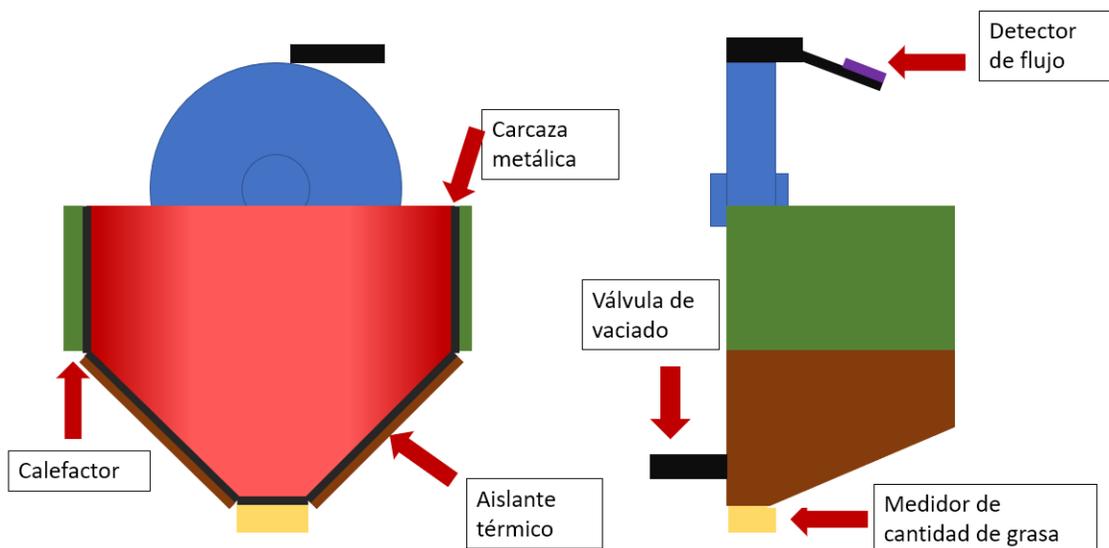


Figura 4.11: Diseño conceptual del estanque de grasa

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Control automático de torque en take up

Criterios de diseño

- Control automático: El sistema debe ser capaz de controlar el torque del motor de manera automática desde que se carga la bobina vacía hasta que ésta se llena, sin la intervención del operador.
- Movimiento continuo del take up: El ajuste de tensión debe realizarse mientras la máquina se encuentra funcionando y no se debe detener.
- Trayectoria del cable: La trayectoria del cable (o torón) debe ser recta desde el capstan

hasta el take up y el sistema de medición de tensión debe evitar intervenir esta trayectoria, ya que cualquier deformación brusca puede inducir deformaciones permanentes en el cable o puede producir la aparición de torques internos en el cable, poniendo en juego la calidad de éste.

Diseño conceptual

El diseño conceptual del sistema controlador de tensión consiste en una estructura metálica sobre la cual desliza un carro, que enlazado a una celda de carga, permite registrar falta o exceso de tensión. Una vez que la celda de carga realiza la medición, esta señal se envía al PLC de la máquina, el cual da la orden al motor de aumentar o reducir la potencia según sea necesario. Con este sistema de lectura y control en lazo cerrado se evita la intervención del operador, liberando el tiempo que dedica a la tarea.

La Figura 4.12 muestra un esquema del funcionamiento y los componentes necesarios para el sistema de control de tensión automático.

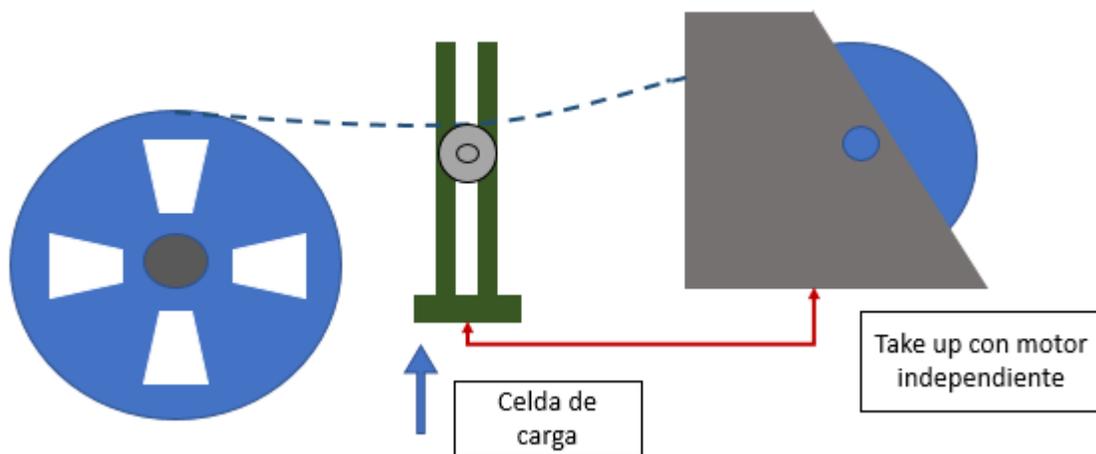


Figura 4.12: Diseño conceptual del sistema de control de tensión en el take up
Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Detección de cortes de alambre en bobinado

Criterios de diseño

- Detección de todos los cortes de alambre: El sistema debe ser capaz de detectar el corte de alambre en cualquier punto entre el bulto de materia prima y la bobina.
- Alcance: La propuesta sólo ataca la detección de los cortes de alambre y no busca evitar que estos se produzcan.

Diseño conceptual

Se proponen distintas alternativas para detectar el corte de alambre en el proceso de bobinado, las cuales se listan a continuación:

- Detección por falta de tensión: Un corte de alambre provoca una caída brusca de la tensión del alambre entre el bulto y la bobina, por lo cual mediante un control de tensión se puede detectar el corte de alambre, independiente de donde se produzca este corte. Para detectar la falta de tensión se propone un sistema *Dancer*, el cual mide la tensión del alambre a medida que este pasa por una trayectoria determinada. La Figura 4.13 se muestra el diseño conceptual de un sistema *Dancer* aplicable a una máquina bobinadora, donde (1) y (2) son deflectores que sirven para guiar el alambre, mientras que (3) es el rodillo encargado de medir la tensión del alambre.

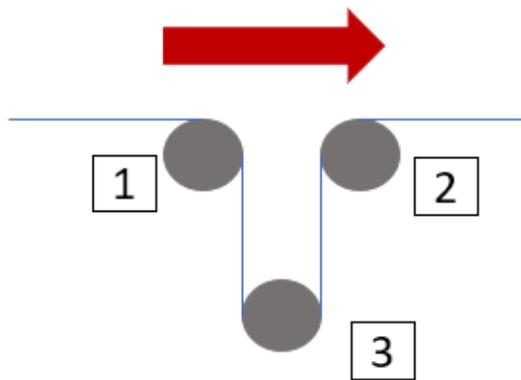


Figura 4.13: Sistema de control de tensión mediante rodillo *Dancer*.
Fuente: Elaboración propia

- Detección de presencia: Una alternativa para detectar el corte de alambre es enhebrar este a través de un sistema que reaccione ante la falta de alambre, de tal modo de detectar el corte de alambre a través de la falta de este. El sistema utiliza un sensor de posición, el cual detecta la ubicación de una argolla móvil que es forzada a una posición debido a la tensión del alambre y vuelve a su lugar original cuando el alambre se corta.
- Detección por conductividad eléctrica del alambre: El sistema funciona bajo el mismo principio explicado en la sección 4.2.1, modificando los puntos de detección para así corregir el mal funcionamiento del sistema.

Debido a la simpleza y a la utilización de este sistema en otras plantas de cables de BBRG, se utiliza el sistema de detección de corte de alambre por conductividad eléctrica para ser desarrollado para el proceso de bobinado.

4.4.4. Motorización independiente para Take up

Criterios de diseño

- Torque inicial: El sistema debe asegurar una tensión inicial adecuada al comienzo del proceso.
- Torque variable: Se debe poder ajustar el torque del motor para asegurar que no se produzcan degolladas por falta de potencia en el take up.
- Seguridad: El sistema debe permitir que la máquina comience a funcionar sin la intervención directa del operador con las partes móviles.

Diseño conceptual

La mejora propuesta consiste en independizar el movimiento del take up, de tal forma que el sistema enrollador cuente con el torque necesario para asegurar el abrazamiento del torón en el capstan, desde que la máquina comienza a girar.

El sistema motor del take up debe poder ser controlable, ya que un movimiento constante no sirve para el objetivo requerido; por ende, además de un motor eléctrico independiente, se debe contar con un variador de frecuencia adecuado para realizar un control de torque.

4.4.5. Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora

Criterios de diseño

- Ajuste de tensión de freno automático: La tensión de freno debe ser ajustada automáticamente durante el vaciado de la bobina, sin necesidad de la intervención del operador.
- Sistema robusto: El sistema debe ser fabricado en materiales que resistan golpes y cargas excesivas, evitando el uso de piezas complejas y delicadas.

Diseño conceptual

El diseño conceptual corresponde a un sistema de ajuste de tensión mediante un palpador, que disminuye la tensión del freno a medida que la bobina se vacía. Los componentes principales son: el palpador, el ancla del freno y el sistema que relaja la tensión. La Figura [4.14](#) muestra el diseño conceptual del sistema mecánico de ajuste de tensión automático.

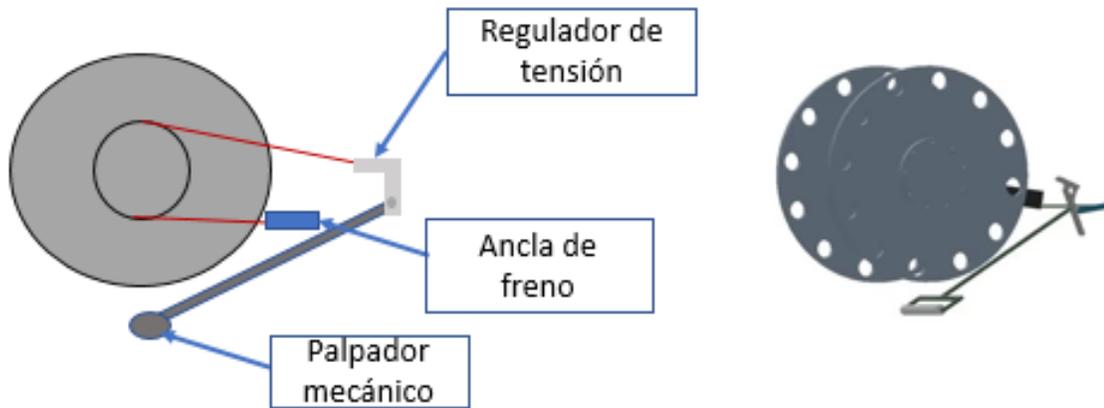


Figura 4.14: Diseño conceptual del sistema mecánico de control de tensión de freno en bobinas
Fuente: Elaboración propia

4.5. Ingeniería básica

Una vez finalizada la etapa de ingeniería conceptual se comienza con la ingeniería básica de las distintas propuestas, con el fin de desarrollar todos los aspectos técnicos a considerar para la posterior etapa de detalle.

4.5.1. Mejoras en el sistema de lubricación de torones

Para estudiar más a fondo el estado actual del sistema de lubricación, se realiza un modelo para estudiar el perfil de temperaturas dentro del estanque.

El modelo de transferencia de calor se basa en los siguientes supuestos:

- Fluido en reposo: Para efectos del modelo, el fluido se considera en reposo; debido a esto, el mecanismo de transferencia de calor predominante es la conducción.
- Conducción bidireccional: El espesor del estanque se considera infinito, de esta forma se trabaja con un modelo bidireccional de transferencia de calor.
- Contenido del estanque: En el estanque se pueden calentar distintos tipos de lubricante, lo cual depende de la especificación del producto. Para efectos del modelo se considera la grasa asfáltica cuyas propiedades se listan en la tabla 4.6¹¹

¹¹La conductividad térmica de este lubricante no se encuentra en la hoja técnica, para esto se utilizó la conductividad térmica de la mezcla de aceite mineral y asfalto [11].

Tabla 4.6: Propiedades grasa asfáltica.
Fuente: Elaboración propia en base a [8]

Nombre	WRC Anticorit H29
Composición	Asfalto (<20 %) y Aceite mineral (<55%)
Punto de ignición	238 °C
Gravedad específica	0,98
Viscosidad a 99 °C	270 SUS
Punto de congelación	72 °C
Punto de ablandamiento	61 °C
Punto de fusión	76°C
Conductividad térmica	0,16 W/m °C
Calor específico	2,0 kJ/kg °C

La Figura 4.15 muestra la geometría a modelar con las correspondientes condiciones de borde. Se considera un estanque rectangular de 40 por 50 centímetros, rodeado con una pared metálica de 3 mm, con una fuente de calor en su base y sometido a convección en el resto de las caras.

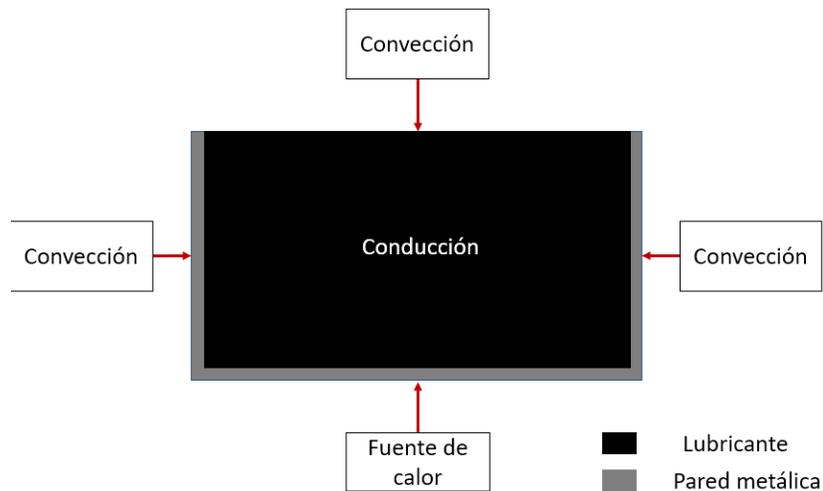


Figura 4.15: Geometría y condiciones de borde a considerar en el modelo de transferencia de calor.

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el perfil de temperaturas se utiliza el método de diferencias finitas, para lo cual hay que discretizar la región a modelar. Se considera un espaciado de 3 mm entre cada punto del mallado, la región discretizada se muestra en la Figura 4.16.

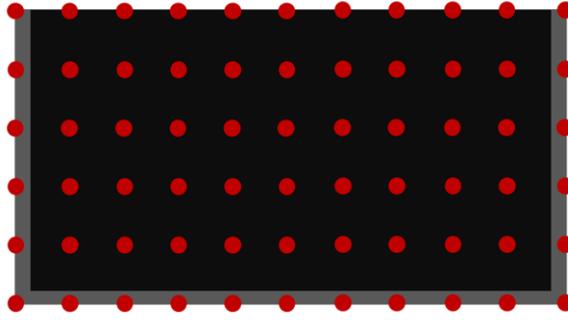


Figura 4.16: Discretización de la región a modelar.
Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la discretización se deben definir las ecuaciones que determinan la temperatura en cada uno de los puntos. Para esto se tienen 4 tipos de puntos:

- Contorno del estanque: Esta zona se caracteriza por tener conducción en tres de sus caras y convección en una de ellas. De esta forma la temperatura en la interfase metal aire queda definida por las ecuaciones [4.1](#) y [4.2](#).

$$T_{i,j} = \frac{k_{ac}(T_{i,j+1} + T_{i,j-1} + 2T_{i+1,j}) + 2h\Delta x T_{\infty}}{4k_{ac} + 2\Delta x h} \quad \text{Pared izquierda del estanque} \quad (4.1)$$

$$T_{i,j} = \frac{k_{ac}(T_{i,j+1} + T_{i,j-1} + 2T_{i-1,j}) + 2h\Delta x T_{\infty}}{4k_{ac} + 2\Delta x h} \quad \text{Pared derecha del estanque} \quad (4.2)$$

Donde:

- El sub-índice i indica la posición horizontal en el estanque en la cual está siendo evaluada la variable.
- El sub-índice j indica la posición vertical en el estanque en la cual está siendo evaluada la variable.
- h es el coeficiente de intercambio térmico.
- Δx la distancia horizontal entre dos puntos de la discretización.
- T_{∞} La temperatura ambiente.
- k_{ac} Conductividad térmica del acero
- Interfaz metal - lubricante: Para los puntos que se encuentran en la interfaz, el único mecanismo de transferencia de calor es la conducción con los cuatro puntos colindantes. De esta forma las ecuaciones que determinan la temperatura de estos puntos son las siguientes [4.3](#), [4.4](#) y [4.5](#).

$$T_{i,j} = \frac{k_{ac}T_{i-1,j} + k_{gr}T_{i+1,j} + \bar{k}(T_{i,j-1} + T_{i,j+1})}{2(k_{ac} + k_{gr})} \quad \text{Interfaz izquierda} \quad (4.3)$$

$$T_{i,j} = \frac{k_{gr}T_{i-1,j} + k_{ac}T_{i+1,j} + \bar{k}(T_{i,j-1} + T_{i,j+1})}{2(k_{ac} + k_{gr})} \quad \text{Interfaz derecha} \quad (4.4)$$

$$T_{i,j} = \frac{k_{gr}T_{i,j+1} + k_{ac}T_{i,j-1} + \bar{k}(T_{i-1,j} + T_{i+1,j})}{2(k_{ac} + k_{gr})} \quad \text{Interfaz base} \quad (4.5)$$

Donde:

- k_{gr} Conductividad térmica del lubricante.
- \bar{k} Conductividad térmica en la interfase lubricante-acero, y se calcula como el promedio de la conductividad térmica de ambos materiales.
- Interior: Para los puntos que se encuentran rodeados del mismo material (acero o lubricante), la temperatura del punto se calcula como el promedio aritmético de las temperaturas de los puntos que lo rodean, tal como muestra la ecuación [4.6](#)

$$T_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} + T_{i-1,j} + T_{i+1,j}}{4} \quad \text{Interior del estanque} \quad (4.6)$$

- Temperatura en la base: Debido a que el calefactor y el termopar encargado de controlar la temperatura se encuentran en la base del estanque, la condición de borde utilizada para modelar el fenómeno es de temperatura constante en la base, por ende, para los puntos de la base del estanque su temperatura es un valor conocido y constante T_b a definir.

La Tabla [4.7](#)¹² muestra los datos de entrada para la resolución del modelo.

Tabla 4.7: Datos de entrada para resolver el modelo.

Parámetro	Valor
T_∞	20 [°C]
h	8 [W/m ² °C]
Δx	10 [mm]
k_{ac}	50,2 [W/m °C]
T_0	130 [°C]

La Figura [4.17](#) se aprecia la distribución de temperaturas dentro del estanque, como era de esperarse, debido a la baja conductividad térmica que presenta el lubricante, se aprecia un gradiente de temperatura bastante importante entre la base del estanque (calefactor) y la superficie (en contacto con el aire).

¹²Para estimar el valor del coeficiente de intercambio térmico se utilizó un valor promedio para la convección natural [\[12\]](#).

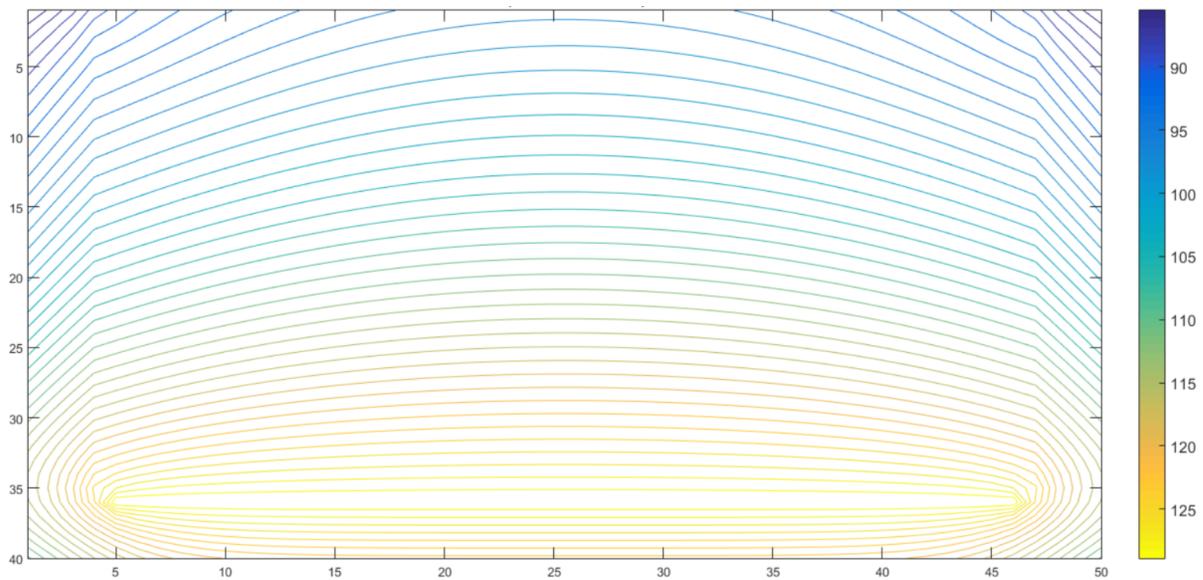


Figura 4.17: Distribución de temperaturas en el estanque sin aislamiento térmico.
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el perfil de temperaturas se calcula las pérdidas de energía por concepto de transferencia de calor entre el estanque (paredes y lubricante) con el medio, las cuales ascienden a un valor de 576 [W].

Debido a la magnitud de las pérdidas de energía se vuelve a correr el modelo. Pero esta vez considerando un recubrimiento aislante de lana de vidrio de 40 [mm] de espesor. La lana de vidrio posee una conductividad térmica de 0,04 [w/m°C], por lo cual es altamente utilizada para recubrimientos térmicos.

Se utilizan los mismos datos de entrada que en el caso anterior y para simplificar el modelo se omite la capa de acero entre el aislante y el lubricante, (debido a su alta conductividad y bajo espesor se considera como un conductor perfecto). La Figura 4.18 muestra el perfil de temperatura obtenido en el estanque considerando un recubrimiento aislante en todas las caras del estanque.

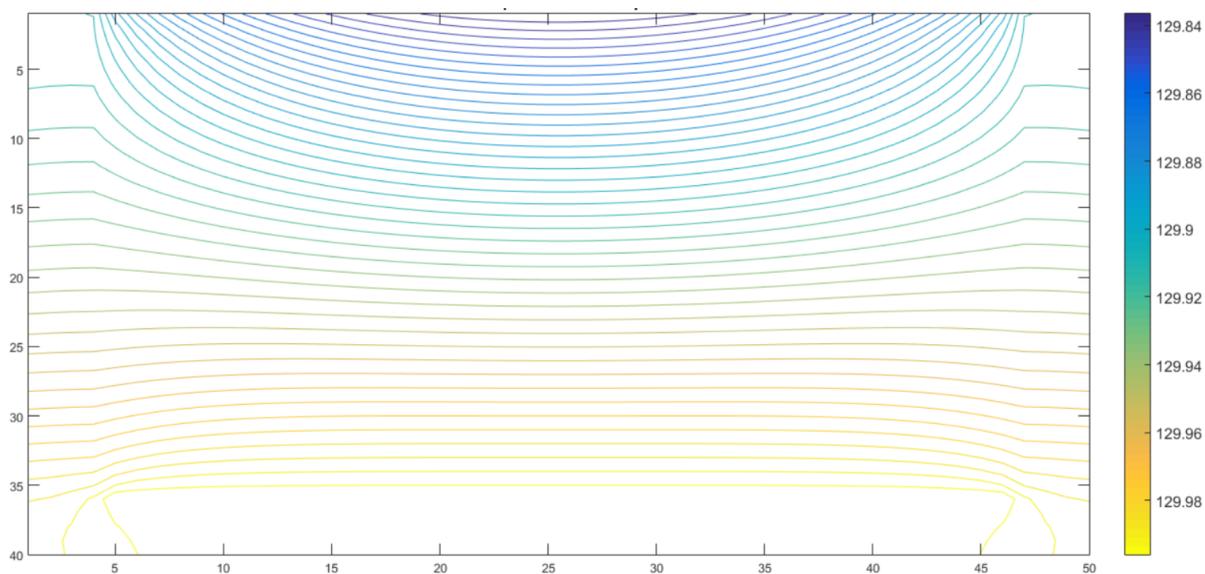


Figura 4.18: Distribución de temperaturas en el estanque con un recubrimiento aislante de lana de vidrio.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 4.18, gracias al recubrimiento aislante el gradiente de temperatura es casi nulo, lo que además reduce las pérdidas de energía a 68 [W], es decir, un 12 % de las pérdidas de energía actuales. En resumen, un recubrimiento aislante permite disminuir las pérdidas de calor y, por ende, permite disminuir el gradiente de temperatura dentro del estanque.

Debido a que el recubrimiento aislante cubre todas las caras del estanque, se hace necesario poseer un sistema que advierta al operador en caso de falta de lubricante en el estanque (ya que este no podrá advertirlo de manera visual). Éste sistema debe de ser capaz de conectarse con el PLC de cabecera de la máquina con el fin de impedir el funcionamiento de la máquina si es necesario. Para realizar la medición, se propone utilizar un sensor ultrasónico de nivel. La técnica ultrasónica de medida se basa en la velocidad del sonido. Con el sonido se puede medir el tiempo de recorrido entre la emisión de un impulso sónico y su recepción. La medida de nivel se obtiene basándose en este tiempo de recorrido. Los sensores de ultrasonido emiten fuertes impulsos (más de 20 000 Hz) e interpretan el tiempo de recorrido del impulso reflejado (eco). Estos instrumentos trabajan intermitentemente como emisores y receptores para conformar una imagen precisa del entorno de medición. El sensor contiene un cristal piezoeléctrico. Este convierte una señal eléctrica en energía sónica, emitiendo una señal hacia el blanco (producto). El sensor recibe el impulso reflejado y vuelve a convertir la energía sónica en una señal eléctrica. La electrónica de medición analiza el impulso recibido y calcula la distancia entre el sensor y el producto. El tiempo de recorrido entre el impulso emitido y el eco recibido es directamente proporcional a la distancia entre el sensor y el producto en el depósito [13].

Para las condiciones de operación, el sensor seleccionado es el *IFM UGT584* cuyas características se muestran en la Tabla 4.8. Por otra parte, las dimensiones del sensor se encuentran en la Figura 4.19.

Tabla 4.8: Datos técnicos sensor ultrasónico.

Fuente: Elaboración propia en base a [4]

Proveedor	IFM
Modelo	UGT584
Rango de medida	80 a 1200 mm
Salida	4-20 mA
Resolución	3 mm
Ángulo de dispersión del haz	8°
Temperatura de operación	-20 a 70 °C
Peso	0,097 kg
MTTF	205 años

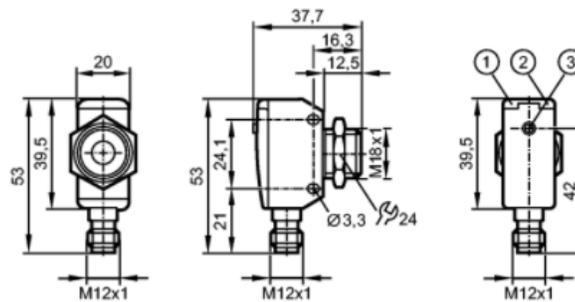


Figura 4.19: Dimensiones sensor ultrasonico UGT584.

Fuente: [4]

Las principales limitantes que se deben tener en cuenta para asegurar un correcto funcionamiento del sensor de nivel son: el haz de dispersión, su rango de medida, y su temperatura de operación. Teniendo en consideración lo anterior, el sensor no puede ser ubicado bajo la cubierta aislante, ya que la temperatura supera los límites de operación del equipo.

Hasta éste punto las mejoras logran asegurar una temperatura homogénea dentro del estanque, además de entregar un indicador de la cantidad de lubricante en el mismo.

Para poseer un indicador de funcionamiento del sistema de lubricación, se utiliza un sensor de temperatura en la bandeja de aplicación. Ésto se debe a que la temperatura de la grasa se relaciona directamente con el endurecimiento de ésta; adicional a éste sensor de temperatura se conecta un calefactor que mantiene la temperatura correcta en la bandeja de aplicación. De ésta forma el sistema de lubricación contará con dos zonas de aporte calórico: la primera en el estanque (conectada a un sensor de temperatura sumergido en la base) y la segunda en la bandeja de aplicación (con su sensor de temperatura). Cabe destacar que las dos lecturas de temperatura son totalmente independientes entre sí. La Tabla 4.9¹³, muestra las especificaciones técnicas del sensor y el calefactor a utilizar en la bandeja de aplicación.

¹³Debido a que el lubricante llega en estado líquido al sistema de lubricación el calefactor adicional se dimensionó solo para suplir las pérdidas de calor.

Tabla 4.9: Datos técnicos calefactor y sensor de temperatura bandeja de aplicación

Tipo de calefactor	Cerámico de placas planas	Tipo de sensor	RTD
Potencia del calefactor	0,2 kW	Largo	40 mm
Dimensiones	100x50 mm	Tipo de conector	Rosca de 1/2"NPT
Alimentación	220 V	Rango de temperatura	-50 a 400 °C

Otro punto por considerar es la recirculación del exceso de lubricante, el cual es retirado (en su mayoría) a la entrada del dado de formación y a la salida del sistema de lubricación. Éste debe ser capaz de volver al estanque de tal forma que se disminuya la pérdida de lubricante por contaminación.

El sistema de recirculación se compone de dos canaletas no calefaccionadas, encargadas de llevar el lubricante de vuelta al tanque. Una se encuentra fija en el lugar del estrujador y otra móvil adherida al dado de formación.

La Figura 4.20 muestra vistas isométricas del sistema de lubricación e indica la posición de los distintos componentes.

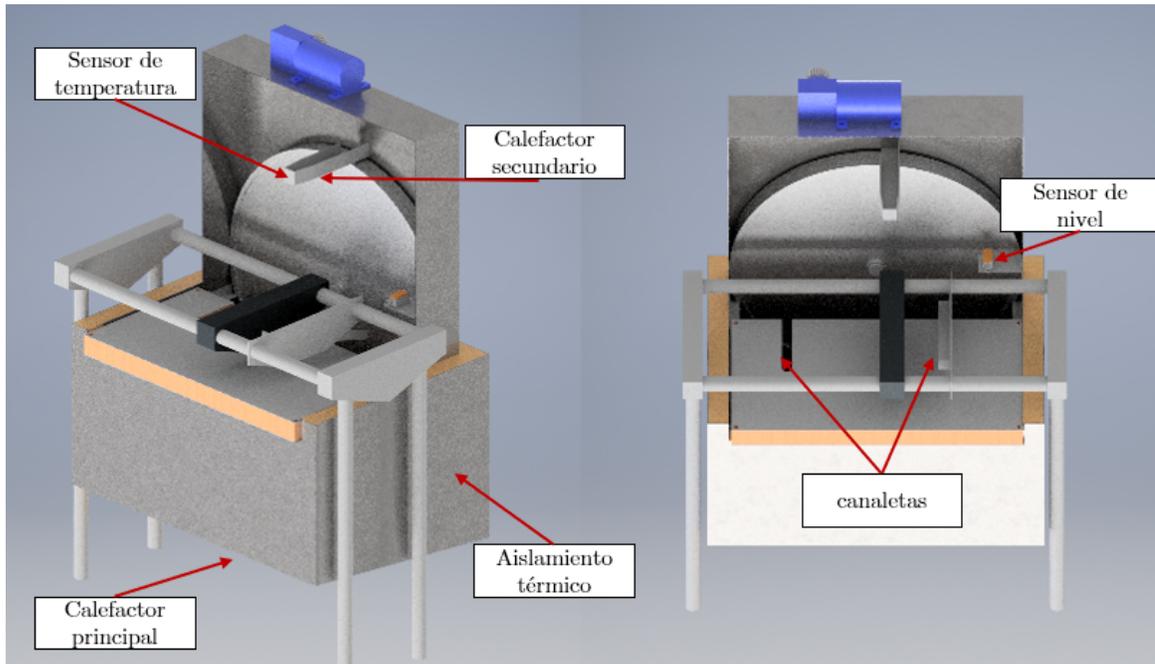


Figura 4.20: Isométricas sistema de lubricación.

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Control automático de torque en take up

La propuesta original del sistema controlador de tensión considera un sistema mecánico capaz de detectar la falta de tensión en el cable mediante una celda de carga, la cual registraría el peso del cable al formarse una curva catenaria¹⁴ entre el capstan y el take up. Éste sistema no es funcional debido a que la trayectoria del cable varía a medida que el carrete se va llenando, lo cual entorpece la lectura en la celda de carga. La Figura 4.21 muestra de manera gráfica el cambio en la trayectoria del cable a medida que aumenta el radio del take up.

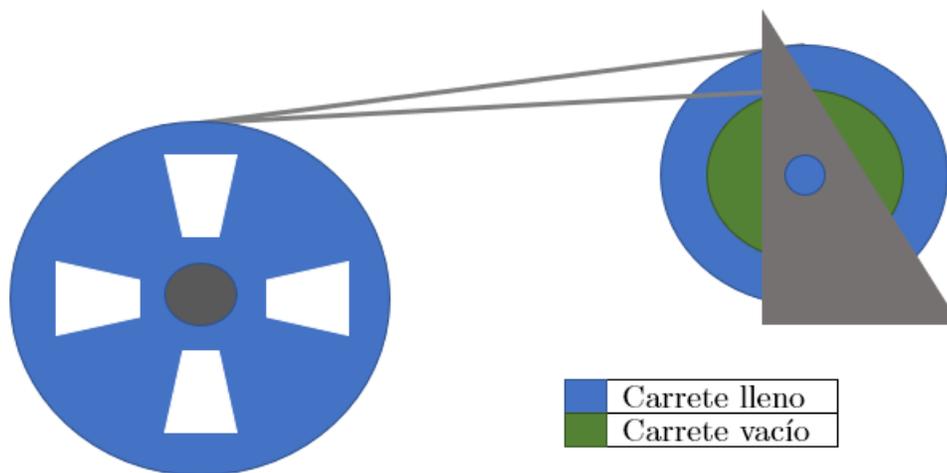


Figura 4.21: Variación en la trayectoria del cable producto del aumento del radio en el carrete.

Fuente: elaboración propia

Como solución se plantea fijar la trayectoria del cable, con el fin de no distorsionar la lectura de la celda de carga, de ésta forma se obtiene una lectura directa de la tensión, pero es necesario deformar la trayectoria del cable; ésto produce defectos que alteran las propiedades mecánicas del cable.

Debido a que las mejoras no deben ser en desmedro de la calidad del producto, se opta por un sistema de control de tensión que mide de manera indirecta la tensión del cable. Ésta medición se realiza mediante un sensor ultrasónico que mide el radio de entrada al take up. De ésta forma el torque del motor se controla en base al diámetro, por ende, el sistema nunca registra el valor de la tensión en el cable.

Con respecto al control de tensión basado en la medición del diámetro, se encuentran las siguientes ventajas y desventajas:

- Ventajas
 - Sistema simple.
 - Mayor confiabilidad que el control manual.

¹⁴Un indicador visual de falta de potencia en el motor encargado de mover el take up, es cuando el cable o torón forma una curva catenaria entre el capstan y el take up

- Costo reducido.
- Fácil instalación.
- Desventajas
 - No se conoce la tensión del cable.
 - En caso de cambios en la forma de los carretes frontales se debe modificar la disposición y configuración de los equipos.

La Figura 4.22 muestra la disposición de un sistema controlador de tensión basado en la medición del diámetro además de mostrar los equipos necesarios.

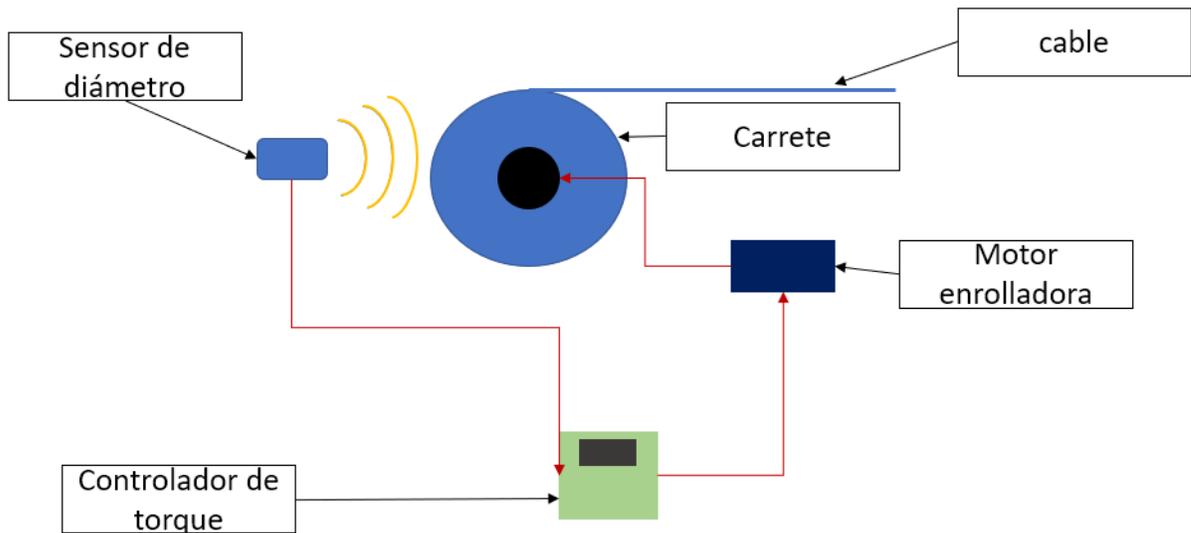


Figura 4.22: Disposición equipo controlador de tensión durante el enrollado de cables.
Fuente: Elaboración propia

Debido a que la medición de tensión se realiza de manera indirecta, los equipos no deben ser dimensionados dependiendo de la capacidad de los carretes; para incluir la mejora sólo se debe considerar un sensor ultrasónico de diámetro y la programación del sistema (Considerando que la máquina posee control de torque en el take up).

4.5.3. Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora

Se observa que, la mayoría de las máquinas torcedoras y cerradoras no poseen un sistema que controle el frenado en las bobinas para asegurar una tensión homogénea, sino que la fuerza de freno se ajusta al comienzo (cuando la bobina se encuentra llena) y se mantiene constante a medida que se vacía la bobina, lo que ocasiona un aumento en la tensión con la cual el alambre se extrae de la bobina. La Figura 4.23 se observa el diagrama de cuerpo libre de una bobina y las fuerzas que actúan al desenrollar el alambre, donde F_1 y F_2 son las

fuerzas encargadas de frenar la bobina, F_t representa la tensión con la cual se desenrolla el torón y R_x es la reacción que se ejerce sobre el eje de giro.

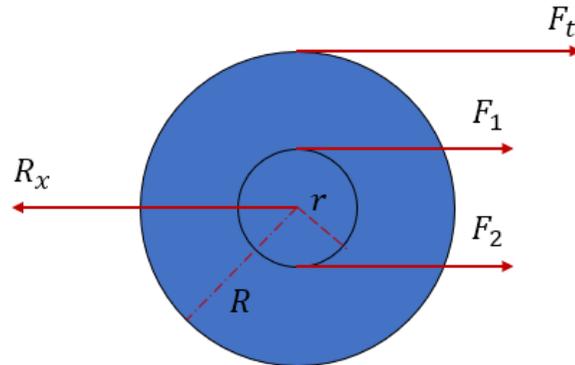


Figura 4.23: Fuerzas que actúan al desenrollar la bobina.
Fuente: Elaboración propia

Para dar tensión al alambre el sistema de frenado utiliza un freno de banda (Figura 4.24), el cual consiste en un tambor de freno (1) que mediante el rozamiento con una banda (2) provoca un par de torsión opuesto al movimiento, el cual determina la tensión con la cual se desenrolla el alambre. La banda de freno posee un extremo fijo y uno móvil, la fuerza sobre éste último determina el par de frenado obtenido finalmente.

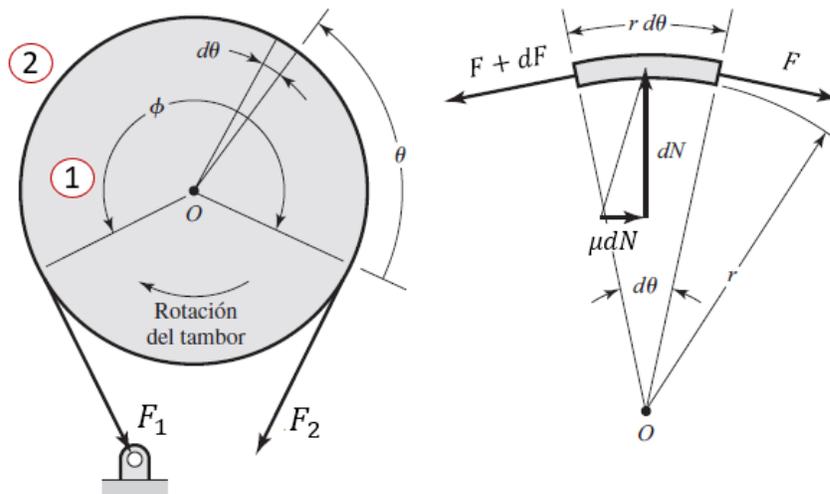


Figura 4.24: Diagrama de cuerpo libre freno de banda.
Fuente: [5]

El par de frenado queda definido según [5] como:

$$P_{freno} = (F_1 - F_2) \cdot r \quad (4.7)$$

$$= F_2(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r \quad (4.8)$$

donde F_2 representa la fuerza ejercida en el extremo libre de la banda de freno.

La Figura 4.25 se observa como varia la tensión del alambre a medida que cambia el radio de extracción (con un ajuste cada 200 metros como lo explicita el procedimiento de cerrado [14]). De ésta información se observa que la tensión en el alambre es inversamente proporcional radio de extracción siempre y cuando la fuerza de frenado sea constante.

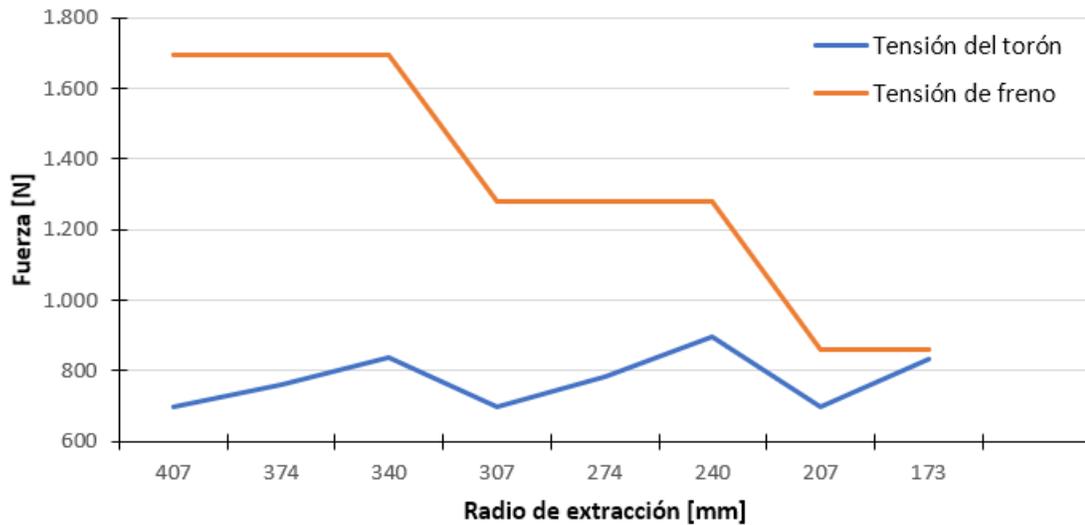


Figura 4.25: Variación en la tensión del alambre según el radio de extracción, cuando existe una fuerza de frenado constante

Fuente: Elaboración propia

Un controlador mecánico de tensión debe ser capaz de disminuir la fuerza sobre el extremo libre de la banda de freno a medida que el radio de extracción va disminuyendo. El diseño conceptual del controlador de tensión consideraba solo tres componentes importantes para su funcionamiento: ancla de freno, regulador de tensión, y palpador mecánico. Una vez comenzada la etapa de diseño básico se define el principio de funcionamiento del controlador de tensión, el cual obtiene la fuerza de frenado mediante la deformación de un resorte de tracción fijado en el extremo libre de la banda de freno; de ésta forma se debe lograr la variación en la deformación del resorte con el fin de obtener un par de frenado variable.

A continuación, se listan los componentes del diseño básico con sus correspondientes funciones.

- Palpador y seguidor: El palpador y el seguidor son dos brazos que se extienden radialmente de un eje, con un desfase angular fijo y de largos distintos. El palpador es el encargado de medir el diámetro de la bobina mientras ésta se vacía y así, al encontrarse solidario al mismo eje que el seguidor, provoca que el seguidor describa un arco de circunferencia del mismo ángulo que describe el palpador desde que la bobina se encuentra vacía hasta que se encuentra llena.

Los parámetros de diseño del palpador y seguidor son los siguientes: largo del palpador (L_p), largo del seguidor (L_s), recorrido del palpador (α_1) y ángulo de desfase (α_2).

- Tensor: El tensor es la pieza encargada de convertir el movimiento circular del seguidor en deformación del resorte, de ésta forma el seguidor es la pieza que logra controlar el par de frenado y por ende la tensión del alambre. El tensor se encuentra pivotado en el centro, por otra parte, uno de sus extremos se encuentra unido a la banda de freno mientras que el otro extremo queda libre. Una de las caras del extremo libre se encuentra siempre en contacto con el extremo del seguidor de ésta forma el giro del tensor se mantiene restringido según la posición del seguidor.

Los parámetros de diseño del tensor son los siguientes: altura (h_t), largo del tensor (L_t), ángulo del tensor (γ_1), concavidad (c), largo de la curva (L_c).

- Resorte: Es un resorte de tracción encargado de entregar la fuerza necesaria para tensar la banda de freno y de ésta forma ofrecer el par de frenado deseado para cada radio de extracción, la deformación del resorte está determinada por el radio de extracción de alambre y se efectúa mediante el traspaso de movimiento entre el palpador y el tensor. Los parámetros importantes por definir para la correcta selección del resorte son: la constante elástica del resorte (k) y el largo natural o en reposo del resorte (l_0).
- Banda de freno: La banda de freno es la encargada de ejercer el par de frenado mediante el rozamiento entre la banda y el tambor de freno o catalina (dependiendo del espacio disponible en el columpio). La banda de freno se considera inextensible para todos los cálculos asociados al diseño, por lo cual se debe utilizar bandas de freno que posean un alma de acero con el fin de hacer válido éste supuesto. Por otra parte, la banda de freno debe poseer terminaciones de cable de acero s ya que une el tensor y un extremo libre del resorte.
- Ancla de freno: Es el punto en el cual se fija el extremo libre del resorte y se utiliza para liberar o tensar inicialmente el sistema de frenado. Consiste en un sistema de enclave rápido para el frenado.

Una vez identificados todos los componentes necesarios para el sistema de control de tensión de freno, se debe dimensionar cada uno de éstos según las características de la máquina. A continuación se muestran los cálculos y dimensionamiento para el sistema de control de tensión aplicado a la máquina T0632, los cuales se muestran en la tabla 4.10¹⁵.

Para determinar los parámetros del resorte se realiza un equilibrio de torques con respecto al centro de la bobina.

$$T_d \cdot R_e = P_{freno} \quad (4.9)$$

$$T_d \cdot R_e = F_2(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r \quad (4.10)$$

Como la fuerza F_2 está determinada por el resorte, se utiliza la ley de Hooke para su representación, de ésta forma la ecuación 4.10 queda:

$$T_d \cdot R_e = -k \cdot \Delta l(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r \quad (4.11)$$

Como se desea que T_d sea constante para todo R_e , se evalúa la ecuación 4.11 en R_{max} (ecuación 4.12) y R_{min} (ecuación 4.13), debido a que k , T_d , μ y θ son valores constantes se puede restar

¹⁵El coeficiente de fricción se considera entre acero y fibras sintéticas [15]

Tabla 4.10: Datos de entrada para cálculos cinemáticos del controlador de tensión

Parámetro	Significado	Valor	Unidad
R_{max}	Radio máximo de la bobina	407	mm
R_{min}	Radio mínimo de la bobina	140	mm
L_p	Largo del palpador	500	mm
L_s	Largo del seguidor	100	mm
L_t	Largo del tensor	40	mm
h_t	Altura	279	mm
μ	Coefficiente de roce entre la banda de freno y el tambor o catalina	0,25	–
θ	Ángulo de envoltura de la banda de freno sobre el tambor o catalina	3,8	rad
r	Radio del tambor de freno o catalina	168	mm
T_d	Tensión deseada en el cable	250	N
R_e	Radio de extracción, variable entre R_{max} y R_{min}	–	mm

las ecuaciones 4.12 y 4.13, luego al despejar k se obtiene la ecuación 4.14, donde solo se requiere la deformación del resorte entre su punto de inicio y el punto final para determinar la constante del resorte.

$$T_d \cdot R_{max} = -k \cdot \Delta l_{inic}(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r \quad (4.12)$$

$$T_d \cdot R_{min} = -k \cdot \Delta l_{fin}(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r \quad (4.13)$$

$$k = -\frac{T_d \cdot (R_{max} - R_{min})}{(\Delta l_{inic} - \Delta l_{fin})(e^{\mu\theta} - 1) \cdot r} \quad (4.14)$$

Para determinar la deformación del resorte se considera el siguiente esquema cinemático que representa el movimiento del controlador de tensión, donde las ecuaciones 4.15 y 4.16 representan las ecuaciones de cierre del sistema; donde el módulo de R_{df} representa la distancia entre el punto de contacto de la banda con el tambor de freno y el extremo del tensor, la variación de ésta distancia determina la deformación total que efectúa el resorte.

$$\vec{R}_{ab} + \vec{R}_{bc} + \vec{R}_{ca} = 0 \quad (4.15)$$

$$\vec{R}_{cf} + \vec{R}_{fd} + \vec{R}_{dc} = 0 \quad (4.16)$$

Al resolver éstas ecuaciones según se muestra en el anexo N°2 (*Memoria de cálculo cinemática del controlador de tensión*), se obtienen la deformación total del resorte, la cual se aprecia en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Tabla resumen con la deformación total del resorte

Posición	γ [°]	r_{fd} [mm]	$\Delta l_{final} - \Delta l_{inic}$ [mm]
Bobina llena	135,0	497,0	15,7
Bobina vacia	158,9	481,4	

Una vez obtenida la deformación del resorte se calcula la constante elástica del mismo con la ecuación 4.14, obteniendo como resultado $k = 15,65[N/mm]$, además reemplazando k en las ecuaciones 4.12 y 4.13 se determina Δl_{inic} y Δl_{final} , una tabla resumen con los valores (4.12) se muestra a continuación.

Tabla 4.12: Especificaciones técnicas resorte

Constante elástica [N/mm]	15,97
Δl_{inic} [mm]	23,86
Δl_{final} [mm]	8,21

Con los datos técnicos del resorte ya definidos se procede a diseñar el tensor, éste dispositivo debe poseer la forma adecuada para que la deformación del resorte varíe linealmente a medida que el radio de extracción disminuye. Para ésto se debe diseñar la curva de contacto entre el seguidor y el tensor, ésta debe tener una concavidad tal que la variación de tensión en el torón sea mínima. La mínima variación de tensión se encuentra con una concavidad de 6,8 [mm], cuya tensión promedio estimada posee un 0,8 % de diferencia con respecto a la tensión de diseño o esperada. La tabla 4.13 muestra los datos del controlador de tensión para las distintas posiciones del palpador. Mientras que la Figura 4.26 muestra la relación entre la fuerza de frenado y la tensión con la cual se extrae el torón.

Tabla 4.13: Cálculos tensión seguidor curvo

Radio de extracción[mm]	γ [°]	r_{fd} [mm]	Δl [mm]	Fuerza de frenado [N]	Tensión cable [N]
127,0	175,4	127,6	2,2	1.111,3	700,0
118,6	176,0	127,5	2,0	1.036,8	699,2
110,3	176,5	127,4	1,9	963,2	698,9
101,9	177,0	127,2	1,8	890,3	699,2
93,5	177,6	127,1	1,6	818,1	700,0
85,1	178,1	126,9	1,5	746,1	701,1
76,8	178,7	126,8	1,3	673,8	702,3
68,4	179,3	126,6	1,2	600,5	702,6
60,0	180,0	126,5	1,0	525,0	700,0

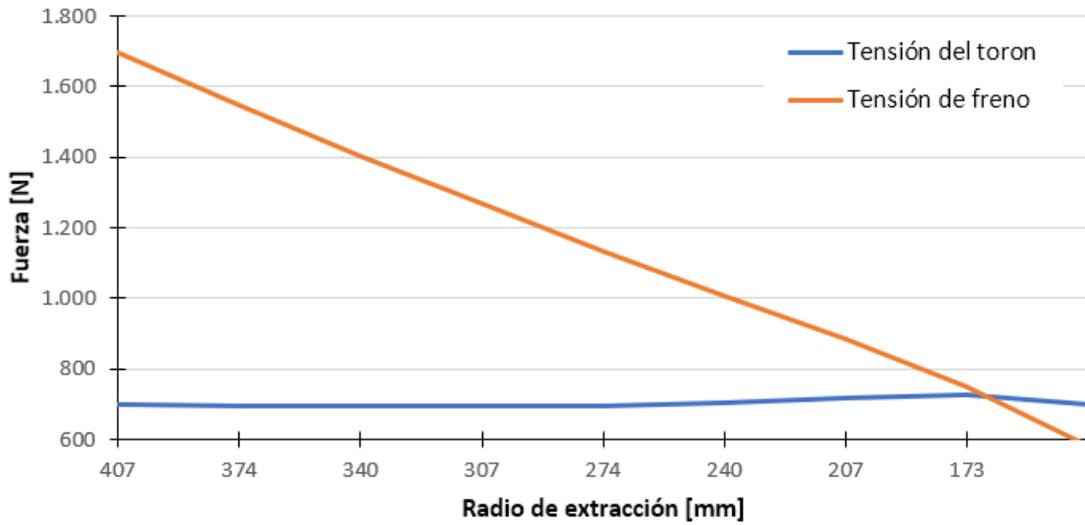


Figura 4.26: Variación en la tensión del torón según el radio de extracción, al usar el controlador de tensión .

Fuente: Elaboración propia

La Figura [4.27](#) muestra la forma final del tensor con sus especificaciones, el cálculo en detalle de la concavidad de la curva de contacto se muestra en el anexo N°2 *Memoria de cálculo cinemática del controlador de tensión*.

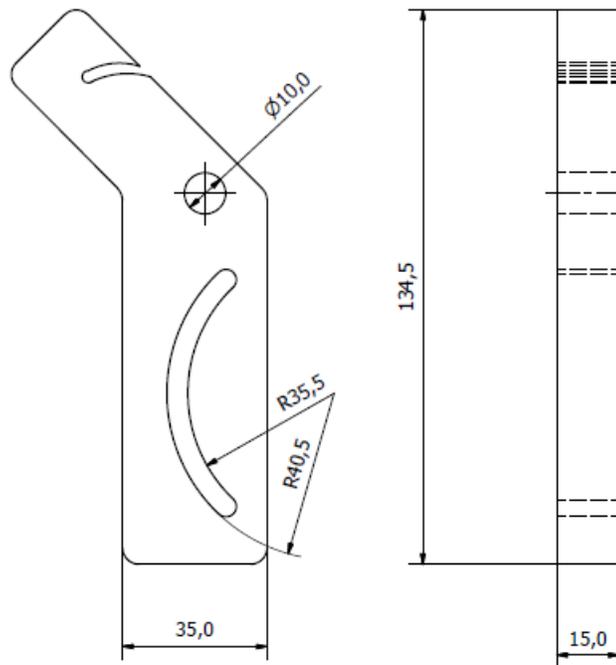


Figura 4.27: Elemento tensor para la máquina T0632 .

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de las fuerzas que se deben ejercer en la banda de freno para obtener la tensión deseada en el torón se procede a diseñar el resorte de extensión, cuya memoria de cálculo se encuentra en el anexo N°, la Figura 4.28 muestra el diseño del resorte, mientras que la tabla 4.14 muestra sus especificaciones.

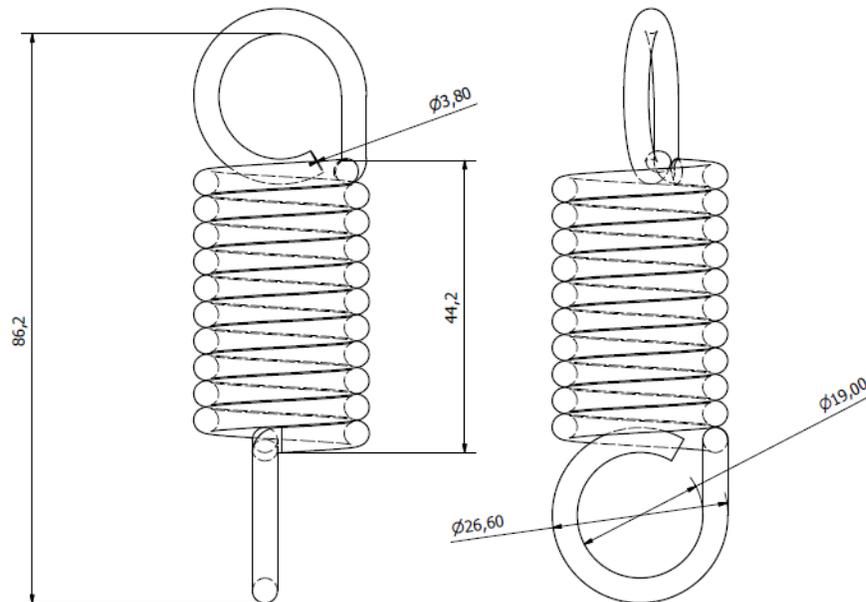


Figura 4.28: Diseño y medidas del resorte de tracción para la máquina T0632.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.14: Especificaciones técnicas para diseño del resorte

Fuente: Elaboración propia

Característica	Valor	Unidad
Cantidad de vueltas	10,2	—
Diámetro alambre	3,8	mm
Diámetro medio del resorte	22,8	mm
Diámetro interno	19	mm
Constante elástica	15,97	N/mm
Material	Alambre de piano A228	—

En la Figura 4.29 se muestran vistas isométricas del sistema controlador de tensión montado en un columpio de la máquina cerradora T0632, los planos de despiece y montaje se pueden observar en el anexo N°4 *Planos sistema control de tensión de frenos para máquina cerradora T0632*.

4.5.4. Detección de cortes de alambre en bobinado

Para profundizar el diseño conceptual del sistema de detección de alambres cortados en máquinas bobinadoras se debe considerar la disposición de los componentes de cada bobina-

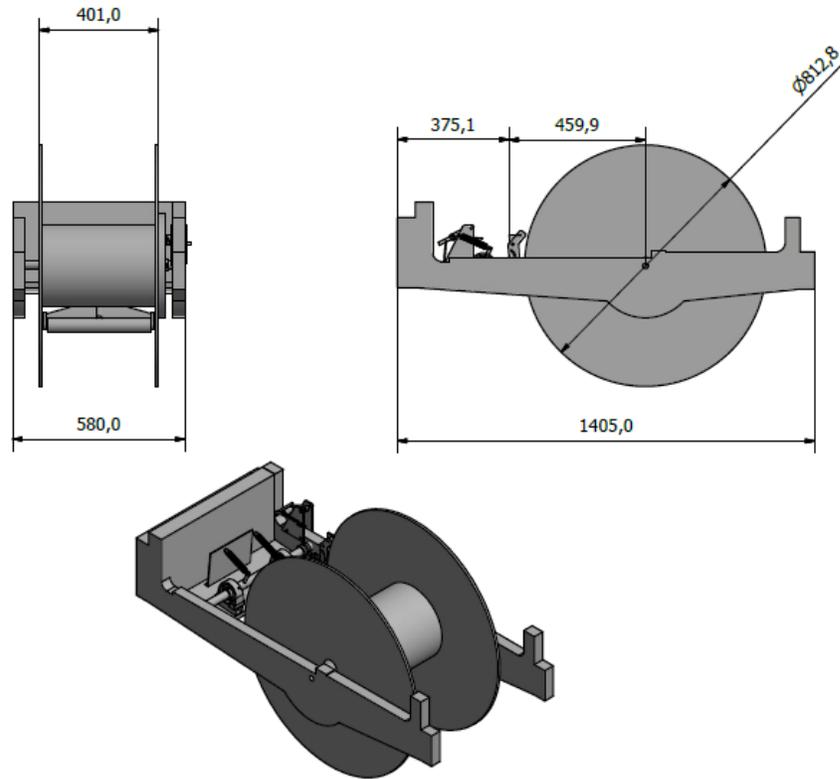


Figura 4.29: Diseño y montaje de sistema mecánico de control de freno para la máquina T0632.

Fuente: Elaboración propia

dora, afortunadamente las maquinas bobinadoras pueden ser clasificadas en 3 que comparten la misma disposición. Las cuales son detalladas a continuación.

- Cabezal tipo 1. Ésta disposición es compartida por los cabezales: B0207C, B0713D, B0207B, B0713A, B0207A (pertenecientes a HPC&ALMAS), B0612C, B0612B, B0612A, B0713B, B0713C y B0716D a (pertenecientes a IDB). Consisten en una zona de carga habilitada para bobinas y "queseras"¹⁶, luego de la zona de carga cuentan con una mesa de rodillos, cuentametros (que consiste en 3 poleas por las cuales pasa el alambre) y finalmente unas poleas guías que se mueven junto al devanador.

La Figura 4.30 muestra la bobinadora B0713B, su zona de carga (1), la mesa de rodillos (2), sistema cuentametros (3) y el devanador.

¹⁶Alambre enrollado sobre un núcleo de cartón desechable, el cual se monta entre dos placas metálicas para facilitar la extracción del alambre

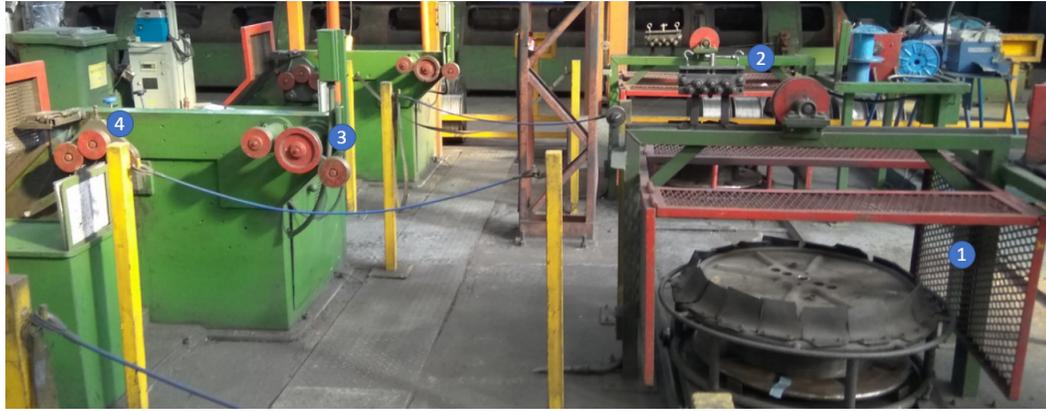


Figura 4.30: Fotografía de la bobinadora B0713B perteneciente a la miniplanta IDB, se muestran los distintos componentes y su disposición

Fuente: Elaboración propia

- Cabezal tipo 2

Éste tipo de bobinadoras se encuentra en la miniplanta IDM y consisten en una zona de carga habilitada para "spiders"¹⁷, bobinas y "queseras". luego se encuentran dos mesas de rodillos seguidas el sistema cuentametros (compuesto solo por una polea y un sensor inductivo) finalmente hay una última mesa de rodillos antes de entrar al devanador.

La Figura 4.31 muestra la bobinadora B1027C, con su zona de carga (1), el sistema cuentametros (2), las dos mesas de rodillos fijas (3) y la tercera mesa de rodillos que se ubica según el tipo de carga de la materia prima (4).

¹⁷Alambre enrollado sobre una torre, éste sistema posee la cualidad de contener mayores cantidades de alambre que las bobinas y queseras



Figura 4.31: Fotografía de la bobinadora B1027C perteneciente a la miniplanta IDB, se muestran los distintos componentes y su disposición
Fuente: Elaboración propia

- Cabezal tipo 3

Ésta disposición es compartida por los cabezales B1045A y B1045B, pertenecientes a la miniplanta PALA, poseen la zona de carga (habilitada para spiders y bobinas), una mesa de rodillos a la salida de la zona de carga, dos mesas de rodillos (una para deformación vertical y otra horizontal) entre las cuales se ubica el cuentametros para luego pasar al devanador que distribuye el alambre de manera homogénea en la bobina. La Figura [4.32](#) muestra la bobinadora B1045A, con su zona de carga (1), el sistema cuentametros (2), las dos mesas de rodillos fijas (3), la tercera mesa de rodillos que se ubica según el tipo de carga de la materia prima (4) y el devanador (5) la principal diferencia entre éstos cabezales y los pertenecientes a la miniplanta IDB es la forma del devanador.



Figura 4.32: Fotografía de la bobinadora B1045A perteneciente a la miniplanta PALA, se muestran los distintos componentes y su disposición
Fuente: Elaboración propia

Propuesta cabezal tipo 1

Éste tipo de cabezales solo posee una mesa de rodillos, en la cual se produce la mayor cantidad de fracturas de alambre, debido a ésto se debe buscar otro punto de referencia que sirva para la detección de cortes de alambre. Existen dos posibles puntos para ser utilizados como referencia, los cuales evitan el atrapamiento de alambre.

- Conjunto polea devanador
- Conjunto polea cuentametros

Debido a que el conjunto polea del devanador se mueve horizontalmente y se encuentra muy cercano a la zona de bobinado, se propone fijar como punto de referencia una de las tres poleas que componen el conjunto polea cuentametros, el cual se muestra en la Figura [4.33](#).



Figura 4.33: Conjunto polea cuentametros cabezal tipo 1.
Fuente: Elaboración propia.

Para lograr el aislamiento eléctrico de la polea se diseña un nuevo eje encamisado con placas de Ertalon®, de ésta forma la polea se encuentra aislada eléctricamente con respecto al resto de la máquina bobinadora permitiendo que se detecten los cortes de alambre. Una imagen de la polea aislada se puede apreciar en la Figura [4.34](#).

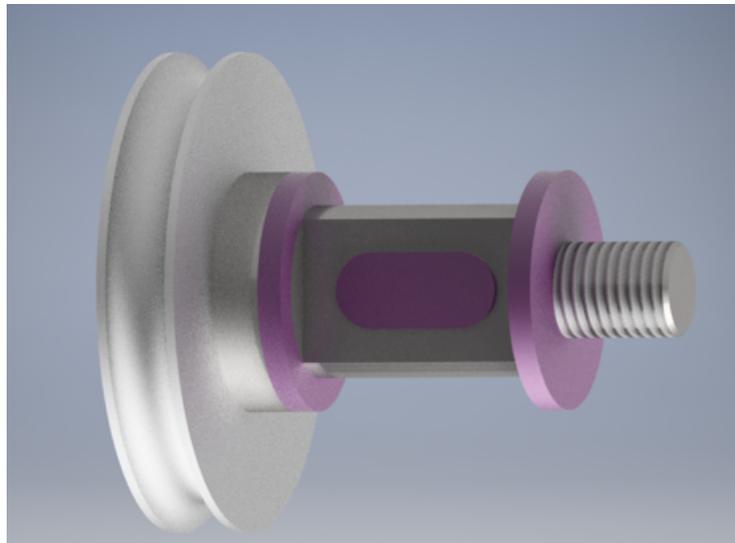


Figura 4.34: Polea modificada con placas de Ertalon.
Fuente: Elaboración propia.

Propuesta cabezal tipo 2

Éste tipo de cabezales es muy similar al cabezal tipo 3, con la diferencia de que en éste cabezal el devanador no cuenta con un conjunto de poleas que puedan ser utilizadas como

punto de referencia para un sistema de alambre cortado.

La solución óptima para éste tipo de cabezales es utilizar como punto de referencia un punto entre el punto de carga y la última mesa de rodillos, el cual debe evitar el atrapamiento del alambre. Debido a que no existe de manera previa un punto que cumpla con éstas características, existen dos posibles opciones; la primera es agregar un punto de contacto entre la última mesa de rodillos y el cabezal, mientras que la segunda alternativa es utilizar como punto de referencia la última mesa de rodillos. A continuación, la Tabla 4.15 muestra las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas.

Tabla 4.15: Ventajas y desventajas para mejoras en bobinado
Fuente: Elaboración propia

Alternativa	Ventaja	Desventaja
Agregar punto de contacto adicional	- Detecta corte de alambre en cualquier punto.	- Requiere de espacio adicional. - La deformación adicional del alambre puede provocar tensiones internas.
Utilizar última mesa de rodillos	- No se requiere agregar infraestructura adicional. - El corte de alambre se produce principalmente en la primera mesa de rodillos.	- No detecta cortes de alambre luego del punto de contacto . - La deformación puede provocar fractura.

Finalmente, se decide utilizar como punto de referencia la última mesa de rodillos (ya que al contar con tres mesas de rodillos, la deformación que se realiza en la última rara vez provoca una fractura en el alambre). La Figura 4.35 muestra la mesa de rodillos aislada eléctricamente sobre unos bujes de durocoton.

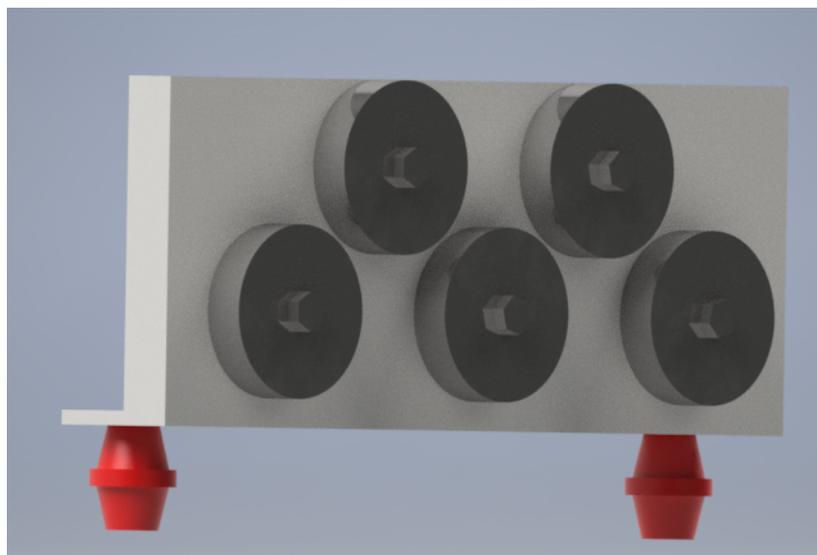


Figura 4.35: Mesa de rodillos aislada eléctricamente.
Fuente: Elaboración propia.

Propuesta cabezal tipo 3

Debido a que la mayoría de las fracturas de alambre se producen a la salida de la zona de carga, el sensor de alambre cortado debe estar ubicado entre la última mesa de rodillos y el cabezal de bobinado. Para esto existen dos posibles soluciones, la primera es aislar un elemento en el cual no se pueda producir un atrapamiento del alambre (polea cuenta metros o instalar polea extra), con el fin de asegurarse de que un corte de alambre siempre va a ser detectado. La otra opción es aislar la última mesa de rodillos, esta opción solo se recomienda cuando existen dos o más mesas de rodillos entre la zona de carga y el devanador del cabezal, ya que de ocurrir una fractura de alambre esta ocurrirá principalmente en las mesas de rodillos más cercanas a la zona de carga.

Se propone que el sensor de alambre cortado se ubique en el devanador, ya que éste posee en su carro distribuidor dos poleas por las cuales pasa el alambre (Figura 4.36); una de las cuales se aísla eléctricamente para así detectar la presencia de alambre.



Figura 4.36: Polea a aislar en bobinadora de PALA.
Fuente: Elaboración propia.

Para aislar una de las poleas se modifica el eje de ésta para evitar el contacto metal-metal entre la polea y el resto de la máquina. El rediseño considera realizar dos vaciados en las caras laterales del eje para insertar placas de material aislante (Ertalon®), además de reemplazar las golillas metálicas por golillas de material aislante. De esta forma el conjunto eje - polea

logra quedar aislado eléctricamente del resto de la máquina, permitiendo su uso como punto de referencia para el sistema de alambre cortado, la Figura 4.37 muestra el rediseño del eje.

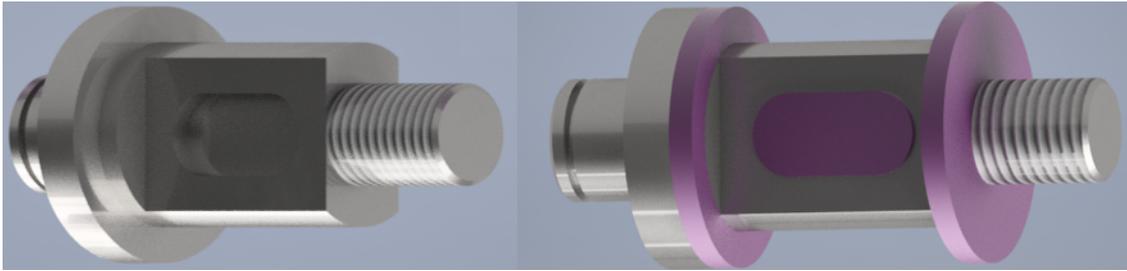


Figura 4.37: Conjunto eje aislado, a la izquierda se muestra el rediseño del eje y a la derecha el eje con los componentes aislantes.

Fuente: Elaboración propia.

Las mejoras propuestas permiten solucionar el problema encontrado, que es la falta de sensores de alambre cortado en bobinado y además corrigen el diseño de tal forma de asegurar la detección de cortes de alambre, liberando al operador de la tarea de detección.

Cabe destacar que las mejoras propuestas solo atacan a la detección temprana de cortes de alambres y no intervienen con el motivo que las provoca, ya que éste está netamente ligado a la calidad de la materia prima y al procedimiento de soldadura de alambres ejecutado por los operadores.

Las diferentes propuestas requieren de los mismos materiales para ser llevadas cabo, salvo la diferencia del conector aislante. Los materiales se listan a continuación:

- Conector aislante: Según el diseño para cada tipo
- Relé st110¹⁸
- Cable para instrumentación.
- Terminal.

4.5.5. Motorización independiente para Take up

Para realizar la modernización de los take up antiguos y así evitar la intervención del operador durante el encendido de la máquina, se debe modificar el sistema motor del take up, con el fin de entregar un par motor capaz de sacar de la inercia al carrete y proveer la tensión necesaria en el cable/torón de tal forma de evitar el deslizamiento del mismos sobre el capstan.

Ésta mejora se aplicará a todas las máquinas que no poseen un take up motorizado de manera independiente, las cuales se muestran en la tabla 4.16

¹⁸Éste relé es el encargado de detener el funcionamiento del sistema eléctrico de la máquina, ya que corta la corriente del sistema al detectar que el circuito punto de aislación-alambre-máquina se encuentra abierto.

Tabla 4.16: Máquinas para realizar upgrade en el Take up
Fuente: Elaboración propia

Máquina	Miniplanta	Tipo de máquina
T0712D	HPC & ALMAS	Torcedora
T0712E	HPC & ALMAS	Torcedora
T0710B	HPC & ALMAS	Torcedora
T0710A	HPC & ALMAS	Torcedora
T1810	HPC & ALMAS	Torcedora
T1812	HPC & ALMAS	Torcedora
T0912	HPC & ALMAS	Torcedora
T0712C	HPC & ALMAS	Torcedora
T0712B	HPC & ALMAS	Torcedora
T0712A	HPC & ALMAS	Torcedora
T2410A	HPC & ALMAS	Torcedora
T0922	HPC & ALMAS	Torcedora
T4116B	IDM	Torcedora
T4118	IDM	Torcedora
T3612A	IDB	Torcedora
T2518B	IDM	Torcedora
T2512	IDB	Torcedora
T0716	HPC & ALMAS	Cerradora
T0632	IDB	Cerradora

Comenzando desde la base que la estructura metálica que soporta el take up ya existe en todas las máquinas de la tabla 4.16. Ésta mejora considera tres equipos principales, los cuales se describen a continuación:

- Motor eléctrico: El motor eléctrico es necesario para entregar la potencia necesaria para el movimiento del carrete en el take up, se opta por un motor eléctrico ya que provee el 100 % de su par motor al encendido, además de poseer más alternativas de control automático que un motor hidráulico.
- Motorreductor: Se ubica luego del motor y provee una gran reducción en la velocidad de salida del sistema, sin modificar el funcionamiento del motor.
- Variador de frecuencia: El variador permite modificar y controlar la velocidad de salida del motor de tal forma de obtener una velocidad final variable.
- Sistema mecánico de transmisión de potencia: Es el mecanismo que transmite el movimiento desde la salida del motorreductor hasta el carrete montado en el take up, el cual puede ser mediante: correas, cadenas, trenes de engranajes, etc. La elección de cada sistema en particular se debe realizar considerando el espacio y la disposición de los equipos en cada una de las máquinas.

Las características y especificaciones técnicas de cada equipo deben ser definidas para cada máquina en particular, pero para efectos de realizar el estudio de factibilidad técnica se debe considerar si existe el espacio físico para el montaje de éstos equipos, para lo cual se considerarán tres configuraciones posibles, con sus respectivos requerimientos.

- **Configuración 1:**
 - Motor eléctrico de 10 HP, 4 polos.
 - Motorreductor de 50:1.
 - Variador de frecuencia 10 HP.
- **Configuración 2:**
 - Motor eléctrico de 30 HP, 4 polos.
 - Motorreductor de 50:1.
 - Variador de frecuencia 30 HP.

Para ambas configuraciones el motor y el motorreductor deben ser instalados en la máquina con el fin de realizar la transferencia de potencia mecánica mientras que el variador debe ser instalado en los tableros eléctricos correspondientes a la máquina.

Realizado el levantamiento de condición actual de las máquinas se concluye que se cumplen las condiciones técnicas de espacio para la instalación de motores eléctricos para independizar el movimiento del take up de las distintas máquinas. La tabla [4.17](#) muestra la configuración evaluada para cada una de las máquinas estudiadas.

Tabla 4.17: Configuración evaluada para cada una de las máquinas
Fuente: Elaboración propia

Máquina	Miniplanta	Configuración
T0712D	HPC & ALMAS	1
T0712E	HPC & ALMAS	1
T0710B	HPC & ALMAS	1
T0710A	HPC & ALMAS	1
T1810	HPC & ALMAS	1
T1812	HPC & ALMAS	1
T0912	HPC & ALMAS	1
T0712C	HPC & ALMAS	1
T0712B	HPC & ALMAS	1
T0712A	HPC & ALMAS	1
T2410A	HPC & ALMAS	1
T0922	HPC & ALMAS	1
T4116B	IDM	2
T4118	IDM	2
T3612A	IDB	1
T2518B	IDM	1
T2512	IDB	1
T0716	HPC & ALMAS	2
T0632	IDB	2

4.6. Evaluación económica

El objetivo de la presente sección es realizar el análisis de costo beneficio para cada una de las alternativas de mejora desarrolladas anteriormente, con el fin de obtener indicadores de evaluación de proyectos que faciliten la toma de decisiones de inversión (VAN, TIR, PRI).

4.6.1. Beneficios

A continuación se describen los beneficios de insertar cada una de las mejoras tecnológicas, para esto se describirán los beneficios monetarios (no conformidades, horas hombre, etc) y no monetarios (control del proceso, seguridad).

Mejoras en el sistema de lubricación de torones

- Beneficios monetarios
 - Ahorro energético: El recubrimiento aislante propuesto para el estanque produce una disminución en el costo de funcionamiento del sistema de lubricación debido a una reducción de las pérdidas de energía producto del intercambio de calor con el entorno. Se calcula una reducción del 84 % de las pérdidas de energía. La tabla 4.18 muestra el cálculo de ahorro promedio para un sistema de lubricación.

Tabla 4.18: Ahorro económico por concepto de energía para el sistema de lubricación.

Fuente: Elaboración propia.

Costo kWh año 2017 [CLP]	Ahorro energético [kWh]	Ahorro anual [MCLP]
62	0,5	0,27

- No conformidades: Basado en el registro de no conformidades y tomando un historial de 5 años (Desde el 2013 hasta el 2017), existen distintas no conformidades asociadas a “engrase inadecuado” cuya causa fue “Error de operación”, las cuales pueden ser asociadas a falta de lubricante en el producto, producto de mal funcionamiento del estanque (tapones por solidificación) y falta de lubricante en el estanque (por falta de recarga por parte del operador). La Figura 4.38 muestra el costo y la cantidad de no conformidades asociadas a “engrase inadecuado” encontradas en la planta de cables¹⁹.

¹⁹Cabe destacar que no todas las fallas del sistema de lubricación son tratadas como no conformidades, ya que si son tempranamente detectadas y el tramo afectado no es grande, se puede aplicar una capa de lubricante una vez formado el cable o torón.

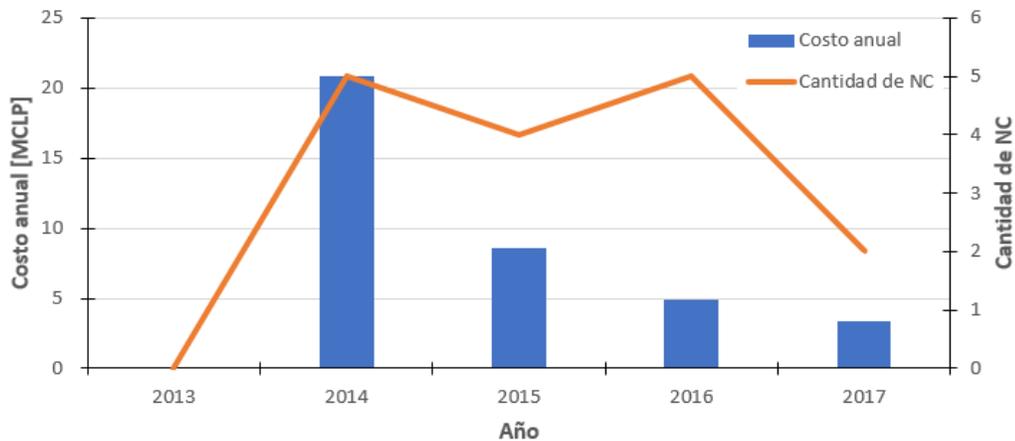


Figura 4.38: Costo y cantidad de no conformidades asociadas a engrase incorrecto
Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2017 se registraron 3,4 MCLP de pérdida por engrase incorrecto, debido a que no existe un indicador de cuál fue el motivo de la no conformidad se considera el 60 % de éstas pérdidas como fallas en el sistema de lubricación, de ésta forma dividiendo el monto por la cantidad de máquinas torcedoras donde el sistema de lubricación es una mejora por realizar, el ahorro a considerar por concepto de no conformidades asciende a 0,1 MCLP por máquina.

- Horas hombre: Durante el año 2016, se consideraron en promedio 591 horas de supervisión por máquina en el proceso de torcido y 565 horas en el proceso de cerrado, considerando el costo promedio de hora hombre para cada uno de los procesos además de considerar que un 30 % de éste tiempo es destinado a labores de supervisión del funcionamiento del sistema de lubricación, el ahorro promedio por máquina se asciende a 0,6 MCLP y el detalle se muestra en la tabla 4.19

Tabla 4.19: Ahorro HH por mejora en el sistema de lubricación
Fuente: Elaboración propia.

Proceso	HH de supervisión [h]	Costo promedio [CLP]	Ahorro anual [MLCP]
Torcido	591	2.590	0,5
Cerrado	565	3.080	0,6

- Beneficios no monetarios:
 - Confiabilidad: El operador se encarga de supervisar constantemente el funcionamiento del sistema de lubricación, para advertir la falta de lubricante en el tanque o la formación de tapones en el punto de aplicación, gracias a la inserción de la mejora, el estanque no deberá ser supervisado ya que éste avisará de manera automática la falta de lubricante o el endurecimiento de éste, deteniendo su funcionamiento.
 - Seguridad: Al asegurar una correcta temperatura del lubricante en el estanque y disminuir el endurecimiento de éste en la superficie de éste, se evita el uso de

sopletes a gas para mantener la temperatura correcta del lubricante, eliminando así una actividad riesgosa.

Control automático de torque en take up

- Beneficios monetarios
 - No conformidades: Basado en el registro de no conformidades y tomando un historial de 5 años (Desde el 2013 hasta el 2017), existen distintas no conformidades asociadas a “Degolladas”, “Pseudo degolladas” y “Cerradas de paso” cuya causa fue “Error de operación”. Las cuales se muestran en la Figura 4.39, para el año 2017 se registraron 3 No conformidades, con un costo de 4,9 MCLP se considera que con la inclusión de ésta tecnología se podrá evitar un 50 % de éstas no conformidades, lo cual asciende a 2,5 MCLP de ahorro.

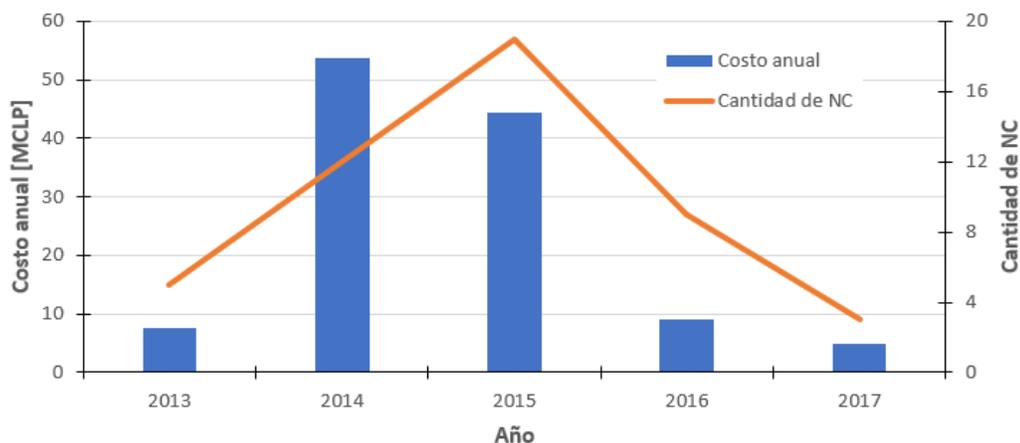


Figura 4.39: Costo y cantidad de no conformidades asociadas a falta de torque en el take up.
Fuente: Elaboración propia.

- Horas hombre: La mejora propuesta permite liberar al operador de realizar el ajuste de torque, liberando el tiempo destinado a ésta operación. Según [16] y [14], la labor de ajuste de torque depende de la máquina en la cual se trabaja y del tamaño de la bobina o carrete frontal, para efectos de la evaluación económica se considera un ahorro promedio por máquina de 0,5 MCLP anuales por concepto de horas hombre.
- Beneficios no monetarios:
 - Confiabilidad: Actualmente el operador se encarga de aumentar el torque del take up manualmente mediante un potenciómetro instalado en el panel de control, con la inserción de la mejora tecnológica el torque se ajustará automáticamente durante el proceso de fabricación, liberando al operador de la labor de controlar el torque, estandarizando la calidad del producto.
 - Seguridad: La medición de tensión no requerirá la intervención del operador con la máquina en movimiento como se realiza actualmente, eliminando una actividad riesgosa del procedimiento, aumentando la seguridad del proceso.

Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora

- Beneficios monetarios
 - No conformidades: Basado en el registro de no conformidades y tomando un historial de 5 años (Desde el 2013 hasta el 2017), existen distintas no conformidades asociadas a “Preformación inadecuada” cuya causa fue “Error de operación”. La preformación inadecuada es producto de bruscas diferencias de tensión en los torones que componen el cable, producto de éstas variaciones el preformador no logra deformar correctamente los torones afectando la forma del cable final. Para el año 2017 se registraron 8 No conformidades, con un costo de 24,7 MCLP (Figura 4.40) se considera que con la inclusión de ésta tecnología se podrá evitar un 60 % de éstas no conformidades, lo cual asciende a 14,8 MCLP de ahorro.

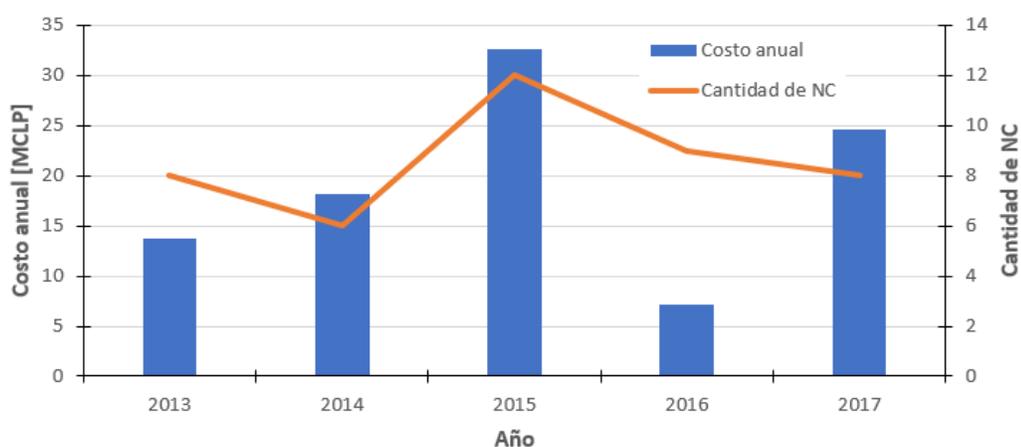


Figura 4.40: Costo y cantidad de no conformidades asociadas preformación inadecuada
Fuente: Elaboración propia.

- Horas hombre: La mejora propuesta permite liberar al operador de realizar el ajuste de freno en máquinas cerradoras, el procedimiento de cerrado de cables estipula que el ajuste debe realizarse cada 200 metros de producción, por ende, para temas de planificación se asigna un tiempo a la ejecución de ésta labor [16]. Para calcular el ahorro por concepto de hora hombre, se considera la capacidad máxima de producción de cada máquina considerando dos turnos de 9 horas más horas extra, ésta capacidad se divide por 200 metros con el fin de obtener las veces que se deberá realizar el ajuste, luego se multiplica por la cantidad de columpios de cada máquina y el tiempo asignado por planificación para ésta tarea [14] y se obtiene el ahorro en horas hombre. Con el fin de obtener un indicador económico la cantidad de horas hombre se multiplica por el costo promedio de HH de producción en cerrado. El resumen de lo anteriormente dicho se encuentra en la tabla 4.20.

Tabla 4.20: Ahorro de HH por instalar el sistema de ajuste automático de freno.
Fuente: Elaboración propia.

Máquina	T0632	T0733	T1222	T0725
Producción diaria	8823	10496	5386	6925
Cantidad de columpios	6	7	12	7
Tiempo de regulación por columpio [min]	1,5	1,5	1,5	1,5
Veces que se regula	44	52	27	35
Ahorro anual de HH [h]	2103	2843	2334	1875
Ahorro anual [MCLP]	5,4	7,4	6,0	4,9

- Beneficios no monetarios:
 - Confiabilidad: El operador está encargado de ajustar la tensión de los frenos en cada uno de los columpios de la máquina, la correcta ejecución de ésta tarea se encuentra ligada a la experiencia y proactividad del operado, la inclusión del sistema de control automático de frenos permite obtener una tensión constante, asegurando una preformación adecuada en el cable, estandarizando la calidad del producto.
 - Seguridad: El ajuste de tensión de frenos se realiza con máquina detenida, aun así, al evitar éste ajuste, se evita la interacción hombre - máquina disminuyendo el riesgo del proceso.

Detección de alambres cortados en bobinado

- Beneficios monetarios:
 - Liberación de tiempo: Actualmente como el sistema de detección de alambres cortados no funciona correctamente, el operador debe estar pendiente de cuando se produce un corte de alambre para así detener la máquina. Debido a que los cortes de alambre no siempre son detectados a tiempo, muchas veces la máquina continúa funcionando con un extremo libre de alambre moviéndose a gran velocidad. Mientras la bobina gira el alambre que ya estaba en ésta se suelta y se provocan enredos con el extremo libre del alambre, debido a ésto el operador debe reprocesar la bobina, desarmando el enredo y bobinando el alambre de manera manual, para volver a cargarla a la máquina y seguir con el procedimiento de bobinado.

La tabla [4.21](#) muestra el ahorro en HH gracias a la inclusión de un sistema de detección de alambres cortados, para éste cálculo se consideraron las HH promedio que fueron invertidas en la supervisión del proceso de bobinado y de éste total se pronostica un ahorro del 50 %.

Tabla 4.21: Ahorros por incluir el sistema de detección de alambres cortados en bobinado
Fuente: Elaboración propia

Parametro	Valor	Unidad
Tiempo promedio de supervisión	750	Horas hombre
Ahorro por máquina	375	Horas hombre
Ahorro por máquina	0,61	MCLP
Ahorro total proceso	7.500	Horas hombre
Ahorro total proceso	12,2	MCLP

- Beneficios no monetarios
 - Mayor control del metraje: Al no detectarse un corte de alambre, el sistema cuentametros de la máquina sigue contando metros debido al giro de la polea, lo cual ocasiona problemas en la etapa de torcido, ya que al tener una bobina con menos alambre del estipulado se debe realizar un cambio de serie adicional o en el caso de ser un torón sin soldaduras (por especificación) éste debe ser fabricado nuevamente desde el principio.

Motorización independiente para Take up

- Beneficios monetarios: Al ser una mejora enfocada en la seguridad no posee beneficios económicos tangibles para ser incluidos en la evaluación del proyecto.
- Beneficios no monetarios:
 - Seguridad: La inclusión de ésta mejora en las distintas máquinas de la empresa permite varias mejoras en la seguridad, la primera y más importante es que elimina la intervención directa del operador durante el proceso, por otra parte, al poseer un ajuste electrónico de torque se evita la regulación del mismo mediante el apriete de balatas, disminuyendo el riesgo inherente de la intervención. Finalmente se reduce el esfuerzo físico que debe realizar el operador al embalar las bobinas o carretes completos, disminuyendo el riesgo de dolencias por esfuerzo excesivo.

4.6.2. Costo

Las tablas [4.22](#), [4.23](#), [4.24](#), [4.25](#) y [4.26](#) muestran el detalle de costo de cada uno de las mejoras propuestas, separados por items, cabe destacar que el costo mostrado en las tablas hace referencia a implementar la medida en una sola máquina.

La propuesta "Mejoras en el sistema de lubricación de torones" se implementará solo en máquinas torcedoras ya que el proceso de cerrado no siempre lleva engrase en sus cables. Para el caso de 'Control automático de torque en take up' se evalúa su instalación en 7 máquinas de la planta, las cuales son: T0632, P0855, P3625, P4824, P4225, T0733, P1825BT. La mejora "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras" se evalúa para 4 máquinas cerradoras: T0733, T0632, T1222, T0725, mientras que "Detección de cortes de alambre en bobinado" se evalúa para los 20 cabezales de bobinado de la empresa, finalmente

la mejora de seguridad "Motorización independiente para Take up ", se evalúa para las 19 máquinas que poseen ésta condición, tal como se muestra en la tabla [4.16](#).

Tabla 4.22: Costos "Mejoras en el sistema de lubricación de torones"
Fuente: Elaboración propia

Item	Costo [MCLP]
Sensor de nivel	0,195
Lana de vidrio	0,02
Metal base	0,04
Termocupla adicional	0,14
Calefactor bandeja	0,2
Mano de obra	0,8
Total	1,395

Tabla 4.23: Costos " Control automático de torque en take up"
Fuente: Elaboración propia

Item	Costo [MCLP]
Sensor de diámetro	0,7
Montaje mecánico	0,4
Programación de equipos	1,4
Total	2,5

Tabla 4.24: Costos "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras "
Fuente: Elaboración propia

Item	Costo [MCLP]
Fabricación componentes maestranza	2,1
Montaje	4,2
Total	6,3

Tabla 4.25: Costos "Detección de cortes de alambre en bobinado"
Fuente: Elaboración propia

Item	Costo [MCLP]
Relé	0,1
Conector aislante	0,02
Terminales eléctricos	0,03
Instalación	0,1
Total	0,25

Tabla 4.26: Costos "Motorización independiente para Take up "
 Fuente: Elaboración propia

Item	Costo [MCLP]
Motor eléctrico	3,8
Motoreductor	0,7
Variador de frecuencia	2,5
Tablero de control	0,8
Sistema mecánico de transmisión de potencia	1,1
Mano de obra	2,7
Total	11,6

4.6.3. Indicadores de evaluación de proyectos

La evaluación económica se realiza en un horizonte de 5 años, sobre el cual se evalúa la inserción de las mejoras propuestas, cada una por si sola. Además de entregar el proyecto de inversión completo considerando las mejoras a toda la planta de cables.

Para la evaluación de todos los proyectos se utilizó una tasa de descuento de un 12% correspondiente al rubro metalmecánico en Chile, además de considerar una depreciación acelerada de 5 años, informada por el SII [17], correspondiente a maquinaria y equipos en general.

Mejoras en el sistema de lubricación de torones

Según los costos y beneficios (económicos), enunciados en la sección anterior se evalúa la inversión de las mejoras en los sistemas de lubricación de todas las máquinas torcedoras (20) de la planta. Considerando la totalidad de la inversión en el año cero, el proyecto posee un periodo de retorno de la inversión de 1,7 años, una TIR del 38% y un VAN de 19 [MCLP]. La tabla 4.27 muestra los flujos de caja correspondientes a los 5 años de evaluación del proyecto, mientras que la tabla 4.28 muestra los indicadores de evaluación para éste proyecto.

Tabla 4.27: Flujo de caja "Mejoras al sistema de lubricación"

Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica "Mejoras al sistema de lubricación"							
Año		0	1	2	3	4	5
Beneficios	MCLP		16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Liberación de horas hombre	MCLP		9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
No conformidades	MCLP		5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Ahorro energético	MCLP		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Depreciación	MCLP		-5,9	-5,9	-5,9	-5,9	-5,9
Flujo antes de impuesto	MCLP		11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Impuesto	MCLP		-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
Flujo después del impuesto	MCLP		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Depreciación	MCLP		5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Inversión	MCLP	-29,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Materiales	MCLP	12,5					
Mano de obra	MCLP	16,8					
Flujo de caja	MCLP	-29,3	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9

Tabla 4.28: Indicadores de evaluación para "Mejoras en el sistema de lubricación"

Indicador	Valor	Unidad
VAN	19	MCLP
TIR	38	%
PRI	1,7	Años

Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradora

Según los costos y beneficios (económicos), enunciados en la sección anterior se evalúa la inversión en el sistema de control de frenado para bobinas en algunas máquinas cerradoras (T0632, T0733, T1222, T0725). Considerando la totalidad de la inversión en el año cero, el proyecto posee un periodo de retorno de la inversión de 0,7 años, una TIR del 114% y un VAN de 72 [MCLP]. La tabla 4.29 muestra los flujos de caja correspondientes a los 5 años de evaluación del proyecto, mientras que la tabla 4.30 muestra los indicadores de evaluación para éste proyecto.

Tabla 4.29: Flujo de caja "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras"

Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica "Mejoras al sistema de lubricación"							
Año		0	1	2	3	4	5
Beneficios	MCLP		38,4	38,4	38,4	38,4	38,4
Liberación de horas hombre	MCLP		23,6	23,6	23,6	23,6	23,6
No conformidades	MCLP		14,8	14,8	14,8	14,8	14,8
Depreciación	MCLP		-5,0	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0
Flujo antes de impuesto	MCLP		33,4	33,4	33,4	33,4	33,4
Impuesto	MCLP		-9,0	-9,0	-9,0	-9,0	-9,0
Flujo después del impuesto	MCLP		24,4	24,4	24,4	24,4	24,4
Depreciación	MCLP		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Inversión	MCLP	-25,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Materiales	MCLP	8,4					
Mano de obra	MCLP	16,8					
Flujo de caja	MCLP	-25,2	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4

Tabla 4.30: Indicadores de evaluación para "Sistema de control de frenado para bobinas de máquinas cerradoras"

Indicador	Valor	Unidad
VAN	72	MCLP
TIR	114	%
PRI	0,7	Años

Control automático de torque en take up

Según los costos y beneficios (económicos), enunciados en la sección anterior se evalúa la inversión en el sistema de control automático de torque en el Takeup, ésta mejora es evaluada para 7 máquinas de la planta. Considerando la totalidad de la inversión en el año cero, el proyecto posee un periodo de retorno de la inversión de 2,9 años, una TIR del 16 % y un VAN de 2 [MCLP]. La tabla 4.31 muestra los flujos de caja correspondientes a los 5 años de evaluación del proyecto, mientras que la tabla 4.32 muestra los indicadores de evaluación para éste proyecto.

Tabla 4.31: Flujo de caja “ Control automático de torque en take up”
Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica “ Control automático de torque en take up”							
Año		0	1	2	3	4	5
Beneficios	MCLP		6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
Liberación de horas hombre	MCLP		3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
No conformidades	MCLP		2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Depreciacion	MCLP		-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5
Flujo antes de impuesto	MCLP		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Impuesto	MCLP		-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
Flujo despues del impuesto	MCLP		1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Depreciación	MCLP		3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Inversión	MCLP	-17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Materiales	MCLP	7,0					
Mano de obra	MCLP	10,5					
Flujo de caja	MCLP	-17,5	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4

Tabla 4.32: Indicadores de evaluación para “ Control automático de torque en take up”

Indicador	Valor	Unidad
VAN	2	MCLP
TIR	16	%
PRI	2,9	Años

Detección de cortes de alambre en bobinado

Según los costos y beneficios (económicos), enunciados en la sección anterior se evalúa la inversión en el sistema de detección de cortes de alambre para las máquinas bobinadoras de la planta. Considerando la totalidad de la inversión en el año cero, el proyecto posee un periodo de retorno de la inversión de 0,4 años, una TIR del 181 % y un VAN de 25 [MCLP]. La tabla 4.33 muestra los flujos de caja correspondientes a los 5 años de evaluación del proyecto, mientras que la tabla 4.34 muestra los indicadores de evaluación para éste proyecto.

Tabla 4.33: Flujo de caja "Detección de cortes de alambre en bobinado"
Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica "Detección de cortes de alambre en bobinado"							
Año		0	1	2	3	4	5
Beneficios	MCLP		12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
Liberación de horas hombre	MCLP		12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
Depreciación	MCLP		-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
Flujo antes de impuesto	MCLP		11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Impuesto	MCLP		-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
Flujo después del impuesto	MCLP		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Depreciación	MCLP		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Inversión	MCLP	-5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Materiales	MCLP	3,0					
Mano de obra	MCLP	2,0					
Flujo de caja	MCLP	-5,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1

Tabla 4.34: Indicadores de evaluación para "Detección de cortes de alambre en bobinado"

Indicador	Valor	Unidad
VAN	25	MCLP
TIR	181	%
PRI	0,4	Años

Motorización independiente para Take up

Debido a que ésta mejora solo posee beneficios en seguridad, no se realiza un flujo de caja para evaluar el proyecto de inversión.

4.6.4. Proyecto de inversión

Se plantea el proyecto de inversión para la empresa Prodinsa S.A, el cual permite realizar una inversión inicial pequeña con el fin de ir costeadando el resto de las mejoras con los ahorros pronosticados para las mismas, disminuyendo así el gasto directo de recursos.

Al igual que la evaluación de cada uno de los proyectos, el proyecto de inversión se realiza en un horizonte de 5 años, en el cual los bienes se deprecian en su totalidad. Para el cálculo del VAN se utiliza una tasa de descuento del 12%, la cual es utilizada para la evaluación de todos los proyectos de inversión en la empresa.

La tabla 4.35 el proyecto de inversión, el cual contempla realizar de manera escalonada las inversiones, de ésta forma se minimiza la inversión inicial pudiendo costear el resto de los proyectos con los beneficios que se generan a partir de ésta.

En resumen, el proyecto de inversión posee un VAN de 91 [MCLP] y una TIR de 98%.

Tabla 4.35: Proyecto de inversión
Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica "Proyecto completo"							
Año		0	1	2	3	4	5
Beneficios	MCLP		38,4	50,5	67,5	73,6	73,6
Beneficios totales	MCLP		38,4	50,5	67,5	73,6	73,6
Depreciacion	MCLP		-5,0	-6,3	-16,1	-24,8	-24,8
Flujo antes de impuesto	MCLP	0,0	33,4	44,3	51,4	48,8	48,8
Impuesto	MCLP	0,0	-9,0	-11,9	-13,9	-13,2	-13,2
Flujo despues del impuesto	MCLP	0,0	24,4	32,3	37,5	35,6	35,6
Depreciación	MCLP		5,0	6,3	16,1	24,8	24,8
Inversión	MCLP	-25,2	-5,0	-29,3	-17,5	0,0	0,0
Materiales y mano de obra	MCLP	25,2	5,0	29,3	17,5		
Flujo de caja	MCLP	-25,2	24,4	9,3	36,1	60,4	60,4

Conclusiones

En base a los estudios y análisis efectuados en el desarrollo de este proyecto se concluye que:

- i La intervención del operador durante la fabricación de cables de acero se puede clasificar en dos grandes grupos, el primero son las actividades de setup, en las cuales se encuentran todas las actividades de preparación de la máquina antes de la producción. Es en esta etapa donde la influencia del operador en la calidad es máxima, ya que es el encargado de obtener todas las especificaciones técnicas del torón, cable o alma a producir. En el segundo grupo se encuentran las actividades de ajuste y monitoreo que se realizan una vez que la maquina se encuentra funcionando. En relación al tiempo que se destina a cada una de estas labores se encuentra que el 60 % del tiempo se utiliza en labores de setup mientras que el 40 % restante se utiliza en la fabricación del producto.

Las actividades realizadas mientras las máquinas se encuentran funcionando son en su mayoría de carácter circunstancial, para esto se hace necesario que las mejoras vayan enfocadas a la reducción del riesgo de que ocurra un evento o la incorporación de instrumentación con el fin de una detección automática de averías. Por otra parte, existen labores de ajuste que se deben realizar cada cierto tiempo, según los procedimientos estándares, para así asegurar la calidad del producto; en la realidad estos procedimientos no son cumplidos a cabalidad ya que se carece de un control de procesos. Con respecto al punto anterior las mejoras deben ir enfocadas hacia un ajuste automático y en línea de las variables de proceso.

- ii Las nuevas tecnologías susceptibles de incorporarse en el proceso son :el control de torque basado en el diámetro para enrolladoras, el cual es usado en la fabricación de cables conductores eléctricos, papel e industria textil; la medición de temperatura y nivel de fluidos, asociados a la industria química y alimentaria; y finalmente el control de variables de proceso intrínsecas de la fabricación de cables de acero (preformación y corte de alambres), las cuales provienen de otras fabricas de cables de acero.
- iii El impacto de introducir nuevas tecnologías al proceso se cuantifica considerando la actividad sobre la cual se reemplaza la labor del operador, para esto se identifica su influencia en tres ámbitos: productividad (midiendo el tiempo que se ejecuta en la actividad), seguridad (riesgo asociado a la actividad) e influencia en la calidad del producto (en base al historial de productos defectuosos de la empresa), de esta forma se logra identificar las mejoras que conllevan un mayor beneficio para así ser desarrolladas en su etapa de ingeniería conceptual y básica.

- iv Al desarrollar el trabajo en fabrica se identificaron diez medidas para la mejora operacional, de las cuales dos pertenecen al proceso de bobinado, cuatro para torcido, dos para cerrado y dos son comunes para el proceso de torcido y cerrado. Solo cinco medidas fueron desarrolladas en la etapa de ingeniería básica: Corte de alambre en bobinado, mejoras en el sistema de lubricación de torones, control de torque en enrolladoras, control de tensión de freno para bobinas de máquinas cerradoras y cambio a motorización independiente en enrolladoras; siendo esta ultima una mejora netamente de seguridad por lo que queda aislada de la evaluación económica por falta de beneficios monetarios.
- v Para la evaluación económica de cuatro medidas se realiza un flujo de caja a 5 años considerando los beneficios económicos correspondientes a la liberación de HH de producción, además de la reducción en costos por productos defectuosos (No conformidades) y la inversión de cada una de éstas, dentro de las cuales destaca "Detección de cortes de alambre en bobinado", la cual posee un VAN de 22[MCLP], una TIR de 181 % y un PRI de 0,4 años.

En su totalidad el proyecto contempla una inversión inicial de 25,2 MCLP, cuyos beneficios permiten costear la inversión del resto de las mejoras, para así obtener un ahorro proyectado anual a partir de el cuarto año de 60,4 MCLP. El ahorro se compone de 2992 HH productivas de torcido, 10.595 HH productivas de cerrado, 7.500 HH productivas de bobinado y 19,1 MCLP por concepto de No conformidades.

Bibliografía

- [1] Prodinsa. *Manual técnico de productos*. Prodinsa, Santiago, 2016.
- [2] Mind Do consulting. *Cerrado de cables*. Proyecto "Knowledge management", Santiago, Chile, 2012.
- [3] Technical shift manager. Terry Eyre. *Conversaciones personales*. Septiembre 2017, Wellington Quay, Canada.
- [4] IFM Electronic GMBH. *Technical datasheet UGT584*. [en línea] <<https://www.ifm.com/be/en/product/UGT584>>[Consulta: 05 febrero 2018], Essen, Alemania.
- [5] J. Keith Nisbett Richard G. Budynas. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley 9na edición*. Mc Graw Hill., New York, Estados Unidos, 2012.
- [6] Alexander Platz and Sergio Rosas. *Increase productivity project*. BBMS, Santiago, Chile, 2017.
- [7] G. F. Kinney. *Practical Risk Analysis for Safety Management*. Naval Weapons Center, China Lake, CA, 1976.
- [8] Fuchs lubricants Co. *Hoja tecnica, anticorit WRC H29 CW*. Harvey, Estados Unidos, 2014.
- [9] Mind Do consulting. *Torcido de torones*. Proyecto "Knowledge management", Santiago, 2012.
- [10] Raul Coss. *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. Editorial Limusa S.A, Ciudad de México, México, 2005.
- [11] Alton Edward Bailey. *Industrial Oil and Fat Products 2nd ed*. Interscience Publishers, Inc., New York, Estados Unidos, 1951.
- [12] Yunus A. Cengel. *Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico 3ra edición*. Mc Graw Hill., New York, Estados Unidos, 2007.
- [13] Siemens. *Instrumentación de campo para la automatización de procesos*. Siemens AG, Berlin, Alemania, 2017.

- [14] BBRG Santiago. *Work load model Cerrado*. Santiago, CHile, 2017.
- [15] John W. Jewett Raymond A. Serway. *Serway physics for scientists and engineers 6ta edición*. Thomson Brooks/Cole., New York, Estados Unidos, 2004.
- [16] BBRG Santiago. *Work load model Torcido*. Santiago, CHile, 2017.
- [17] Servicio de impuestos internos Chile. *Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*. [en línea] <<http://www.sii.cl/bienes/tablavidaenero>>[Consulta: 16 febrero 2018], Santiago, Chile.
- [18] *Design Handbook: Engineering Guide to Spring Design*. Associated Spring-Barnes Group Inc., Bristol, Estados Unidos, 1987.

Anexos

Anexo N°1

El anexo N°1 muestra el estado actual de las máquinas bobinadoras, torcedoras y cerradoras de Prodinsa.

Estado actual máquinas cerradoras

Fuente: Elaboración propia

Máquina	Enhebrado	Capstan	Take up	Ajuste frenos	Devanador	Estanque de grasa
P4824	No aplica	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Electrico	Bomba
P4225	No aplica	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T1222	Externo	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Perfecto	Bomba
P1825BT	No aplica	Independiente	Independiente	Celdas de carga	Electrico	Rueda y motor
T0725	Externo	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T0716	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecanico	Rueda y motor
T2512B	Externo	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T0733	Externo	Dependiente	Independiente	Ancla y cordel	Perfecto	Rueda y motor
T0840	Interno	Independiente	Independiente	Celdas de carga	Perfecto	Rueda y motor
T0632	Interno	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
P0855	No aplica	Independiente	Independiente	Celda de carga	Electrico	Rueda y motor

Estado actual de máquinas torcedoras
Fuente: Elaboración propia

Máquina	Enhebrado	Capstan	Take up	Tensión bobinas	Devanador	Estanque de grasa
T0712D	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T0712E	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T0710B	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Posterior a la formación del torón
T0710A	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Posterior a la formación del torón
T1810	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T1812	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T0912	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Posterior a la formación del torón
T0712C	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Posterior a la formación del torón
T0712B	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Posterior a la formación del torón
T0712A	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Posterior a la formación del torón
T2410A	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T0922	Interno	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T2518A	Externo	Dependiente	Hidraulico	Ancla y cordel	Hidraulico	Rueda y motor
T4116B	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T4118	Interno	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Electrico	Rueda y motor
T2518C	Externo	Dependiente	Hidraulico	Ancla y cordel	Hidraulico	Rueda y motor
T3612C	Externo	Dependiente	Hidraulico	Ancla y cordel	Hidraulico	Rueda y motor
T3612A	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T2518B	Interno	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
T2512	Externo	Dependiente	Dependiente	Ancla y cordel	Mecánico	Rueda y motor
P3625	No aplica	Independiente	Independiente	Chicharra con cadena	Perfecto	Rueda y motor

Estado actual máquinas bobinadoras

Fuente: Elaboración propia

Bobinadora	Devanador	Freno	Alarma de alambre cortado
B1027a	Hidráulico	Neumático	Si
B1027b	Mecánico con actuador neumático	No posee	No
B1027c	Mecánico con actuador neumático	No posee	No
B1027d	Mecánico con actuador neumático	No posee	No
B1027e	Mecánico	Neumático	Si
B0612C	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0612B	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0612A	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0713B	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0713C	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0716D	Hidráulico	No posee	Si
B0207C	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0713D	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0207B	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0713A	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B0207A	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B1040B	Mecánico	No posee	Si
B1040A	Mecánico	No posee	Si
B1045A	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si
B1045B	Mecánico con actuador neumático	No posee	Si

Anexo N°2 Memoria de calculo cinemática del controlador de tensión

La siguiente memoria de calculo tiene como objetivo principal entregar el diseño del tensor, para obtener una tensión constante a lo largo de todo el vaciado de la bobina.

Para la resolución de este problema se debe estudiar la cinemática del mecanismo en el caso de un tensor de cara plana y en el caso ideal para obtener tensión constante, para luego comparar los dos casos y obtener la curvatura de la cara del tensor.

A continuación, la Figura 4.41 muestra de manera esquemática el controlador de tensión, identificando cada uno de sus puntos. La Figura 4.42 muestra las dimensiones y ángulos del controlador de tensión, las cuales serán considerados en los cálculos.

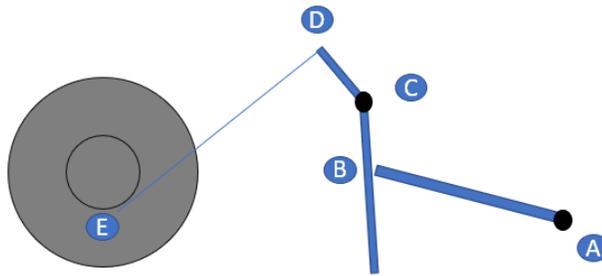


Figura 4.41: Esquema del controlador de tensión.
Fuente: Elaboración propia

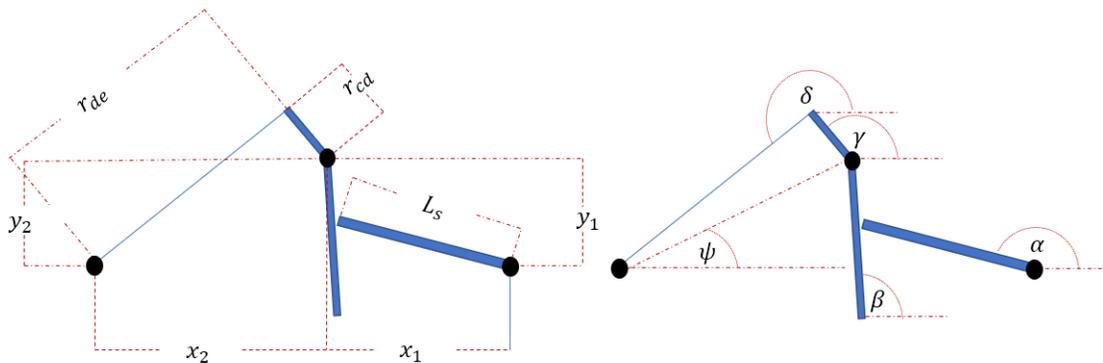


Figura 4.42: Dimensiones del controlador de tensión.
Fuente: Elaboración propia

A continuación las ecuaciones 4.17 y 4.18 muestran las ecuaciones de cierre del sistema a resolver.

$$\vec{R}_{ab} + \vec{R}_{bc} + \vec{R}_{ca} = 0 \quad (4.17)$$

$$\vec{R}_{ce} + \vec{R}_{ed} + \vec{R}_{dc} = 0 \quad (4.18)$$

Donde:

- \vec{R}_{ij} : Vector que va desde el punto i hasta el punto j.

En primer lugar se trabaja con la ecuación 4.17 la cual describe el movimiento del conjunto seguidor-tensor. Descomponiendo los vectores $R_{i,j}$:

$$L_s \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 \\ \sen\alpha_1 \end{pmatrix} + r_{bc} \begin{pmatrix} \cos\beta \\ \sen\beta \end{pmatrix} + r_{ca} \begin{pmatrix} \cos\phi \\ \sen\phi \end{pmatrix} = 0 \quad (4.19)$$

Donde r_{ij} es la distancia entre el punto i y el punto j, Al despejar r_{bc} se obtiene:

$$r_{bc} \begin{pmatrix} \cos\beta \\ \sen\beta \end{pmatrix} = - \left(L_s \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 \\ \sen\alpha_1 \end{pmatrix} + r_{ca} \begin{pmatrix} \cos\phi \\ \sen\phi \end{pmatrix} \right) \quad (4.20)$$

Donde:

$$r_{ca} = \sqrt{L_s^2 + h_t^2} \quad (4.21)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{h_t}{L_s} \right) \quad (4.22)$$

Reemplazando en 4.19:

$$r_{bc_i} = r_{bc} \cos\beta = - (L_s \cos\alpha_1 + r_{ca} \cos\phi) \quad (4.23)$$

$$r_{bc_j} = r_{bc} \sen\beta = - (L_s \sen\alpha_1 + r_{ca} \sen\phi) \quad (4.24)$$

Los valores r_{bc} y β quedan definidos por:

$$r_{bc} = \sqrt{r_{bc_i}^2 + r_{bc_j}^2} \quad (4.25)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{r_{bc_j}}{r_{bc_i}} \right) \quad (4.26)$$

En la Figura 4.41 se puede apreciar que el angulo ϕ es constante y depende de la geometría, por otra parte el angulo α varia mientras que la bobina se vacía, para evaluar el comportamiento cinemático del conjunto se evalúa la ecuación 4.26 para distintos valores de α .

Luego de obtener el valor de β , se trabaja la ecuación 4.16 la cual describe el movimiento del tensor y por ende la deformación del resorte.

Descomponiendo los vectores $R_{i,j}$:

$$L_t \begin{pmatrix} \cos\gamma \\ \sen\gamma \end{pmatrix} + r_{fd} \begin{pmatrix} \cos\delta \\ \sen\delta \end{pmatrix} + r_{de} \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sen\psi \end{pmatrix} = 0 \quad (4.27)$$

Despejando r_{fd} :

$$r_{fd} \begin{pmatrix} \cos\delta \\ \sen\delta \end{pmatrix} = - \left(L_t \begin{pmatrix} \cos\gamma \\ \sen\gamma \end{pmatrix} + r_{de} \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sen\psi \end{pmatrix} \right) \quad (4.28)$$

Donde:

$$r_{de} = \sqrt{x^2 + h_t^2} \quad (4.29)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{h_t}{x} \right) \quad (4.30)$$

Luego.

$$r_{fd_i} = r_{fd} \cos\delta = - (L_t \cos\gamma + r_{de} \cos\psi) \quad (4.31)$$

$$r_{fd_j} = r_{fd} \sen\delta = - (L_t \sen\gamma + r_{de} \sen\psi) \quad (4.32)$$

$$r_{fd} = \sqrt{r_{fd_i}^2 + r_{fd_j}^2} \quad (4.33)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{r_{fd_j}}{r_{fd_i}} \right) \quad (4.34)$$

Para resolver [4.34](#) se debe tomar en cuenta la geometría del tensor, ya que existe un angulo de desfase entre el extremo que realiza contacto con el seguidor y el extremo que está unido a ala banda de freno. Este angulo de desfase se puede fijar arbitrariamente, para efectos del diseño se utilizó un desfase de 45° .

De manera análoga a lo realizado para el calculo de β se resuelve [4.34](#) para distintos valores entre γ_{min} y γ_{max} , de esta manera se obtiene el valor de r_{fd} , el cual se relaciona con la deformación del resorte tensor.

A partir de los valores obtenidos para r_{fd} , se puede obtener la constante elástica del resorte a partir de la ecuación [4.14](#), realizando el reemplazo que se muestra a continuación en [4.35](#)

$$\Delta l_{fin} - \Delta l_{inic} = r_{fd,max} - r_{fd,min} \quad (4.35)$$

Para calcular la deformación inicial del resorte reemplaza el valor de k en la siguiente ecuación [4.36](#):

$$\Delta l_{inic} = \frac{T_c R_e}{k(1 - e^{\mu\theta})r} \quad (4.36)$$

De esta forma (ya que la deformación es función del angulo α), la deformación para cualquier α se define según la ecuación [4.37](#), finalmente la tensión del cable en cada punto se obtiene según la ecuación [4.38](#).

$$\Delta l = \Delta l_{inic} - r_{fd,min} - r_{fd} \quad (4.37)$$

$$T_c = \frac{k\Delta l(1 - e^{\mu\theta})r}{R_e} \quad (4.38)$$

Para obtener la tensión adecuada a lo largo del vaciado de la bobina se debe modificar la forma de la cara lateral del tensor, (la que está en contacto con el seguidor), formando una parábola.

Para determinar la concavidad del seguidor se debe determinar en primer lugar la deformación extra requerida por el resorte para obtener la tensión ideal, por ende para cada R_e se determina el Δl_{ideal} según la ecuación [4.39](#).

$$\Delta l_{ideal} = \frac{T_{ideal} R_e}{rk(1 - e^{\mu\theta})} \quad (4.39)$$

Una vez obtenido el Δl_{ideal} se obtiene el valor de $r_{fd,ideal}$ según la ecuación [4.40](#), donde se utilizan los valores $r_{fd,min}$, Δl_{min} y r_{cf} calculados anteriormente para el caso del seguidor plano.

$$r_{fd,ideal} = \Delta l_{ideal} - \Delta l_{inic} + r_{fd,min} \quad (4.40)$$

Mediante el uso de un solver se resuelve la ecuación [4.41](#) para obtener el valor del ángulo γ_{ideal} con el cual se obtiene la concavidad para cada punto del seguidor según la ecuación [4.42](#), donde el subíndice "p" indica el valor calculado en el mismo punto para un seguidor de cara plana.

$$r_{fd,ideal} = \sqrt{(x_2 + L_t \cos(\gamma_{ideal}))^2 + (y_2 + L_t \sin(\gamma_{ideal}))^2} \quad (4.41)$$

$$Concavidad = r_{bc,ideal} \tan(\gamma_{ideal} - \gamma_p) \quad (4.42)$$

Resolviendo la ecuación [4.42](#) para todos los valores de γ_{ideal} se determina la concavidad en el punto medio de la cara del seguidor (es el valor máximo de concavidad obtenido de [4.42](#)) y se diseña la pieza según la Figura [4.43](#).

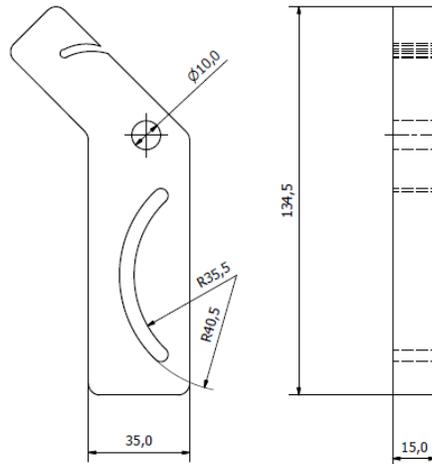


Figura 4.43: Diseño final del seguidor.
Fuente: Elaboración propia

Anexo N°3 Memoria de calculo resorte sistema controlador de tensión

El elemento encargado de realizar la fuerza necesaria para tensar el freno de la bobina es un resorte de extensión, el cual debe ser diseñado para cada caso particular. El objetivo de esta memoria de calculo es ilustrar el procedimiento de calculo de las dimensiones principales del resorte para que sea fabricado.

En primer lugar se debe definir un diámetro de alambre a utilizar para fabricar el resorte, a partir de este diámetro se puede calcular el diámetro medio del resorte, según la ecuación 4.43 donde C representa una medida de la curvatura de las espiras y se define como indice del resorte, el cual debe ser definido entre un valor de 4 y 12 según [18].

$$D_m = d_a \cdot C \quad (4.43)$$

Una vez definido C, se calcula el factor de *Bergsträsser* que representa el factor de corrección por curvatura de la forma 4.44.

$$K_b = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (4.44)$$

Se debe calcular la resistencia ultima a la tracción del alambre,según la ecuación 4.45 donde los factores A,m dependen del material y sus valores se encuentran en la Tabla 4.36.

Tabla 4.36: Factores A,m para distintos materiales
Fuente [5]

Material	Diámetro mm		m	A $\frac{Mpa}{mm^m}$
Alambre A228	2,54	165,1	0,145	2211
Alambre A229	12,7	322,58	0,187	1855
Alambre A227	17,78	322,58	0,19	1783
Alambre A232	20,32	281,94	0,168	2005
Alambre A401	40,64	241,3	0,108	1974
Alambre A313	7,62	63,5	0,146	1867
Alambre A313	63,5	127	0,263	2065
Alambre B159	127	254	0,478	2911
Alambre B159	2,54	15,24	0	1000
Alambre B159	15,24	50,8	0,028	913
AlambreB159	50,8	190,5	0,064	932

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (4.45)$$

Finalmente se calcula el esfuerzo máximo producto de la carga a la cual se somete el resorte, según la ecuación 4.46. Donde F_{max} representa la fuerza máxima que efectúa el resorte y se calcula según 4.47, donde k representa la constante elástica del resorte.

$$\tau_{max} = \frac{8 \cdot K_w \cdot F_{max} \cdot D}{\pi \cdot d_a^3} \quad (4.46)$$

$$F_{max} = \Delta l_{max} \cdot k \quad (4.47)$$

Finalmente el factor de seguridad se calcula según la ecuación 4.48, donde S_{sy} representa el esfuerzo cortante máximo permisible y se calcula como $S_{sy} = 0,45S_{ut}$.

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} \quad (4.48)$$

Una vez obtenido el factor de seguridad necesario se define el número de vueltas del resorte que se encuentran activas para soportar flexión (N_a), según la ecuación 4.49, donde G representa el módulo de elasticidad transversal.

$$N_a = \frac{G \cdot d_a^4}{8 \cdot D^3 \cdot k} \quad (4.49)$$

Debido a que los extremos del resorte ayudan a soportar la carga de flexión, el número real de vueltas que posee el cuerpo del resorte (N_b) se calcula con 4.50, donde E representa el módulo de Young del material.

$$N_b = N_a - \frac{G}{E} \quad (4.50)$$

La Figura 4.44 muestra los parámetros necesarios para la fabricación del resorte y las ecuaciones 4.53 muestran cómo calcular las dimensiones.

$$L_0 = d_a \cdot N_b \quad (4.51)$$

$$D_e = D_m + \frac{d_a}{2} \quad (4.52)$$

$$L_t = L_0 + 2 \cdot D_e \quad (4.53)$$

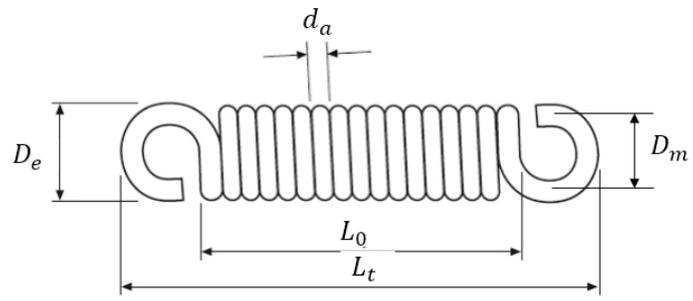
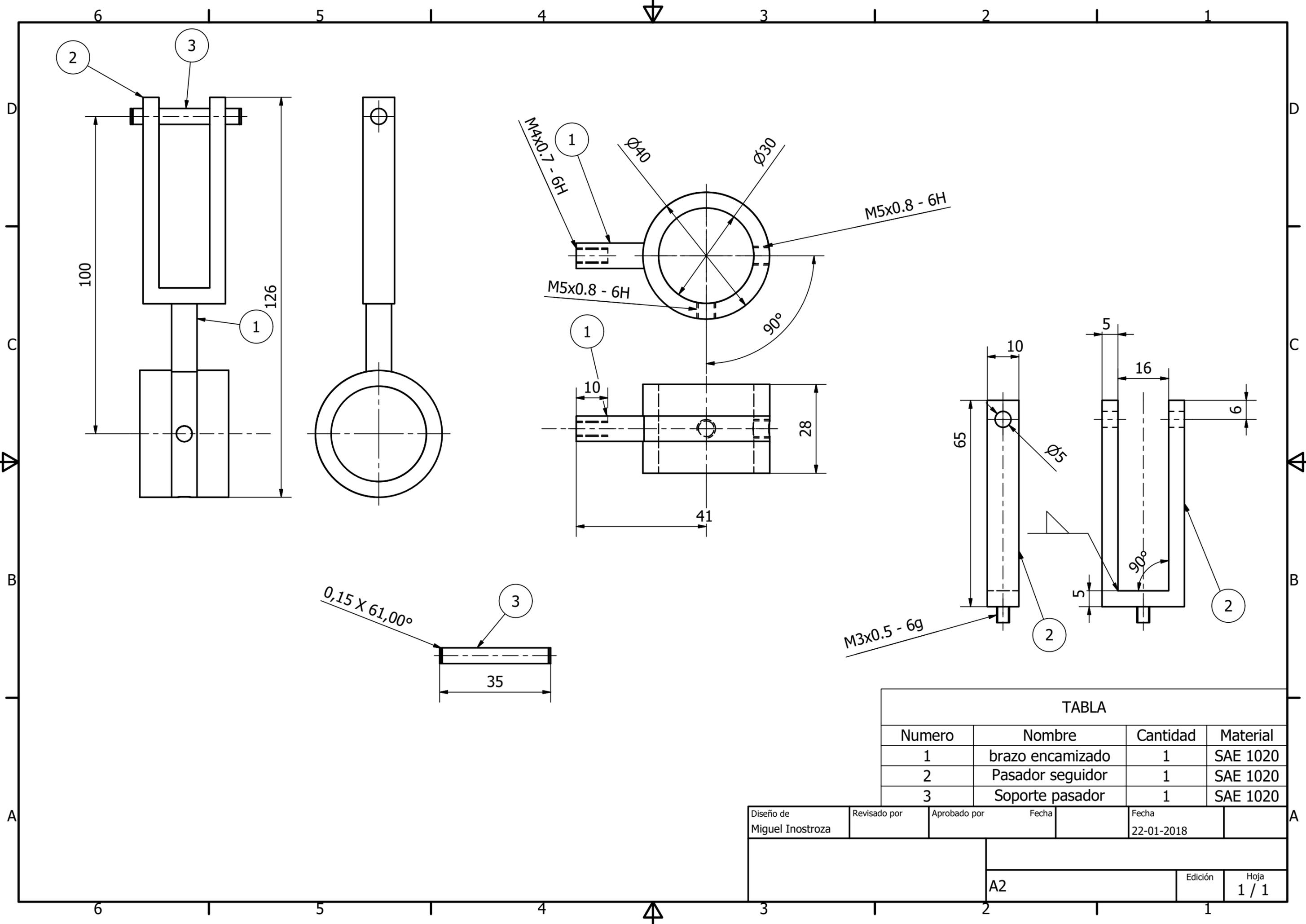


Figura 4.44: Diseño final del seguidor.
Fuente: Elaboración propia

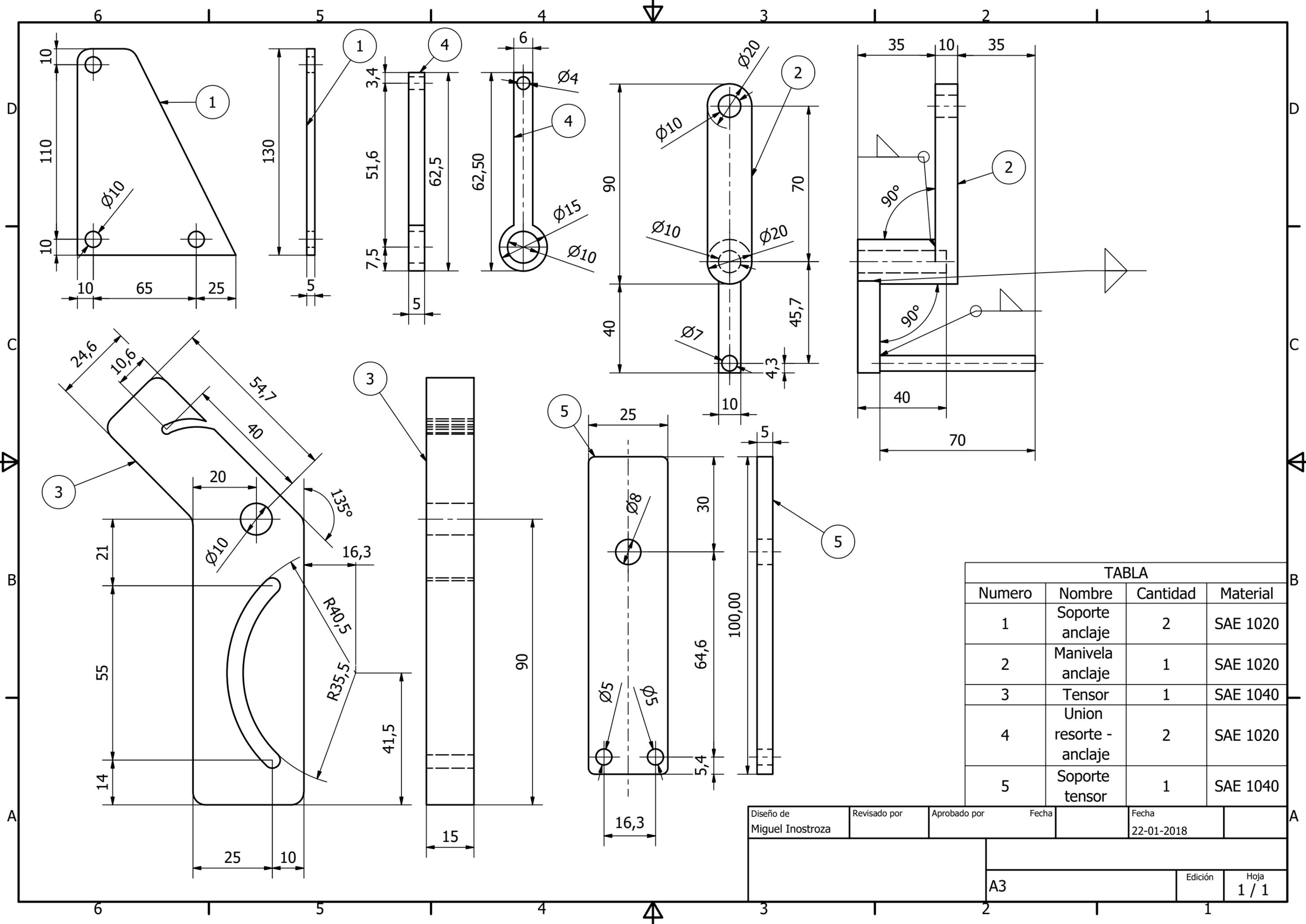
Anexo N°4 Planos sistema control de tensión de frenos para máquina cerradora T0632



TABLA

Numero	Nombre	Cantidad	Material
1	brazo encamizado	1	SAE 1020
2	Pasador seguidor	1	SAE 1020
3	Soporte pasador	1	SAE 1020

Diseño de Miguel Inostroza	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
				22-01-2018
			Edición	Hoja
			A2	1 / 1



TABLA

Numero	Nombre	Cantidad	Material
1	Soporte anclaje	2	SAE 1020
2	Manivela anclaje	1	SAE 1020
3	Tensor	1	SAE 1040
4	Union resorte - anclaje	2	SAE 1020
5	Soporte tensor	1	SAE 1040

Diseño de Miguel Inostroza	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
				22-01-2018

A3	Edición	Hoja
		1 / 1

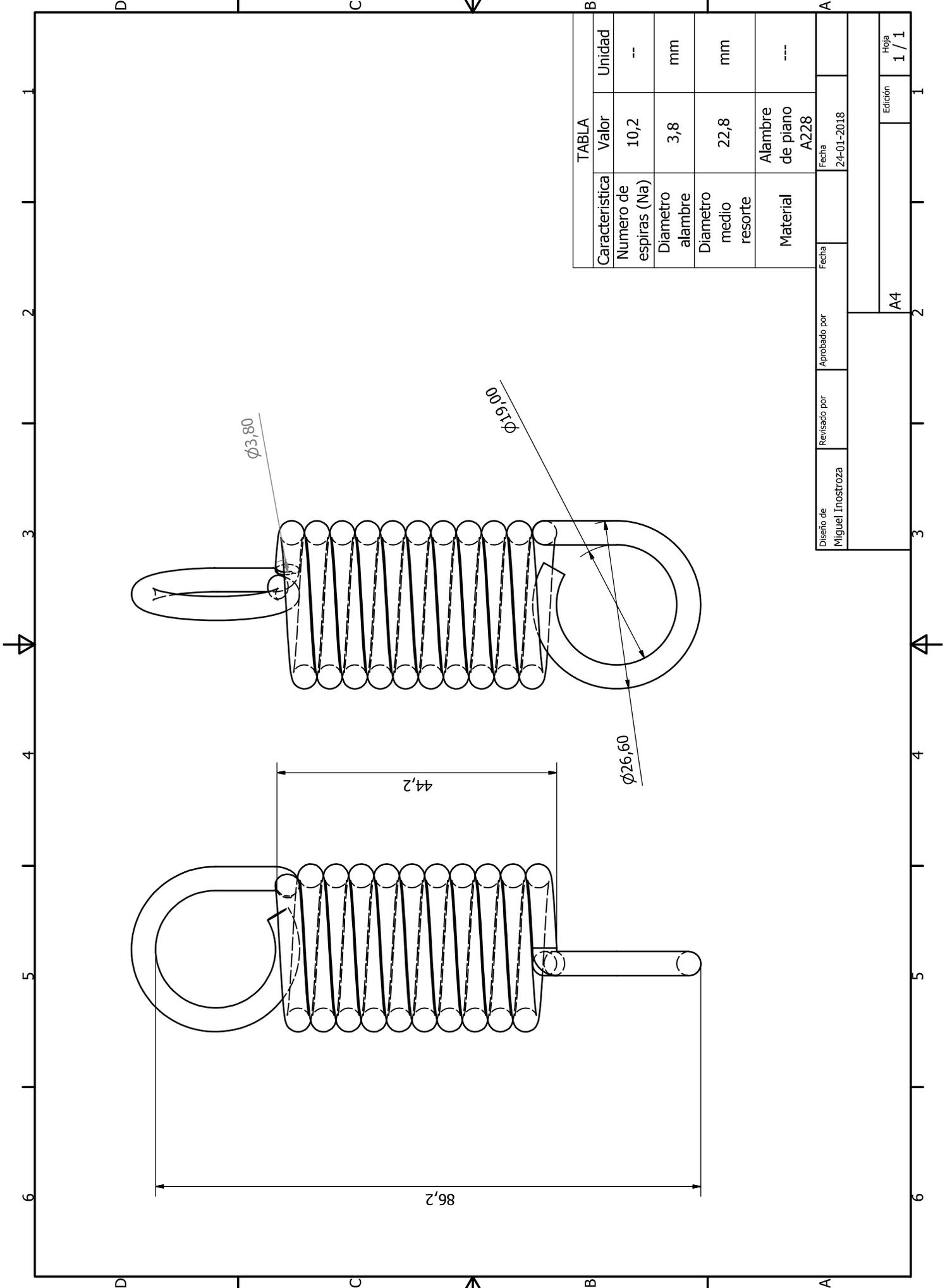


TABLA		Valor	Unidad
Característica	Numero de espiras (Na)	10,2	--
	Diametro alambre	3,8	mm
	Diametro medio resorte	22,8	mm
	Material	Alambre de piano de piano A228	---

Diseño de Miguel Inostroza	Revisado por	Aprobado por	Fecha
			24-01-2018
A4			Edición
			1 / 1