



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

PLAN DE ESTANDARIZACIÓN PARAMÉTRICA PARA LÍNEA DE PINTURA EN
CINTAC S.A.I.C.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

MAXIMILIANO ANDRÉS MARAMBIO ARMIJO

PROFESOR GUÍA:
MATÍAS TOBAR GIGOUX

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO MORALES MACHER
SEBASTIÁN GUTIÉRREZ PANETTI

SANTIAGO DE CHILE
2024

Resumen

La presente memoria fue desarrollada en Instapanel, una empresa filial del Grupo CINTAC, la cual se dedica al rubro del acero a través de la fabricación y comercialización de sistemas constructivos. Instapanel cuenta con 4 principales plantas de producción: planchaje, donde se fabrican tejas y paneles arquitectónicos; frío, donde se producen paneles aislantes; POL, donde se fabrican bloques de poliestireno que se utilizan como aislantes para abastecer la planta frío; y pintura, donde se pintan las bobinas (rollos gigantes de acero) que abastecen tanto a la planta de frío como a la de planchaje.

El proyecto consiste en la elaboración de un plan de regulación y estandarización de la línea de pintura de la empresa. La línea presenta un problema central definido como "Irregularidades y desviaciones del proceso general en la línea de pintura", el cual tiene dos aristas: en primer lugar, los requerimientos previos para iniciar una jornada de pintado y, en segundo lugar, las desviaciones operacionales dentro de la línea. En consecuencia, se define como objetivo general del proyecto "Entregar propuestas de mejora para la línea de pintura de acero, que propicien la excelencia operacional y la fabricación de productos de calidad".

Para abordar la problemática, se siguió una metodología basada en 3 grandes tópicos: levantamiento general de la línea y regularización de requerimientos, estandarización de parámetros y, finalmente, planificación continua. Para la primera etapa de la metodología, se aplicaron los lineamientos entregados en el libro "El modelo Toyota para la mejora continua", el cual, como su nombre indica, proporciona herramientas para mejorar la eficiencia y la calidad de los procesos. Para la segunda etapa de la metodología, se utilizaron los lineamientos del libro "Introduction to Statistical Quality Control", que menciona elementos relevantes para la realización de controles estadísticos de procesos. En cuanto a la planificación continua, este proceso consiste en una serie de reuniones establecidas, por un lado, con los distintos departamentos y gerencias de la empresa y, por otro lado, con los operadores de la línea.

Al término de este trabajo, se espera obtener para la línea de pintura un proceso ordenado, que permita visualizar las principales necesidades y solventar las más urgentes. De forma complementaria, a nivel operacional, se espera tener un mejor conocimiento y entendimiento sobre cómo interactúan los distintos parámetros presentes en la línea para producir un determinado producto. Finalmente, se espera generar una propuesta de valores optimizada que permita mejorar la calidad de los productos y el trabajo operacional en la línea.

Dedicado a mi mamá. Te amo, esto es gracias a ti.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia: a mi hermano, por todos los momentos que hemos compartido juntos; a mi papá; y especialmente a mi mamá, quien me ha entregado todo su tiempo y amor para formarme en la persona que soy hoy. Gracias por estar siempre para mí y por brindarme tu apoyo incondicional. Gracias por cortar tus alas para que yo pudiera volar.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis mejores amigos, quienes siempre han estado a mi lado para acompañarme, apoyarme, sacarme una sonrisa cuando más lo he necesitado y por motivarme a mostrar siempre la mejor versión de mí mismo. Mi época universitaria estuvo llena de momentos difíciles, y siempre encontré en ustedes la fuerza necesaria para seguir adelante. Le agradezco a la vida por tenerlos a mi lado; ustedes saben quiénes son.

Finalmente, quiero agradecer a mi Grupo de Guías y Scouts Quilhuenco PSJ. Gracias por acogerme y hacerme parte de su historia en aquel ya lejano 2011. El movimiento es una parte fundamental de mi vida y lo llevo conmigo siempre. Seamos agentes de cambio y dejemos el mundo mejor de lo que lo encontramos.

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción y antecedentes generales | 1 |
| 2. Definición del Proyecto | 4 |
| 2.1. Problema u Oportunidad | 4 |
| 2.2. Justificación del Proyecto | 7 |
| 2.3. Objetivos | 8 |
| 2.3.1. Objetivo general | 8 |
| 2.3.2. Objetivos específicos | 8 |
| 2.4. Alcances | 9 |
| 2.5. Metodología | 10 |
| 2.5.1. Levantamiento general en la línea y regularización de requerimientos . | 10 |
| 2.5.2. Estandarización de parámetros | 10 |
| 2.5.3. Planificación continua | 11 |
| 3. Marco Conceptual | 12 |
| 3.1. Mejora continua | 12 |
| 3.2. Control Estadístico de Procesos (SPC) | 13 |
| 3.3. Definiciones | 14 |
| 4. Implementación del Proyecto | 15 |
| 4.1. Cuantificación económica del problema | 15 |
| 4.2. Resultados levantamiento general de línea | 16 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.1. | Sector Entrada | 17 |
| 4.2.2. | Sector Tratamiento de Superficie | 17 |
| 4.2.3. | Sector Pintado | 17 |
| 4.2.4. | Sector Salida | 18 |
| 4.2.5. | Gestiones transversales a la línea | 18 |
| 4.3. | Resultados análisis de datos | 21 |
| 4.3.1. | Análisis en RStudio | 21 |
| 4.3.2. | Análisis en Excel | 29 |
| 4.4. | Discusiones | 32 |
| 4.4.1. | Discusiones sobre objetivos | 32 |
| 4.4.2. | Discusiones sobre alcances | 33 |
| 4.4.3. | Discusiones sobre metodología | 34 |
| 4.4.4. | Discusiones sobre resultados | 34 |
| 4.4.5. | Extensiones del proyecto | 36 |
| 5. | Conclusiones | 37 |
| | Bibliografía | 39 |
| | Anexos | 40 |
| .1. | Anexo A: Resumen giros 2022 y 2023 de Grupo Cintac | 40 |
| .2. | Anexo B: Línea de pintura | 41 |
| .3. | Anexo C: Modelo lineal 4 | 44 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Resumen Presupuesto | 9 |
| 4.1. Costos línea de pintura 2023 | 16 |
| 4.2. Estimadores muy significativos modelo 1 | 25 |
| 4.3. Estimadores significativos modelo 3 | 28 |
| 4.4. Parámetros actuales | 29 |
| 4.5. Estandarización Parámetros 1 | 30 |
| 4.6. Estandarización Parámetros 2 | 31 |

Índice de Ilustraciones

| | |
|--|----|
| 1.1. Variación Anual Porcentual de la Inversión en Construcción. Fuente: Informe MACH 65 | 2 |
| 2.1. PPlanificación Pre-pintado | 4 |
| 2.2. Inicio de Jornada y Sector Entrada | 5 |
| 2.3. Tratamiento de Superficie y Pintado | 5 |
| 2.4. Sector Salida y Laboratorio | 6 |
| 4.1. Flujo de requerimientos por sector | 16 |
| 4.2. Cumplimiento Plan de Acción Pintura | 19 |
| 4.3. Cumplimiento Plan de Acción Pintura por Departamento | 20 |
| 4.4. Gráfico de correlaciones entre variables | 22 |
| 4.5. Gráfico dispersión Zona 1 Horno 2 vs PMT | 22 |
| 4.6. Gráfico dispersión Zona 2 Horno 2 vs PMT | 23 |
| 4.7. Gráfico dispersión Velocidad de línea vs PMT | 23 |
| 4.8. Gráfico dispersión Espesor acero vs PMT | 23 |
| 4.9. Modelo lineal 1 | 25 |
| 4.10. Comparación predicción modelo 1 | 25 |
| 4.11. Modelo lineal 2 | 26 |
| 4.12. Comparación predicción modelo 2 | 26 |
| 4.13. Modelo lineal 3 | 28 |
| 4.14. Comparación predicción modelo 3 | 28 |

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Valor económico generado y distribuido en Grupo Cintac en Millones de US\$. Fuente: Memoria Integrada 2023 | 40 |
| 2. | Bobinas de acero | 41 |
| 3. | Sector entrada | 41 |
| 4. | Sector tratamiento de superficie | 42 |
| 5. | Sector pintado coater 2 | 42 |
| 6. | Sector pintado horno y enfriador 2 | 43 |
| 7. | Sector salida | 43 |
| 8. | Modelo lineal 4 | 44 |
| 9. | Comparación predicción modelo 4 | 44 |

Capítulo 1

Introducción y antecedentes generales

La empresa CINTAC S.A.I.C. atiende a los mercados agrícola, de construcción, industrial, de energía y vial, a través de soluciones innovadoras (Cintac, s.f.). Por su parte, CINTAC se define como “líder en la fabricación y comercialización de sistemas constructivos, con la más amplia oferta de productos de acero, atendiendo las necesidades del mercado de la construcción e industria” (Empresa Cintac, s.f.). En la Memoria Integrada del Grupo Cintac (2023), grupo propietario de CINTAC S.A.I.C., la empresa menciona tener dos grandes líneas de negocio. La primera línea corresponde al negocio industrial, en el que Cintac crea valor ofreciendo productos fabricados en base a acero, como tubos, planchas, cubiertas, elementos viales, revestimientos, paneles aislados, elementos estructurales, entre otros. Por otro lado, la segunda línea corresponde al negocio modular, ofreciendo soluciones constructivas volumétricas con un alto nivel de terminación, abasteciendo a la construcción y a las grandes empresas. En dicha memoria, además, se menciona que el Grupo Cintac ha presentado en los años 2022 y 2023 giros negativos de US \$48,1 MM y US \$36,9 MM, respectivamente (cuadro resumen en Anexo 1). Lo anterior puede explicarse por el contexto actual del mercado, pues según el MACH 65 Informe Macroeconomía y Construcción (2024), el balance estimado de la construcción para el año 2023 indica una caída del 4%, atribuyendo el complejo panorama a factores como el exceso de burocracia, la desconfianza jurídica y una baja inversión privada. Esto se traduce en una proyección de la inversión para el año 2024 de -0,4%. En la figura 1.1 se observa la evolución de la inversión en construcción durante los últimos años.

En particular, el trabajo fue realizado en una de las empresas filiales del Grupo Cintac, llamada Instapanel. Esta empresa cuenta con 4 plantas de producción: planta frío, la cual produce 3 tipos de paneles con aislación; planta planchaje, que produce cubiertas habitacionales, placas colaborantes, además de paneles sin aislación y arquitectónicos; planta POL, que produce bloques de poliestireno para abastecer la planta frío; y planta de pintura, que pinta acero para abastecer a las plantas frío y planchaje. A nivel organizacional, Instapanel cuenta con 4 grandes departamentos que fijan los lineamientos de producción de la empresa, correspondientes a Ingeniería, Operaciones, Calidad y, finalmente, Excelencia Operacional, siendo este último el departamento donde se trabajó.



Figura 1.1: Variación Anual Porcentual de la Inversión en Construcción. Fuente: Informe MACH 65

El departamento de Excelencia Operacional corresponde a un equipo conformado por un ingeniero y una ingeniera, más dos practicantes, cuyo objetivo está enfocado en el seguimiento, optimización y mejora continua de los distintos procesos presentes dentro de la empresa. Liker y Franz (2020) plantean que la excelencia operacional busca de forma constante la eficiencia y la calidad en los procesos mediante la mejora continua, la eliminación de desperdicios y el respeto por las personas, con el objetivo de crear valor para el cliente y la empresa. Para cumplir con este objetivo, se trabajó de forma presencial siguiendo los pilares de trabajo establecidos por la empresa, siendo los 3 ejes principales la seguridad, calidad y eficiencia. En línea con lo anterior, se trabajó bajo un rol definido como un consultor externo a la empresa que, viendo desde fuera el funcionamiento de esta, realiza sugerencias de mejoras en las operaciones y participa en la creación de planes de acción y su posterior ejecución.

La oportunidad de mejora se encuentra en la planta de pintura de Instapanel, en adelante definida como la línea de pintura, la cual cuenta con 4 grandes sectores fundamentales para el proceso de pintado de acero: entrada, tratamiento de superficie, pintado y salida. El sector de entrada consta de dos desenrolladores para posicionar las bobinas (rollos gigantes de acero) que, en conjunto con un acumulador, permiten darle continuidad al funcionamiento de la línea; es decir, en condiciones óptimas de funcionamiento, la línea no debería presentar detenciones. El sector de tratamiento de superficie corresponde a una secuencia de 8 baños basados en la aplicación de detergente y químicos, los cuales limpian el acero y permiten la correcta fijación de la pintura en la cubierta de la chapa. El sector de pintado consta de dos procesos equivalentes y consecutivos, compuestos de un “coater” en donde se aplica la pintura; un horno, en donde se seca y endurece la pintura; y un enfriador denominado “quench”, donde se enfría el acero. Finalmente, en el sector de salida se lleva el control de producción de acero pintado, y donde se cortan y extraen las bobinas terminadas.

El proceso de pintado de acero se realiza transversalmente en distintas partes del mundo y, a lo largo del tiempo, ha presentado muchos cambios. Según un estudio de Weiss (1997), se prevé que las futuras innovaciones en la tecnología de recubrimiento en polvo reduzcan la temperatura de curado requerida, mejoren la apariencia y la durabilidad, y disminuyan el espesor del recubrimiento. Además, en la línea de Instapanel se ha identificado un problema

fundamental basado en una serie de irregularidades en el proceso de pintado de acero, tanto a nivel de requerimientos previos al pintado, como de requerimientos operacionales. Por un lado, los problemas de requerimientos previos vienen dados por una despreocupación de las necesidades de la línea y una falta de visibilización de estos. Por otro lado, los problemas operacionales se relacionan con los parámetros aplicados para obtener un determinado PMT del acero. Se define PMT como “the highest temperature that the metal substrate reaches during the curing process” (Wärnheim, 2023, p. 6).

En este sentido, en la línea de pintura de acero de la empresa Cintac, se debe trabajar para regularizar el proceso y solventar las necesidades actuales. En el estudio de Spinks et al. (2004), se comenta respecto al proceso experimental que “The extent of crosslinking of the topcoats was also varied by controlling the oven baking process. Optimal cure is achieved by heating the painted panels rapidly to a peak metal temperature (PMT) of 230°C followed by water quenching”(p. 96). Lo anterior plantea dos similitudes con la línea de Cintac, el rápido proceso de calentamiento y el posterior enfriado del acero. Si bien en el estudio de Spinks esto dio resultado, se requiere de una validación de dicho proceso de forma local, pues las características de cada línea pueden variar y, en consecuencia, cambiar los resultados obtenidos. De esta forma, estas mejoras se vuelven esenciales para garantizar la calidad y durabilidad del recubrimiento de acero en la empresa Cintac.

En los capítulos siguientes se comenta, en primer lugar, la organización general del proyecto, detallando con mayor profundidad la oportunidad de mejora, la justificación del proyecto, los objetivos, los alcances y la metodología a seguir. En segundo lugar, se define el marco conceptual que establece la línea de trabajo para la construcción de las propuestas de soluciones para la empresa. En tercer lugar, se presentan los resultados obtenidos y sus respectivas discusiones. Finalmente, se exponen las principales conclusiones del proyecto, estableciendo un nexo con los objetivos y las extensiones que debe tener el proyecto para su implementación dentro de la empresa.

Capítulo 2

Definición del Proyecto

2.1. Problema u Oportunidad

Como se mencionó en la sección anterior, el proyecto se desarrolló en la línea de pintura, la cual aplica pintura al acero que abastece tanto a la planta frío como a la planta planchaje. El acero pintado en la línea llega a la empresa en forma de un rollo gigante, llamado bobina (referencia en Anexo 2). La línea consta de 4 sectores: entrada, tratamiento de superficie, pintado y salida (referencia en Anexos 3 a 7). Sin embargo, para efectos del flujo de pintado, este se divide en 4 grandes etapas: planificación pre-pintado, inicio de jornada y sector de entrada, tratamiento de superficie y pintado, y finalmente el proceso del sector de salida y laboratorio. A continuación, se explica brevemente en qué consiste cada etapa¹

1. **Planificación Pre-pintado:** En esta etapa intervienen 3 entidades: el Programador, Sherwin Williams (proveedor de pintura que mantiene una alianza estratégica con Cin-tac) y el Departamento de Calidad. Las tareas y el flujo de estas pueden observarse en la figura 2.1. La colaboración de estas 3 entidades permite planificar una jornada de pintado y suministrar los insumos requeridos.

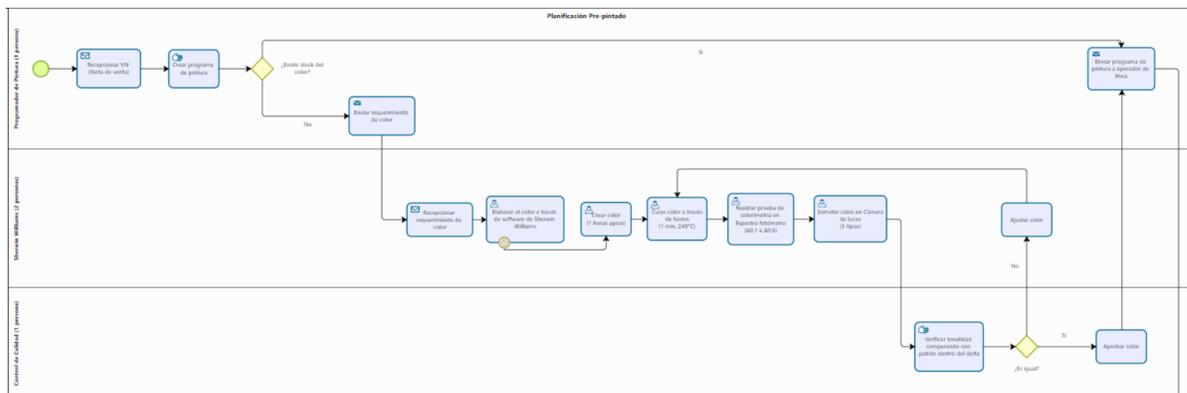


Figura 2.1: PPlanificación Pre-pintado

¹En caso de requerir el diagrama original realizado en Bizagi, este se debe solicitar a la empresa.

2. **Inicio de jornada y Sector Entrada:** En esta etapa intervienen únicamente los Operadores y Asistentes, quienes se encargan de operar la línea y sus maquinarias. Las tareas que realizan y su flujo respectivo se observan en la figura 2.2. Esta etapa se centra en las tareas rutinarias que se deben llevar a cabo para dar comienzo a una jornada de pintado, además del proceso de ingreso de una bobina a la línea.

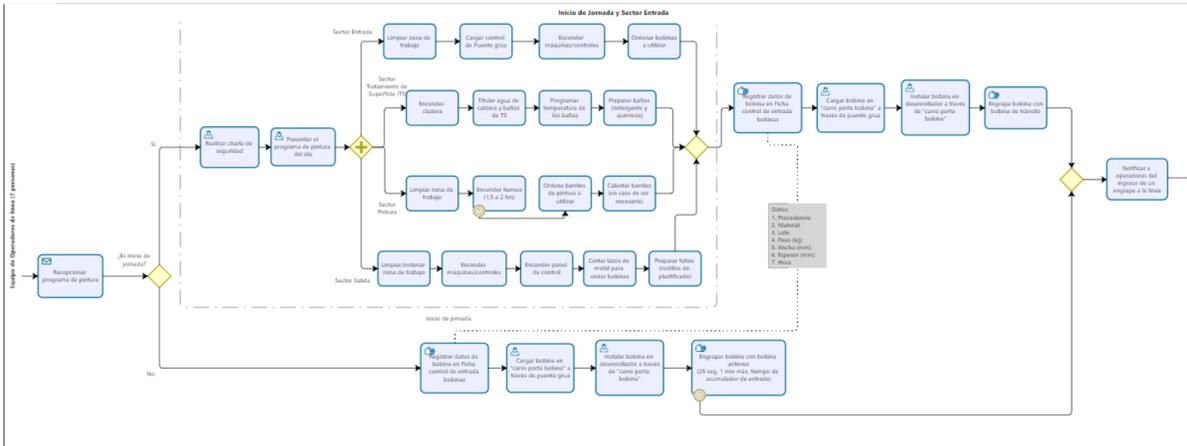


Figura 2.2: Inicio de Jornada y Sector Entrada

3. **Tratamiento de Superficie y Pintado:** En esta etapa, en primer lugar, se realiza un proceso denominado "tratamiento de superficie", el cual corresponde a un lavado del acero con la finalidad de alcanzar condiciones óptimas para la aplicación de pintura. Si no se realiza este procedimiento, la pintura no se adhiere a la chapa de acero. Esto se lleva a cabo mediante dos procesos: el primero es el "desengrase" con agua y detergente (baños 1 al 5) y, posteriormente, el "cromatizado", en donde el acero se somete a un tratamiento con productos químicos (baños 6 al 8). Una vez finalizado el tratamiento de superficie, se procede a pintar la bobina. Las tareas y su flujo se observan en la figura 2.3.

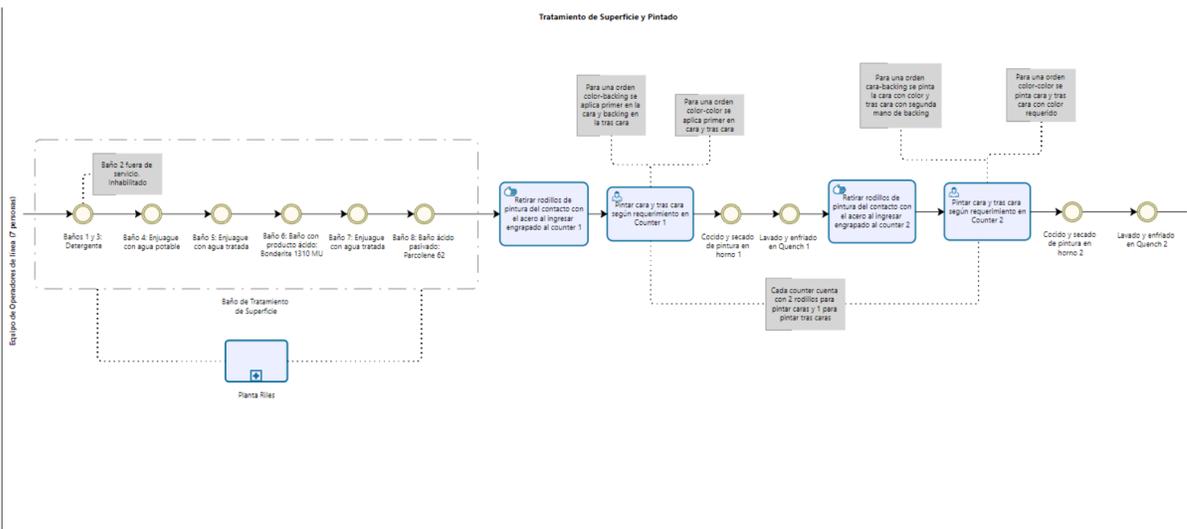


Figura 2.3: Tratamiento de Superficie y Pintado

4. **Sector Salida y Laboratorio:** En esta etapa intervienen únicamente los operadores, divididos en dos sectores: salida y laboratorio. Este último es el lugar donde se realizan pruebas de calidad a las bobinas pintadas. Las tareas y su flujo se observan en la figura 2.4.

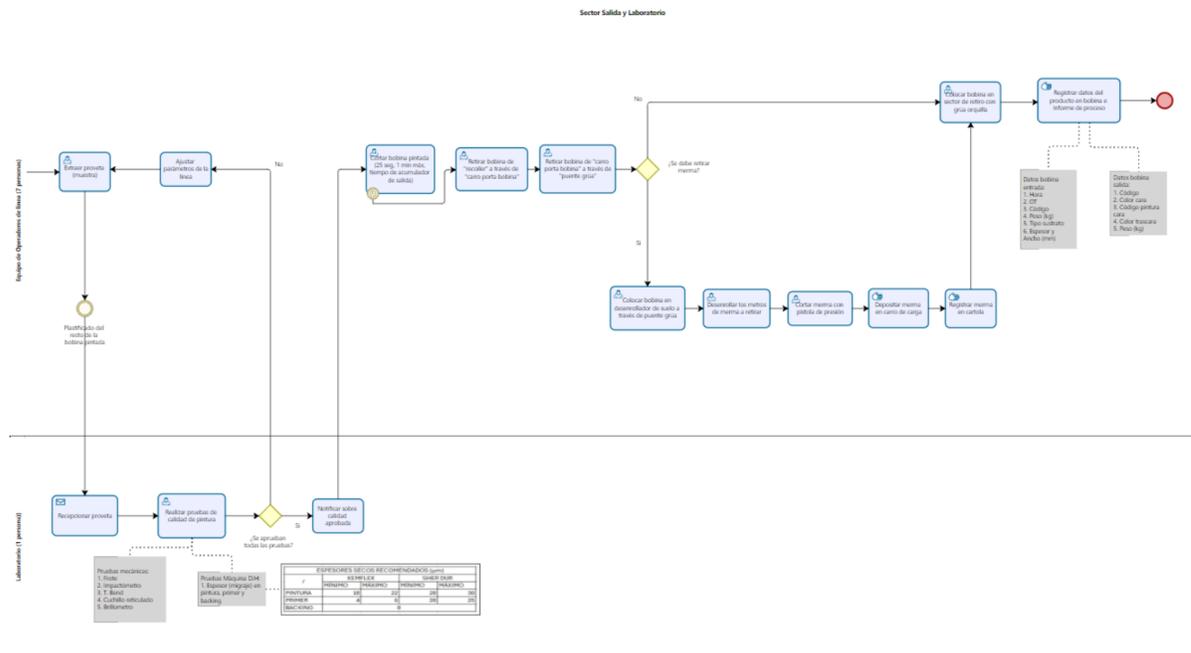


Figura 2.4: Sector Salida y Laboratorio

Cabe mencionar que una vez iniciada una jornada de pintado la línea no se detiene, salvo excepciones como errores operacionales, fallas mecánicas o eléctricas. Debido a lo anterior, para mantener esta continuidad en la operación, en el sector entrada existen 2 desenrolladores para que, al momento de que se consuma una bobina, se pueda "engrapar" el final de esta con el comienzo de la siguiente.

Este proceso consta de una serie de etapas bien definidas y con funciones específicas a realizar, en donde los operadores cuentan con la suficiente experiencia y coordinación para llevarlo a cabo, sin embargo, la línea presenta una gran cantidad de irregularidades, tanto a nivel operacional como de suministros y requerimientos previos para tenerla en óptimas condiciones. El resultado de todas estas irregularidades se traduce en reiteradas fallas de calidad en los productos finales pintados. De esta forma, es claro que existe un profundo problema, definido como **Irregularidades y desviaciones del proceso general en línea de pintura**. Este problema, además, tiene dos aristas, irregularidades en cuanto a las necesidades y requerimientos en cada una de las etapas del proceso y, complementariamente, irregularidades operacionales dentro del proceso.

Al analizar los requerimientos de funcionamiento de la línea, se observó que existen muchas deficiencias en el proceso, incluyendo la falta de instrumentos necesarios para mejorar el control y la utilización del resto de los insumos. Además, se identificó una serie de fallas mecánicas y eléctricas en muchos de los equipos utilizados en la línea, los cuales, al no recibir un seguimiento ni mantenimiento adecuados, se han deteriorado considerablemente con el

tiempo. Asimismo, en cuanto a las irregularidades operacionales, se ha detectado que en cada una de las etapas mencionadas anteriormente existen parámetros que afectan directa e indirectamente la calidad del pintado de las bobinas, como la temperatura de los hornos y la velocidad a la cual el acero transita dentro de la línea. El problema radica en que no existe claridad sobre cómo se definieron los valores o rangos de configuración de dichos parámetros, lo que lleva a que sean los operadores de la línea quienes los ajusten para cumplir con las pruebas de calidad de los productos. En otras palabras, los parámetros bajo los cuales se pintan las bobinas dependen de la experiencia de los operadores.

Esta falta de claridad, tanto en los requerimientos como a nivel operacional, llena de incertidumbre el proceso de pintado, reduciendo la capacidad de control y seguimiento frente a cualquier inconformidad en los productos finales. Dado que no se tiene certeza sobre las necesidades de los distintos puntos de trabajo de la línea ni sobre el valor que deben tener los parámetros y su impacto en la operación, es imposible identificar con precisión el factor que falló. Por lo tanto, si se mantiene la situación actual, en la que las condiciones de la línea no son óptimas y los parámetros no cuentan con un valor o rango que asegure la calidad de los productos, se continuará dependiendo de la experiencia y habilidad de los operadores para regular el proceso, lo que además limita la posibilidad de monitorear y controlar las condiciones bajo las cuales se pinta el acero.

2.2. Justificación del Proyecto

De la sección anterior se desprende una gran problemática basada en la inconformidad con la calidad del acero pintado, debido a las irregularidades y desviaciones en el proceso. Esta situación ha generado preocupación en torno a la consistencia y fiabilidad del producto final. Por lo tanto, el proyecto consiste en la elaboración de un plan de mejora multidisciplinario para la línea de pintura, con el objetivo de abordar y solucionar esta problemática de manera integral.

El proyecto se basa en la creación de un plan dinámico, es decir, un plan revisable y modificable en el tiempo, que se ajuste a las necesidades detectadas en la línea de pintura. De manera general, el proyecto consta de dos grandes etapas.

1. La **primera etapa** se enfoca en regularizar las desviaciones relacionadas con los requerimientos de la línea, con el fin de filtrar los problemas y atribuirlos exclusivamente a aspectos operacionales.
2. La **segunda etapa** se centra en estandarizar aquellos parámetros críticos que influyen directamente en la calidad del pintado.

Este enfoque permitirá eliminar la dependencia de la experiencia de los operadores. Asegurará que, siempre que se mantenga la línea en condiciones operacionales óptimas y con todos los insumos y maquinarias en buen estado, se obtendrá un producto de alta calidad. Para lograrlo, se llevará a cabo un levantamiento de información en la línea para cada etapa del proceso, seguido de la identificación de los parámetros críticos que requieren estandarización, registrando el avance en un plan de acción.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

En base al problema presentado, se define el siguiente objetivo general:

Entregar propuestas de mejora para la línea de pintura de acero, que propicien la excelencia operacional y la fabricación de productos de calidad.

2.3.2. Objetivos específicos

Del objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Regularizar el contexto actual de funcionamiento de la línea de pintura, para cumplir con todos los requerimientos previos necesarios para dar comienzo a una jornada de pintado y solventar las desviaciones presentes actualmente.
2. Hallar una relación entre los parámetros de la línea con las características de las materias primas, que generan un determinado resultado en los productos pintados.
3. Entregar una propuesta de estandarización de una serie de parámetros presentes en la línea, que otorgue un marco de trabajo a los operadores para garantizar la calidad de los productos.
4. Cuantificar económicamente el impacto que tiene la no estandarización de parámetros de la línea.

2.4. Alcances

La naturaleza del proyecto implica la realización de una serie de gestiones e inversiones, sin embargo, para la realización de una evaluación económica, se considerará únicamente a aquellos gastos asociados al equipo de Excelencia Operacional. De esta forma, se considera la compra de un durómetro, instrumento que permite cuantificar el estado de los rodillos que se utilizan al interior de la línea. Dos termómetros infrarojos, que permiten monitorear la temperatura de las pinturas. Finalmente, la compra de packs de thermolabel, instrumentos utilizados para medir la temperatura que alcanza el acero en la línea. La tabla 2.1 muestra un resumen de lo anterior.

Tabla 2.1: Resumen Presupuesto

| Producto | Cantidad | Costo aproximado |
|----------------------|-----------------|-------------------------|
| Durómetro | 1 | \$300.000 |
| Termómetro infrarojo | 2 | \$14.900 |
| Packs Thermolabels | 5 | \$40.000 |
| | TOTAL | \$529.980 |

Cabe destacar que la compra de los termómetros y durómetro fueron autorizadas por el jefe de planta, como parte de las acciones del plan para la línea de pintura. Sin desmedro de lo anterior, gran parte del desarrollo del proyecto puede llevarse a cabo a través de gestiones internas dentro de la empresa, además, la empresa cuenta con existencias de thermolabel, por lo cual no se requeriría invertir el monto respectivo para llevar a cabo el proyecto. Finalmente, se declaran como alcances del proyecto los siguientes:

1. No se creará un plan de mantención que propicie el buen estado de la línea en el tiempo.
2. No se estandarizarán aquellos parámetros que no son críticos para el funcionamiento de la línea y que no afecten de forma directa la calidad de las bobinas pintadas.
3. No se implementarán en la línea los parámetros estandarizados (solo se entregará la propuesta).
4. No se verificará ni cuantificará la eficacia de la propuesta de parámetros estandarizados.

2.5. Metodología

El proceso de implementación del proyecto consta de 3 procesos principales, los cuales se explican y detallan a continuación.

2.5.1. Levantamiento general en la línea y regularización de requerimientos

Este proceso consta de la realización de un levantamiento de información completo de cada una de las etapas del proceso de pintado. El objetivo es identificar aquellos aspectos críticos que repercuten en la calidad de los productos considerando dos criterios, anomalías operacionales y anomalías en maquinarias. Para cumplir con este propósito, se realizarán las siguientes acciones.

1. Realizar levantamiento del Sector Entrada.
2. Hacer levantamiento del sector de Tratamiento de Superficie.
3. Realizar levantamiento de Sector de Pintado.
4. Realizar levantamiento del sector salida.
5. Elevar a gerencia y departamento de Mantenimiento las máquinas que presentan problemas mecánicos o eléctricos.

2.5.2. Estandarización de parámetros

Esta etapa consta del estudio de datos operacionales de la línea. El objetivo es comprender cómo interactúan los parámetros operacionales, para generar propuestas de mejora sobre estos. Para cumplir con este propósito, se realizarán las siguientes acciones.

1. Construir una base de datos con el registro histórico de la línea.
2. Realizar análisis de datos con la base creada en el punto anterior, utilizando los programas RStudio y Excel.
3. Determinar los parámetros más influyentes en el proceso de pintado.
4. Determinar una interacción de los parámetros de la línea junto con las características de las materias primas.
5. Elaborar una propuesta de nuevos parámetros de la línea para asegurar elaboración de productos de calidad.

2.5.3. Planificación continua

Este proceso es transversal a la duración del proyecto, pues consta de la creación de un plan de acción para mejorar el trabajo al interior de la línea. El objetivo de esta etapa es definir acciones que consideren fecha de cumplimiento y un responsable asociado, realizarles seguimiento y, en función de los avances, definir acciones nuevas. Para cumplir con este propósito, se realizarán las siguientes acciones.

1. Realizar reuniones semanales de revisión y actualización de plan de acción con los departamentos que intervienen en el proceso de pintado, es específico:
 - Jefe de planta
 - Jefe de mantención
 - Excelencia Operacional
 - Departamento de Calidad
 - Sherwin Williams (SW).
2. Realizar reuniones semanales con operadores para generar capacitaciones y levantamiento de información.

Capítulo 3

Marco Conceptual

El marco conceptual de una memoria proporciona una base teórica sólida para abordar el problema de investigación. En este caso, el marco se centrará en los principios y herramientas de la ingeniería industrial que pueden aplicarse para mejorar la eficiencia y calidad del proceso de pintado. La ingeniería industrial se basa en la optimización de sistemas complejos, mejorando la eficiencia y la calidad en procesos de manufactura. Las herramientas y técnicas de esta disciplina son fundamentales para abordar los objetivos planteados en esta tesis. A continuación, se describen las principales herramientas y su relevancia en el contexto del proyecto.

3.1. Mejora continua

El "Modelo Toyota Para la Mejora Continua" de Jeffrey Liker y James Franz es una guía exhaustiva sobre la metodología de mejora continua aplicada por Toyota. El modelo, también conocido como "Toyota Production System" (TPS), es un marco que busca la eficiencia y la calidad mediante la eliminación de desperdicios y la optimización de procesos. Los autores describen los 14 principios del TPS, divididos en cuatro categorías: Filosofía a largo plazo, El proceso correcto produce los resultados correctos, Agregar valor a la organización desarrollando a su gente y sus socios, y Solucionar problemas continuamente para impulsar el aprendizaje organizacional.

Liker y Franz enfatizan la importancia de una cultura organizacional que fomente la mejora continua y la resolución de problemas. Esta cultura se basa en el respeto por las personas y la búsqueda de la perfección. El libro explica cómo Toyota implementa herramientas y técnicas como el "Just-In-Time" (JIT), "Jidoka" (automatización con un toque humano) y el "Kaizen" (mejora continua), que permiten a la empresa mantenerse competitiva y eficiente. Además, el texto aborda la importancia de la estandarización en los procesos como base para la mejora continua. La estandarización permite identificar variaciones y errores, proporcionando una plataforma para implementar mejoras sistemáticas. Los autores también discuten la importancia del liderazgo en el TPS, donde los líderes actúan como mentores y facilitadores del cambio.

De esta manera, el modelo Toyota se enfoca en crear valor a través de la mejora continua y el desarrollo de las personas. La implementación de los principios del TPS puede conducir a una mayor eficiencia, calidad y satisfacción del cliente en cualquier organización. Estos conceptos están presentes en el trabajo de la empresa, especialmente dentro del equipo de Excelencia Operacional, cuyo objetivo está directamente relacionado con ellos. Los principios de mejora continua se aplican para reducir las detenciones en la línea, aumentando así su disponibilidad; para incrementar la producción, ya sea mediante la mejora de máquinas o la capacitación del personal; y para mejorar la calidad de los productos y reducir la merma generada.

3.2. Control Estadístico de Procesos (SPC)

”Introduction to Statistical Quality Control” de Douglas C. Montgomery es un texto fundamental en el campo de la ingeniería industrial y la gestión de calidad. El libro ofrece una cobertura exhaustiva de las técnicas estadísticas para el control y la mejora de la calidad en los procesos industriales. Montgomery comienza con una introducción a los conceptos básicos de calidad y el control estadístico de procesos (SPC), explicando cómo estas herramientas pueden utilizarse para monitorizar y mejorar los procesos de manufactura.

Uno de los aspectos centrales del libro es el uso de gráficos de control para monitorear la variabilidad del proceso. Montgomery proporciona una explicación detallada sobre la construcción e interpretación de gráficos de control para variables y atributos, así como técnicas avanzadas como los gráficos CUSUM y EWMA. Además, el libro aborda el diseño de experimentos (DOE) y su aplicación en la mejora de procesos, proporcionando una metodología sistemática para investigar y optimizar factores que afectan la calidad del producto.

La octava edición del libro también introduce temas modernos como el control de calidad multivariado y la gestión de la calidad en la era de la manufactura avanzada y la industria 4.0. Montgomery destaca la importancia del enfoque basado en datos para la toma de decisiones y la mejora continua. También se discuten técnicas para el muestreo de aceptación, análisis de sistemas de medición, y la implementación de programas de calidad total (TQM) y Six Sigma. Con su enfoque claro y práctico, el libro proporciona a los estudiantes y profesionales una guía integral para aplicar técnicas estadísticas en la mejora de la calidad y la eficiencia en la industria.

En particular, estos conceptos están presentes en el trabajo de la empresa, ya que el departamento de Excelencia Operacional recopila la información de todas las máquinas, incluyendo la línea de pintura. Los datos recopilados permiten identificar los principales factores que causan detenciones en la línea, además de visualizar su producción. Sin embargo, para los fines de este trabajo, la aplicación del control estadístico es diferente y no se implementa actualmente en la línea, ya que aborda la problemática de manera más detallada. Esto se logra a través del análisis de los parámetros de la línea, la comprensión de sus interacciones y la gestión de estos para mejorar la calidad de los productos y optimizar el proceso.

3.3. Definiciones

A continuación, se presentan 3 conceptos relevantes para el entendimiento de los resultados obtenidos.

1. **PMT:** El PMT hace corresponde al "Peak Metal Temperature". Según Wörnheim (2023), el PMT se define como "the highest temperature that the metal substrate reaches during the curing process" (p. 6). Es decir, el PMT corresponde a la temperatura que debe alcanzar el metal para curar la pintura.
2. **Curado de pintura:** Según la RAE (2024), se define curado como "Endurecido, seco, fortalecido o curtido". Esto, para efectos de pintura, se entiende como el proceso en que, a través de la aplicación de calor, se genera una reacción química que, al finalizar, le entrega todas las propiedades de dureza y calidad propias del material.
3. **Thermolabel:** Un thermolabel es una etiqueta sensible al calor que cambia de color cuando se alcanza una temperatura específica. Estas etiquetas se utilizan para monitorear y validar procesos térmicos, asegurando que se mantengan dentro de los parámetros establecidos.

Capítulo 4

Implementación del Proyecto

4.1. Cuantificación económica del problema

Como se explica en el capítulo 2, la línea de pintura enfrenta problemas debido a las irregularidades en el proceso. Esto provoca una pérdida económica significativa para la empresa, ya que los productos que no cumplen con los estándares de calidad generan inconformidades por parte de los clientes. Los costos asociados a estas inconformidades no solo se traducen en reprocesos dentro de la línea de pintura, sino también en reprocesos dentro de las demás plantas de la empresa, dependiendo del tipo de producto con fallas.

Previo a la cuantificación económica, es necesario tener en cuenta algunos aspectos relevantes para entender cómo se realizó el cálculo. En primer lugar, la línea de pintura tiene una serie de costos individuales, como recurso humano, materia prima, energía, entre otros. Todos estos costos son indispensables para el funcionamiento de la línea y, por lo tanto, en caso de presentarse un reproceso para aquellos productos reclamados como inconformes, se deben incurrir en todos estos gastos nuevamente. En segundo lugar, la empresa produce una amplia gama de productos con diferentes largos, formas y espesores, que pueden tener costos asociados distintos. Por esta razón, para este ejercicio se generalizarán los productos, cuantificando el costo aproximado por kilo de producto. Se opta por cuantificar en kilos en lugar de metros lineales, ya que un kilo de acero puede variar en longitud, lo que permite mantener un valor estándar en la cantidad de material utilizado. En cambio, un metro lineal de acero puede tener distintos espesores y, por lo tanto, un mayor coste de producción.

Considerando lo anterior, en la tabla 4.1 se presentan los kilos producidos por mes y los costos asociados sin depreciación durante el año 2023. De la tabla, se concluye que el costo promedio para la elaboración de un kilo de producto es de \$178,54. Para efectos de reprocesos por inconformidades, este valor solo considera los costos asociados a la línea de pintura, sin embargo, como se mencionó, los costos asociados son mayores, pues se debe incurrir en costos de fabricación del producto final asociado a las demás plantas de la empresa. De forma referencial, considerando el periodo de enero hasta junio de 2024, se generaron inconformidades por un total de 1.719 metros lineales, correspondiente al 0,289% de la producción del año. Lo anterior, en costos de 2023, se traduce en \$3.415.081 de pérdida.

Tabla 4.1: Costos línea de pintura 2023

| Mes | Kilos producidos | Costos sin depreciación |
|--------------|------------------|-------------------------|
| Enero | 393.395 | \$71.979.661 |
| Febrero | 217.949 | \$64.790.467 |
| Marzo | 357.603 | \$93.861.695 |
| Abril | 660.830 | \$95.590.833 |
| Mayo | 468.044 | \$93.070.870 |
| Junio | 579.946 | \$94.597.086 |
| Julio | 601.564 | \$108.883.816 |
| Agosto | 845.578 | \$85.124.598 |
| Septiembre | 853.813 | \$124.924.456 |
| Octubre | 868.922 | \$112.481.801 |
| Noviembre | 588.318 | \$165.165.440 |
| Diciembre | 190.904 | \$102.675.049 |
| TOTAL | 6.626.865 | \$1.183.145.772 |

4.2. Resultados levantamiento general de línea

La primera arista del problema fueron las irregularidades en los requerimientos previos a una jornada de pintado. Como respuesta a esto, se realizó la primera gestión: la creación de un flujo de requerimientos por sector, donde se visualizan tanto los insumos como las máquinas necesarias. Este flujo se puede observar en la figura 4.1. A partir de este flujo creado, se inició un levantamiento por sector dentro de la línea, con dos enfoques principales. Primero, se buscó detectar aquellas anomalías que afectan directamente la calidad de los productos. Segundo, se identificaron anomalías en maquinarias o equipos mecánicos.

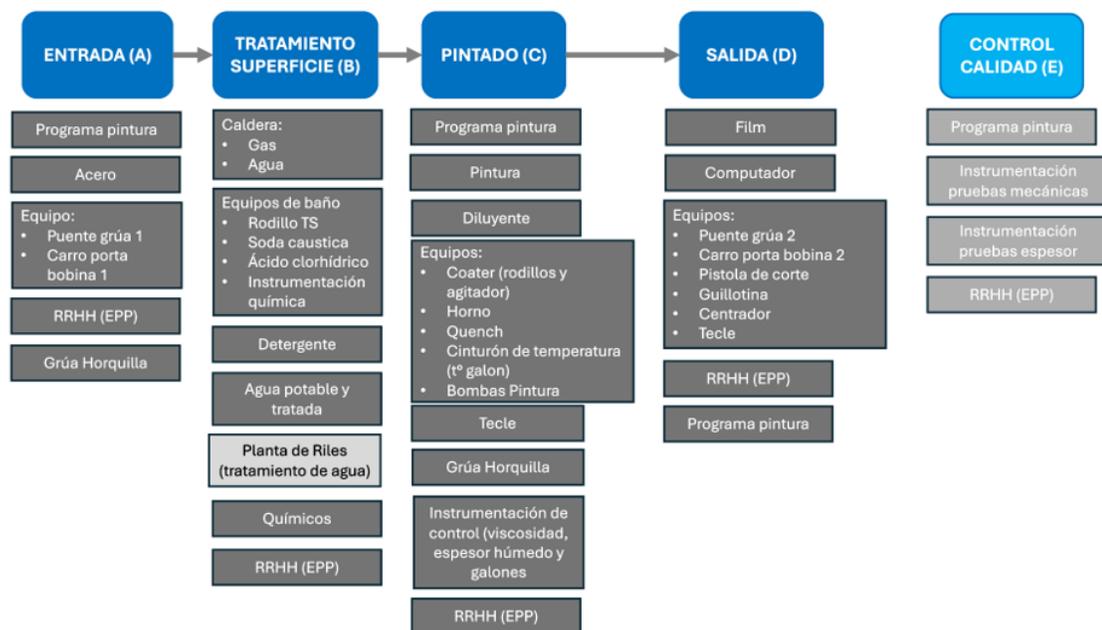


Figura 4.1: Flujo de requerimientos por sector

A continuación, se detallan algunas de las anomalías más crísticas detectadas en cada sector. Se define como crísticas aquellas anomalías que afectan directamente a los productos terminados. Junto con lo anterior, se detallan aquellas acciones correctivas que surgieron a raíz de las anomalías mencionadas.

4.2.1. Sector Entrada

Anomalías más crísticas

- Intercomunicador inhabilitado.
- Desviaciones en materias primas (acero).

Acciones/gestiones correctivas

- Compra de intercomunicador.
- Análisis de factibilidad para implementar un sistema que permita revisar las condiciones del acero antes de ingresarlo a la línea.

4.2.2. Sector Tratamiento de Superficie

Anomalías más crísticas

- Falta de stock de 2 reactivos químicos y bajo stock de los demás. No hay personal en la línea con conocimientos para crearlos.
- Los rodillos estrujadores no tienen stock y se cristalizan.

Acciones/gestiones correctivas

- Creación de código SAP, establecimiento de stock mínimo y compra de químicos.
- Plan de capacitación multidisciplinaria en la línea.
- Realización del curso “Residuos peligrosos”.
- Rectificación de rodillos estrujadores.

4.2.3. Sector Pintado

Anomalías más crísticas

- Desviaciones recurrentes en materias primas (pintura) que ingresan a la línea.
- Parámetros operacionales no validados.
- Fallas eléctricas/mecánicas recurrentes en el horno.

Acciones/gestiones correctivas

- Control de calidad de SW antes de ingresar pinturas a la línea. Capacitación del personal para realizar pruebas mecánicas.
- Análisis de datos de parámetros operacionales.
- Validación del funcionamiento de las termocuplas del horno y establecimiento de un “calendario” de mantenencias.

4.2.4. Sector Salida

Anomalías más críticas

- Ajuste automático del centrador¹ deshabilitado.
- Imputación de metros pintados realizada de forma manual/visual.

Acciones/gestiones correctivas

- Cotización con empresa externa para la rectificación del centrador.
- Instalación de cuentametros en la entrada y salida.

4.2.5. Gestiones transversales a la línea

- **Limpieza de datos 2024:** La línea cuenta con un documento que registra toda la actividad del día, en el cual se imputan las horas de producción y las detenciones con su respectiva causa. En una revisión de los datos, el equipo de EO se percató de que muchas de estas detenciones estaban catalogadas como “factor externo”, lo que imposibilitaba detectar con certeza las causas de las detenciones y, por tanto, realizar gestiones correctivas. En consecuencia, se revisaron todas las detenciones de 2024 y se recodificaron correctamente, aludiendo a las verdaderas causas de las detenciones. Esto es relevante, ya que el equipo revisa semanalmente las detenciones de la línea para poder abordar las más importantes.
- **Capacitación a operadores en codificación de detenciones:** El documento mencionado en el punto anterior es completado por un único operador, sin embargo, se consideró relevante que todos los operadores fueran conscientes del sistema de trabajo que existe en la línea. Por tanto, es importante que conozcan la codificación de detenciones de esta. Para lograr esto, se realizó un taller de capacitación en el que se presentaron diversas detenciones y los operadores tuvieron que determinar la codificación correspondiente.

¹Máquina que mantiene el acero en el eje de la línea.

- **Reordenamiento de la plantilla de registro diario de la línea:** Uno de los problemas identificados es que el documento de registro de actividad diaria de la línea era visualmente engorroso, ya que se registraban en una misma plantilla tanto la producción de todas las bobinas como las detenciones del día. Esto dificultaba la extracción de información del documento. Para solucionar esto, se decidió dividir el documento en dos, definiendo uno exclusivamente para la producción y otro para las detenciones.
- **Check List de estado de insumos y maquinaria:** Como se mencionó en la descripción del problema, se detectó que muchos de los insumos y maquinarias utilizadas en la línea no se encuentran en óptimas condiciones para su uso, principalmente por la falta de mantenciones preventivas periódicas. Para visibilizar esta situación, se diseñó e implementó un Check List diario que debe ser completado en cada sector de trabajo por el operador encargado. En este se registrará el estado de cada equipo junto con una breve observación. Este Check List será retirado por el departamento de Mantenimiento todos los días en la mañana.
- **Creación de diversos flujos en la línea:** Con el fin de regularizar las acciones a seguir dentro de la línea en caso de presentarse alguna situación anormal, se crearon 3 flujos específicos. El primero corresponde al proceso de pintado de bobinas, el segundo a qué hacer en caso de quiebres de stock de pintura, y el tercero a cómo proceder en caso de desviaciones de calidad en productos terminados.

La realización de este levantamiento requirió una planificación constante, la cual fue flexible y adaptada a las necesidades planteadas por la empresa. Como se mencionó en la metodología, se llevaron a cabo reuniones de planificación semanalmente. En estas reuniones, se creó un plan de acción que fue actualizado de manera continua en función de los resultados obtenidos.



Figura 4.2: Cumplimiento Plan de Acción Pintura

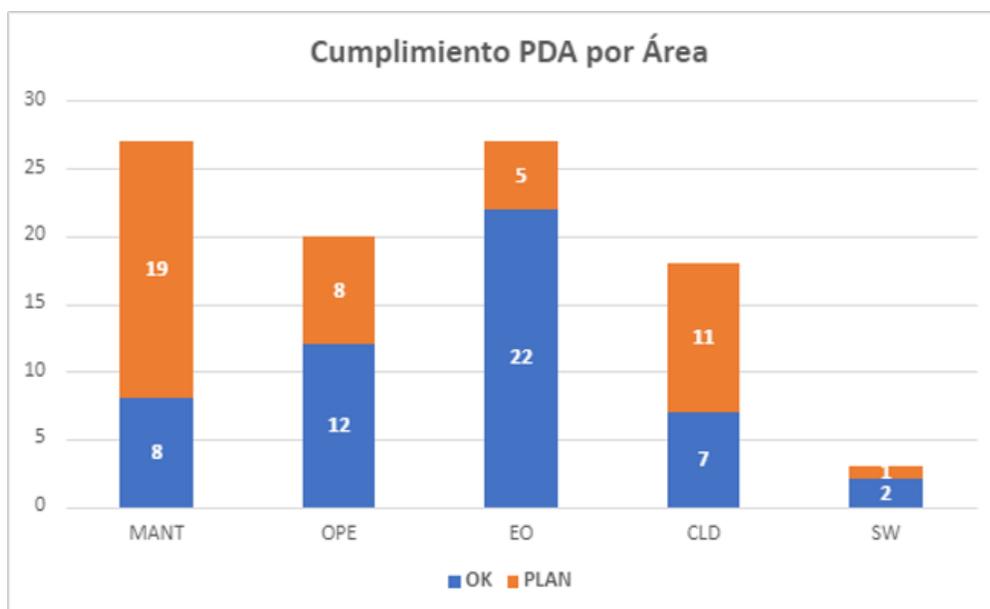


Figura 4.3: Cumplimiento Plan de Acción Pintura por Departamento

Las acciones del plan incluían diagnóstico, área a cargo, responsable y fecha de cumplimiento. Al finalizar la implementación del proyecto, este plan alcanzó un 54 % de realización, como se muestra en la figura 4.2, cuya nomenclatura es: OK: acción concretada, PLAN: acción por concretar. Además, en la figura 4.3 se puede observar el nivel de cumplimiento del plan por área, visualizando la cantidad de acciones concretadas y las pendientes. La nomenclatura del gráfico es: MANT: mantención, OPE: operaciones, EO: excelencia operacional, CLD: calidad, y SW: Sherwin Williams.

Si bien el cumplimiento del plan no es tan elevado, las acciones ya concretadas son, en gran medida, las más cruciales para garantizar el buen funcionamiento de la línea. Se observa que el área de mantención tiene un 29 % de cumplimiento en sus tareas; sin embargo, esto se debe a que muchas de ellas corresponden a análisis a largo plazo o dependen de empresas externas para la mantención de maquinarias específicas. Algo similar ocurre con el área de operaciones, la cual estuvo a cargo de la compra de insumos para la línea, dependiendo del tiempo de compra y la posterior llegada de estos a la empresa para concretar dichas acciones.

4.3. Resultados análisis de datos

El objetivo de esta etapa del proyecto es analizar los parámetros relevantes para explicar la obtención de un determinado PMT, la interacción entre ellos y, finalmente, encontrar una configuración óptima para el pintado de bobinas. Esto se lleva a cabo mediante la construcción de una base de datos con los registros de la línea durante el periodo transcurrido entre el 12 de marzo y el 10 de junio. Este análisis se realizó exclusivamente para la segunda etapa del proceso de pintado, es decir, en las áreas de coater, horno y enfriador 2.

El análisis se centra en esta etapa porque los datos registrados en la primera parte del proceso de pintado son irrecuperables, ya que corresponden a un promedio diario en lugar de mediciones específicas separadas. Además, en esta etapa no se registran datos tan relevantes, como la velocidad de la línea. En cambio, en el segundo proceso existe el "Autocontrol Horno 2", donde se registra gran parte de los datos necesarios.

Es importante mencionar que cada horno cuenta con dos zonas, 1 y 2, que se programan a diferentes temperaturas. Del "Autocontrol Horno 2" se extrajeron la temperatura de las zonas 1 y 2 de este horno, la velocidad de la línea y el PMT alcanzado por el acero, el cual se mide con thermolabels. Este autocontrol también registra la hora de la muestra, lo que permitió indexar los datos con la hoja de registro diario de pintado para obtener información sobre el material de la pintura, el espesor y el ancho del acero.

4.3.1. Análisis en RStudio

El primer análisis de datos se realiza utilizando el programa RStudio, una herramienta de programación que permite realizar análisis estadísticos. Este análisis inicial aborda el estudio de qué variables son estadísticamente significativas para explicar la obtención de un determinado PMT. Se considera estadísticamente significativa una variable que presenta un p-valor bajo, es decir, que la relación observada no se debe al azar. En estadística, se define como significativo un p-valor menor a 0,05; cuanto más bajo sea este valor, mayor será el grado de significancia de la variable. Como primer paso, se lleva a cabo un análisis exploratorio de datos, que corresponde a una etapa previa a la imputación de datos. A través de la creación de distintos tipos de gráficos, se busca determinar si existe alguna relación entre las variables, lo que permite obtener conclusiones preliminares que serán validadas o refutadas posteriormente.

En la figura 4.4 se presenta un gráfico con las 15 correlaciones más relevantes. Estas correlaciones se observan entre pares de variables cuyos efectos podrían superponerse. Ignorar esto al generar un modelo e incluir variables altamente correlacionadas puede provocar colinealidad, lo que podría resultar en la estimación de coeficientes inestables y en una significancia estadística engañosa. En el gráfico se observa que las temperaturas de ambas zonas del horno están altamente correlacionadas de manera positiva, es decir, si una de estas variables aumenta, la otra también tiende a aumentar. También se nota que la velocidad está correlacionada negativamente con el espesor, lo que implica que si una de estas variables aumenta, la otra tiende a disminuir. Asimismo, se observa una correlación positiva entre la velocidad y la temperatura de ambas zonas del horno 2.

Ranked Cross-Correlations

15 most relevant

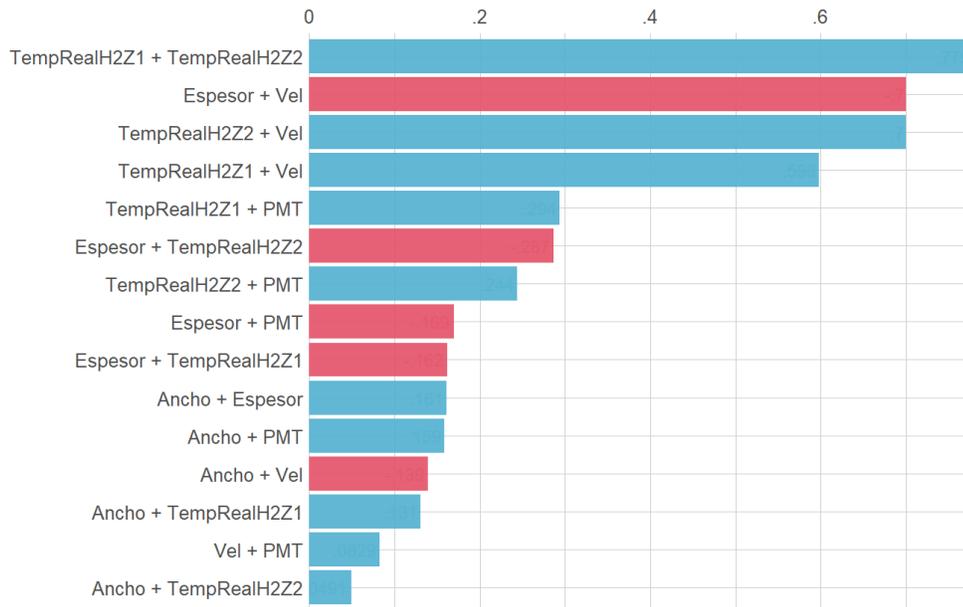


Figura 4.4: Gráfico de correlaciones entre variables

En las figuras 4.5 a 4.8 se presentan gráficos de dispersión que muestran las temperaturas de ambas zonas del horno 2, la velocidad de la línea y el espesor del acero, en contraste con el comportamiento del PMT, la variable de interés que se busca explicar. En estos gráficos no se observa una tendencia clara, ya que para diversos valores de cada parámetro se obtienen diferentes valores de PMT. Esto podría deberse a la interacción entre todos los parámetros para la obtención de un determinado PMT. Por ejemplo, un aumento en la velocidad podría no generar ningún cambio en el valor del PMT si también se produce un aumento en la temperatura de las zonas del horno.

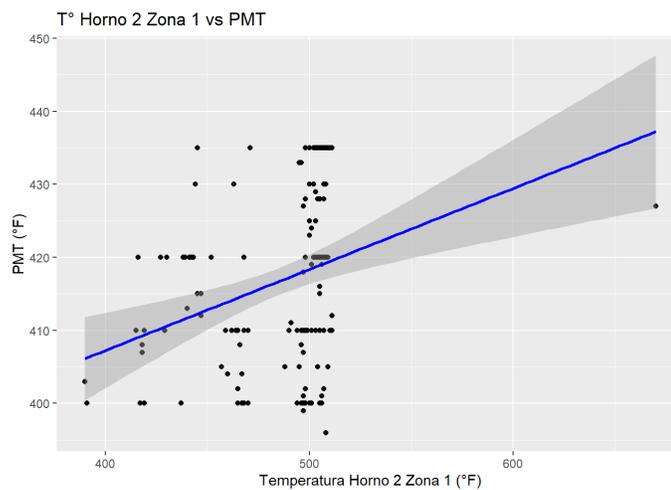


Figura 4.5: Gráfico dispersión Zona 1 Horno 2 vs PMT

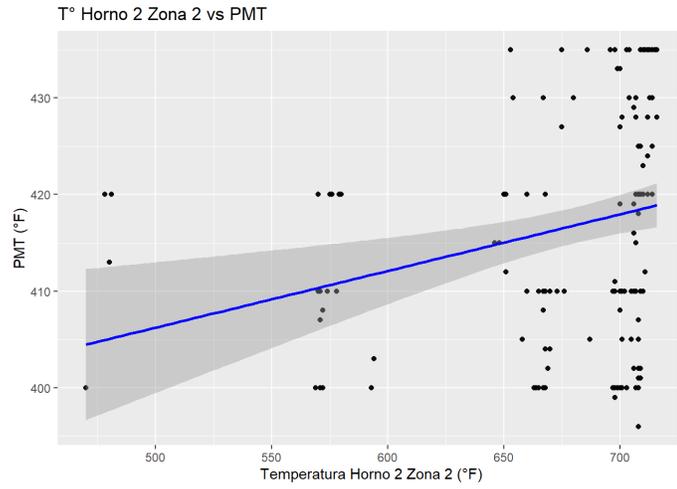


Figura 4.6: Gráfico dispersión Zona 2 Horno 2 vs PMT

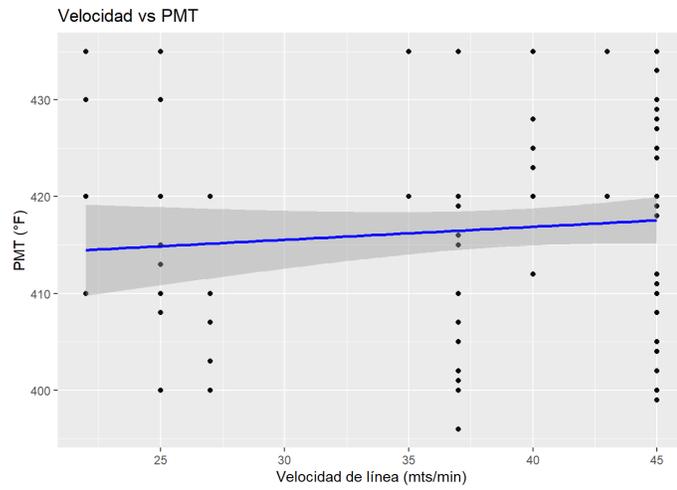


Figura 4.7: Gráfico dispersión Velocidad de línea vs PMT

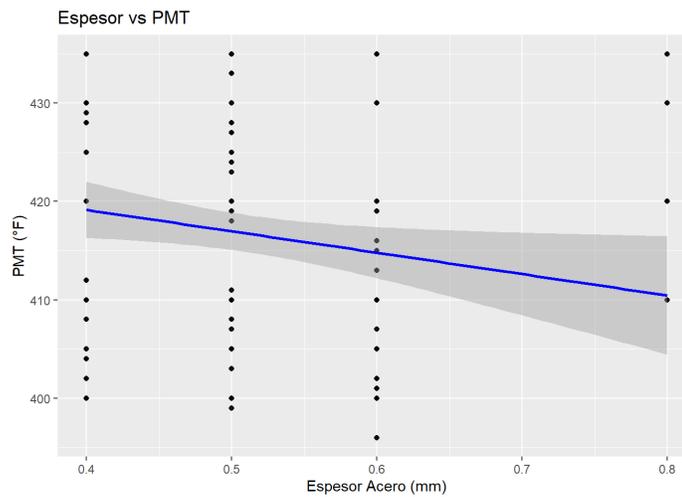


Figura 4.8: Gráfico dispersión Espesor acero vs PMT

Considerando la exploración de datos realizada, se procede a la construcción de un primer modelo de regresión lineal. Los modelos de regresión lineal se construyen a partir de variables independientes y una variable dependiente. Las variables independientes son aquellas cuyo valor no depende de otras, mientras que la variable dependiente es el resultado del valor que toman las variables independientes. En este sentido, los modelos de regresión lineal permiten explicar la variabilidad de la variable dependiente en función de la configuración de una serie de variables independientes.

Para el **primer modelo**, se decidió incorporar como variables independientes, de forma lineal, la temperatura de ambas zonas del horno, la velocidad de la línea, el espesor y el ancho del acero. Aunque existe un alto grado de correlación entre las temperaturas de las zonas del horno, se optó por incluirlas, ya que ambos parámetros son relevantes para la obtención de un determinado PMT. Del mismo modo, se decidió incorporar todas las variables de forma lineal para estudiar el comportamiento de cada una de forma independiente. A continuación, se muestra el modelo 1, en el que ambas zonas del horno se incorporan positivamente, ya que un aumento en su valor genera un aumento en el valor del PMT. Por el contrario, la velocidad de la línea, el espesor y el ancho del acero se incorporaron negativamente, dado que un aumento en su valor genera una disminución en el PMT. En particular, una mayor velocidad se traduce en un menor tiempo de exposición al calor de los hornos; por su parte, un acero más espeso o ancho requiere más calor que uno menos espeso para alcanzar un mismo PMT.

$$\begin{aligned}
 PMT = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 2} + \hat{\beta}_2 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \\
 & - \hat{\beta}_3 \times \text{Velocidad de línea} - \hat{\beta}_4 \times \text{Espesor de acero} - \hat{\beta}_5 \times \text{Ancho de acero} + \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Como se mencionó anteriormente, los modelos de regresión lineal permiten explicar la variabilidad de una variable dependiente, en este caso, del PMT. Sin embargo, no tiene sentido limitarse únicamente a esto; es fundamental también evaluar la capacidad predictiva del modelo. Dado lo anterior, se dividió la base de datos en una relación 80-20. El 80 % de la base se utilizó para "entrenar el modelo", lo que, en términos simples, significa que se empleó el 80 % de los datos para enseñar al modelo cómo se comportan las variables y, a partir de esta información, generar predicciones sobre el comportamiento de la variable dependiente en el 20 % restante de la base de datos. A este 20 % se le denomina "datos de testeo" del modelo.

De esta forma, en la figura 4.9 se pueden observar los indicadores del modelo 1 entrenado con el 80 % de los datos. En el modelo se observa lo siguiente:

- Un **R²** (R-squared) de 0,2746, lo cual significa que el 27,46 % de la variabilidad del PMT es explicada por las variables del modelo. Este es un estimador que fluctúa entre 0 y 1, en el cual los valores cercanos a 1 indican un mejor ajuste del modelo. En este caso, el valor es bastante más cercano a 0, dejando aproximadamente un 75 % de la variabilidad del PMT sin explicar.
- Un **R² ajustado** (Adjusted R-squared) de 0,2456, es decir, el 24,56 % de la variabilidad del PMT es explicada por las variables del modelo, pero considerando una penalización

por la cantidad de variables agregadas. A diferencia del anterior, este estimador fluctúa entre -1 y 1, aunque es poco usual que tome valores negativos.

- Un **error residual** (Residual standard error) de 10,5. Esto significa que, en promedio, los valores estimados del PMT distan en 10,51°F de los reales. Los valores en los que se puede encontrar el error estándar corresponden a números reales positivos, es decir, siempre toma valores mayores o iguales a 0.
- Se obtuvieron como variables muy significativas el intercepto, la velocidad y el espesor; como variable significativa, la zona 1 del horno 2; y como variable levemente significativa, la zona 2 del horno 2.

```
##
## Call:
## lm(formula = PMT ~ TempRealH2Z1 + TempRealH2Z2 + Vel + Ancho +
##     Espesor, data = train_data)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -23.0728  -7.5668  -0.6629   7.1583  23.1776
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  360.61039   24.06151   14.987 < 2e-16 ***
## TempRealH2Z1  0.14797    0.04653    3.180 0.00186 **
## TempRealH2Z2  0.07609    0.03202    2.377 0.01899 *
## Vel          -1.25606    0.25289   -4.967 2.18e-06 ***
## Ancho         0.01372    0.01712    0.801 0.42440
## Espesor      -68.04604   14.54261   -4.679 7.37e-06 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 10.5 on 125 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.2746, Adjusted R-squared:  0.2456
## F-statistic: 9.465 on 5 and 125 DF,  p-value: 1.13e-07
```

Figura 4.9: Modelo lineal 1

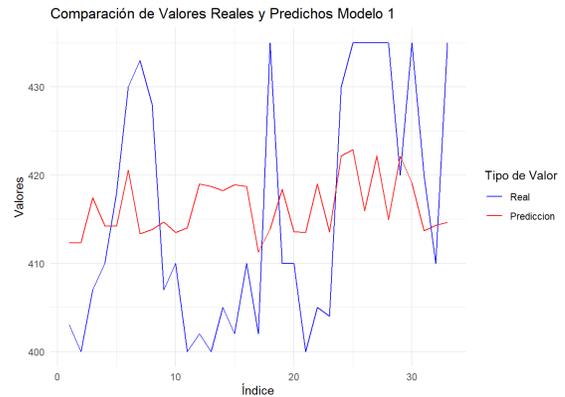


Figura 4.10: Comparación predicción modelo 1

En la figura 4.10 se puede observar la comparación entre la predicción del modelo 1 y los valores reales, probando en el 20% restante de la base de datos. Se puede apreciar que las curvas de los valores reales distan de los valores predichos por el modelo. En base a esto y a los indicadores obtenidos, se decide descartar este modelo, ya que el nivel de ajuste es menor a 0,3 tanto para R^2 como para R^2 ajustado, y la predicción tampoco ajusta de forma óptima, presentando un error medio cuadrático (RMSE) de 12,85448. A pesar de esto, en la tabla 4.2 se muestran los valores e interpretaciones de las variables más significativas del modelo 1.

Tabla 4.2: Estimadores muy significativos modelo 1

| Variable | Estimador | Error Estándar | Interpretación |
|--------------------|-----------|----------------|---|
| Intercepto | 355,7 | 23,44 | Valor que toma el PMT cuando todas las variables son iguales a 0. |
| Velocidad de línea | -1,17 | 0,245 | Por cada aumento unitario en la velocidad, PMT disminuye 1,17°F |
| Espesor | -70,138 | 14,23 | Por cada aumento unitario en el espesor, PMT disminuye 70,138°F |

Posterior a esto, se construyó un **segundo modelo**, esta vez agregando la interacción entre las variables identificadas como significativas en el modelo 1. La interacción entre variables se entiende como el efecto combinado que dos variables tienen sobre el PMT, en lugar de considerar el efecto de cada una por separado. Se propone agregar dichas interacciones de forma positiva, considerando más relevante el efecto que pueda tener la temperatura de la zona 1 del horno 2 en combinación con la otra variable con la que interactúe, mientras que la interacción entre espesor y velocidad se incluye de forma negativa, ya que el aumento de ambas variables disminuye el valor del PMT. Por consiguiente, se plantea el modelo 2 de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 PMT = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 2} + \hat{\beta}_2 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \\
 & - \hat{\beta}_3 \times \text{Velocidad de línea} - \hat{\beta}_4 \times \text{Espesor de acero} - \hat{\beta}_5 \times \text{Ancho de acero} \\
 & + \hat{\beta}_6 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Velocidad de línea} \\
 & + \hat{\beta}_7 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Espesor de acero} \\
 & - \hat{\beta}_8 \times \text{Espesor de acero} \times \text{Velocidad de línea} + \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

El modelo 2 presenta un mejor ajuste, pues, como se observa en la figura 4.11, el R^2 asciende a un valor de 0,4918 y el error cuadrático desciende a un valor de 8,899. Además, en la figura 4.12 se observa que la predicción del modelo se ajusta mejor a los valores reales que en el modelo 1. En términos generales, se aprecia una mejora en el ajuste; sin embargo, este todavía es mejorable, con un RMSE de 12,01538.

```

##
## Call:
## lm(formula = PMT ~ TempRealH2Z1 + TempRealH2Z2 + Vel + Ancho +
##     Espesor + TempRealH2Z1 * Vel + TempRealH2Z1 * Espesor + Espesor *
##     Vel, data = train_data)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -24.310  -4.293  -1.029   5.641  24.122
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  -4.212e+00  1.926e+02  -0.022  0.982586
## TempRealH2Z1  7.605e-01  4.770e-01  1.594  0.113437
## TempRealH2Z2  1.248e-01  3.528e-02  3.538  0.000571 ***
## Vel          7.820e-01  2.719e+00  0.288  0.774160
## Ancho        -3.935e-04  1.483e-02  -0.027  0.978881
## Espesor      5.733e+02  1.881e+02  3.047  0.002830 **
## TempRealH2Z1:Vel -5.903e-04  6.487e-03  -0.091  0.927648
## TempRealH2Z1:Espesor -1.093e+00  4.691e-01  -2.329  0.021507 *
## Vel:Espesor   -3.850e+00  1.470e+00  -2.619  0.009936 **
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8.899 on 122 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.4918, Adjusted R-squared:  0.4585
## F-statistic: 14.76 on 8 and 122 DF,  p-value: 6.099e-15

```

Figura 4.11: Modelo lineal 2

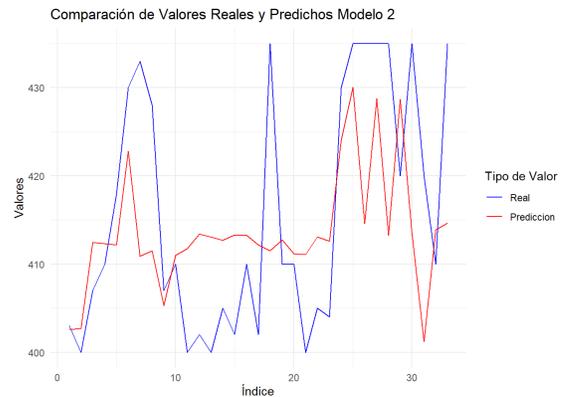


Figura 4.12: Comparación predicción modelo 2

Dado lo anterior, se descarta este segundo modelo y se procede a la creación de un **tercer modelo**, el cual incluye todas las interacciones posibles entre las variables. Esto se debe a que el modelo 2 se construyó agregando interacciones solo entre las variables identificadas como significativas en el modelo 1. Al ser un modelo con un ajuste bajo, esto podría generar errores, ya que podrían omitirse interacciones importantes. Así, se plantea el modelo 3 de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 PMT = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 2} + \hat{\beta}_2 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \\
 & - \hat{\beta}_3 \times \text{Velocidad de línea} - \hat{\beta}_4 \times \text{Espesor de acero} - \hat{\beta}_5 \times \text{Ancho de acero} \\
 & + \hat{\beta}_6 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Velocidad de línea} \\
 & + \hat{\beta}_7 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Espesor de acero} \\
 & - \hat{\beta}_8 \times \text{Espesor de acero} \times \text{Velocidad de línea} \\
 & + \hat{\beta}_9 \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 2} \times \text{Velocidad de línea} \\
 & + \hat{\beta}_{10} \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Espesor de acero} \\
 & + \hat{\beta}_{11} \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 1} \times \text{Temperatura Horno 2 Zona 2} + \varepsilon
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

El modelo 3 presenta un mejor ajuste que el modelo 2, como se observa en la figura 4.13. En específico, se observa lo siguiente.

- Un **R²** (R-squared) de 0,5705, lo cual significa que el 57,05 % de la variabilidad del PMT es explicada por las variables del modelo.
- Un **R² ajustado** (Adjusted R-squared) de 0,5308, es decir, el 53,08 % de la variabilidad del PMT es explicada por las variables del modelo, pero considerando una penalización por la cantidad de variables agregadas.
- Un **error residual** (Residual standard error) de 8,283. Esto significa que, en promedio, los valores estimados de PMT distan en 8,283°F de los reales.
- Se obtuvieron como variables significativas la velocidad, la interacción entre velocidad y espesor, y la interacción entre la velocidad y la temperatura de la zona 2 del horno 2. El modelo no presenta variables muy significativas ni tampoco levemente significativas.

Se puede apreciar que los indicadores del modelo mejoran en comparación con los dos anteriores, razón por la cual se muestran en la tabla 4.3 los estimadores que resultaron significativos. En la figura 4.14 se observa la comparación entre la predicción del modelo 3 y los valores reales. En este modelo, se puede ver que las curvas de valores reales ajustan de mejor forma con los valores predichos por el modelo con un RMSE de 11,44843. Dado que el modelo presenta mejores indicadores, un ajuste predictivo superior a los anteriores y un RMSE menor, **se decide escoger el modelo 3** para explicar la variabilidad en la obtención de un determinado PMT.

```
##
## Call:
## lm(formula = PMT ~ TempRealH2Z1 + TempRealH2Z2 + Vel + Ancho +
##   Espesor + TempRealH2Z1 * Vel + TempRealH2Z1 * Espesor + Espesor *
##   Vel + TempRealH2Z2 * Vel + TempRealH2Z2 * Espesor + TempRealH2Z1 *
##   TempRealH2Z2, data = train_data)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -22.0741  -4.9857   0.1679   4.1045  24.9384
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  4.956e+02  3.745e+02  1.323  0.18827
## TempRealH2Z1  1.610e-01  1.041e+00  0.155  0.87737
## TempRealH2Z2  3.962e-02  5.219e-01  0.076  0.93962
## Vel         -1.224e+01  4.317e+00 -2.835  0.00539 **
## Ancho       -8.313e-03  1.396e-02 -0.596  0.55262
## Espesor     1.137e+02  2.010e+02  0.566  0.57267
## TempRealH2Z1:Vel  3.679e-03  6.789e-03  0.542  0.58888
## TempRealH2Z1:Espesor  3.082e-01  6.934e-01  0.444  0.65752
## Vel:Espesor  -5.175e+00  1.610e+00 -3.215  0.00168 **
## TempRealH2Z2:Vel  1.705e-02  5.367e-03  3.176  0.00190 **
## TempRealH2Z2:Espesor -2.585e-01  3.562e-01 -0.726  0.46955
## TempRealH2Z1:TempRealH2Z2 -5.078e-04  1.220e-03 -0.416  0.67798
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8.283 on 119 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.5705, Adjusted R-squared:  0.5308
## F-statistic: 14.37 on 11 and 119 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Figura 4.13: Modelo lineal 3

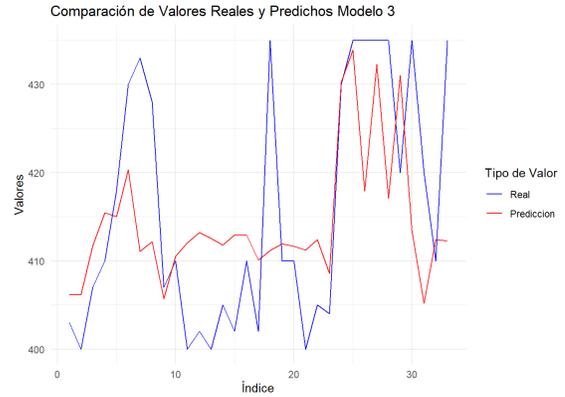


Figura 4.14: Comparación predicción modelo 3

Tabla 4.3: Estimadores significativos modelo 3

| Variable | Estimador | Error Estándar | Interpretación |
|--|-----------|----------------|---|
| Velocidad de línea | -12,24 | 4,317 | Por cada aumento unitario en la velocidad, PMT disminuye 12,24°F |
| Velocidad x Espesor | -5,17 | 1,61 | Por cada aumento unitario en el Espesor o Velocidad, el efecto combinado de ambas variables disminuye en 5,17°F el PMT |
| Temperatura Horno 2 Zona 2 x Velocidad | 0,017 | 0,0053 | Por cada aumento unitario en Temperatura de la zona 2 del horno 2 o en la Velocidad, el efecto combinado de ambas variables aumenta en 0,017°F el PMT |

De forma complementaria, se construyó un **cuarto modelo**, en el cual se eliminaron las variables independientes unitarias, es decir, las temperaturas de ambas zonas del horno 2, la velocidad de la línea, el espesor y el ancho del acero. Lo anterior se justifica en que, como la interacción de todas las variables es lo que repercute en la explicación del PMT, se considera que la incorporación de cada variable de forma unitaria podría no aportar valor a la predicción. El modelo 4 presenta un R^2 de 0,5693, inferior al obtenido en el modelo 3, y un RMSE de 11,41466, levemente inferior al obtenido en el modelo 3. Con esto en consideración, se decide descartar este modelo, pues no existen grandes diferencias con el modelo 3. El detalle de los estimadores del modelo 4 y la predicción de este se observan en los anexos 8 y 9, respectivamente.

4.3.2. Análisis en Excel

El segundo análisis de datos se realiza en Excel, a través del cual se estudia cómo interactúan las variables y, con esa información, se determina cuál es la configuración óptima de parámetros para trabajar en la línea. Para lograr esto, se establece una relación entre los parámetros, construida en función de cómo interactúan con la obtención de un PMT, agregando un "factor K" que permite conjugarlos todos. Finalmente, con este factor, a través del solver de Excel, se optimizan los parámetros de la línea. La relación establecida se presenta a continuación.

$$PMT = K \times \frac{TemperaturaHorno2Zona1 \times TemperaturaHorno2Zona2}{Velocidad \times Espesor} \quad (4.4)$$

Esta relación se construye con ambas zonas del horno 2 en el numerador, dado que son proporcionales al PMT, es decir, un aumento en el valor de estas temperaturas genera un aumento en el valor del PMT. Por el contrario, la velocidad y el espesor se agregan en el denominador, puesto que un aumento en el valor de estos genera una disminución en el PMT. No se consideró el ancho dentro de la relación, ya que no fue arrojado como un parámetro significativo en ninguno de los modelos del análisis en RStudio. Finalmente, se agrega un factor K que permite relacionar todos estos parámetros.

El factor K se calcula siguiendo esta relación, despejándolo para cada medición. Dado que la base de datos tiene un total de 164 datos, esto se traduce en 164 valores distintos de factor K. Luego, se determina un valor estándar calculando un promedio simple de todos los valores específicos, obteniendo un **valor de K** $\approx 0,0244$.

Dentro de la línea, se pinta con dos tipos de pinturas: Kemflex y Sherdur. Las pinturas Kemflex requieren alcanzar un PMT entre 410°F y 435°F para curarse, mientras que las del tipo Sherdur requieren un PMT entre 442°F y 456,8°F. En consideración de esto, las propuestas de estandarización se realizaron únicamente para pinturas del tipo Kemflex, dado que los datos recopilados y el análisis realizado previamente corresponden a este sector de la línea. Bajo el mismo argumento, las propuestas de estandarización se realizan para el segundo proceso de pintado, es decir, la configuración para el Horno 2.

A continuación, se presentan tres tablas. La tabla 4.4 muestra los parámetros actuales con los que se trabaja en la línea de pintura. En la tabla 4.5, se presenta una primera propuesta de estandarización. Finalmente, la tabla 4.6 muestra una segunda propuesta de estandarización.

Tabla 4.4: Parámetros actuales

| Espesor | T°Horno 2 Zona 1 (°F) | T°Horno 2 Zona 2 (°F) | Velocidad (m/m) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| 0,35 | 450 | 660 | 45 |
| 0,4 | 465 | 670 | 45 |
| 0,5 | 485 | 695 | 45 |
| 0,6 | 510 | 710 | 37 |
| 0,8 | 470 | 670 | 22 |

La primera propuesta de estandarización, que se muestra en la tabla 4.5, se calcula bajo las siguientes restricciones, correspondientes a los parámetros máximos y mínimos del marco de trabajo actual de los operadores.

- $450^{\circ}\text{F} \leq T^{\circ} \text{Horno 2 Zona 1} \leq 510^{\circ}\text{F}$
- $660^{\circ}\text{F} \leq T^{\circ} \text{Horno 2 Zona 2} \leq 710^{\circ}\text{F}$
- $22 \text{ (m/m)} \leq \text{Velocidad} \leq 45 \text{ (m/m)}$

Tabla 4.5: Estandarización Parámetros 1

| Espesor | T°Horno 2 Zona 1 (°F) | T°Horno 2 Zona 2 (°F) | Velocidad (m/m) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| 0,35 | - | - | - |
| 0,4 | 450 | 660 | 43,7 |
| 0,5 | 450 | 660 | 35 |
| 0,6 | 450 | 660 | 29,1 |
| 0,8 | 451.6 | 661,1 | 22 |

En esta primera propuesta de estandarización, no se pudo determinar una configuración para el espesor de acero de 0,35, dado que el solver no encontró una solución óptima bajo las restricciones proporcionadas. El valor máximo de la temperatura de la zona 1 es $451,6^{\circ}\text{F}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 510°F . El valor máximo de la temperatura de la zona 2 es $661,1^{\circ}\text{F}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 710°F . El valor máximo de velocidad es $43,7 \text{ (m/m)}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 45 (m/m) .

La segunda propuesta de estandarización, que se muestra en la tabla 4.6, se calcula bajo las mismas restricciones que la primera, pero eliminando las restricciones inferiores, otorgando así un mayor grado de libertad a la estandarización. Esto se justifica en que no existen razones que impidan trabajar a menores temperaturas o velocidades, mientras que las restricciones superiores corresponden a las temperaturas máximas del horno y la velocidad máxima de la línea.

- $T^{\circ} \text{Horno 2 Zona 1} \leq 510^{\circ}\text{F}$
- $T^{\circ} \text{Horno 2 Zona 2} \leq 710^{\circ}\text{F}$
- $\text{Velocidad} \leq 45 \text{ (m/m)}$

La segunda propuesta de estandarización presenta valores más distintos de los parámetros actuales en comparación con los obtenidos en la primera propuesta. En particular, los valores de ambas zonas del horno y la velocidad tienden a ser menores. El valor mínimo de la temperatura de la zona 1 es $363,4^{\circ}\text{F}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 510°F . El valor mínimo de la temperatura de la zona 2 es $505,9^{\circ}\text{F}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 710°F . El valor máximo de velocidad es $30,9 \text{ (m/m)}$, mientras que bajo los parámetros actuales, el valor más alto es 45 (m/m) .

Tabla 4.6: Estandarización Parámetros 2

| Espesor | T°Horno 2 Zona 1 (°F) | T°Horno 2 Zona 2 (°F) | Velocidad (m/m) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 0,35 | 363,4 | 505,9 | 30,9 |
| 0,4 | 379,7 | 528,6 | 29,5 |
| 0,5 | 408,2 | 568,3 | 27,3 |
| 0,6 | 433,2 | 603,2 | 25,6 |
| 0,8 | 476,1 | 662,8 | 23,2 |

En general, la primera propuesta muestra valores más similares a los parámetros actuales, lo que puede ser resultado de las restricciones bajo las cuales se optimizó. Esto implica que la segunda propuesta de optimización, al tener un mayor grado de libertad, ofrece una configuración cuyos valores se alejan más de los actuales. Con esta segunda configuración, se produciría menos, ya que la línea funcionaría a una velocidad más baja para todos los espesores de acero. Sin embargo, manejar velocidades inferiores puede proporcionar un mejor control del proceso y, en principio, traducirse en productos de mejor calidad.

4.4. Discusiones

4.4.1. Discusiones sobre objetivos

En línea con el cumplimiento del objetivo general, existen objetivos específicos que fueron omitidos. Se podría haber añadido un objetivo específico que abordara la reformulación de los autocontroles de la línea, ya que los autocontroles actuales no registran datos relevantes que aseguren la calidad de los productos. Incluir este objetivo específico habría permitido mejorar el control sobre el proceso de pintado. De la misma forma, se podría haber agregado un objetivo específico que abordara los parámetros no críticos de la línea, como, por ejemplo, la calibración química de los baños de tratamiento de superficie, pues los parámetros actuales no están validados. Incluir este objetivo habría permitido detectar si el proceso realizado es el más eficiente para asegurar la adherencia de la pintura sobre el acero. Tampoco se incorporó un objetivo que analizara si las pruebas mecánicas de control de calidad son las óptimas, ya que, a pesar de obtener resultados satisfactorios en dichas pruebas, se producen inconformidades y reclamos por parte de los clientes. Además, no se realizó un análisis de las principales causas de inconformidades por parte de los clientes. Incluir este objetivo habría permitido analizar qué pruebas deben realizarse para garantizar la calidad de los productos y, en consecuencia, reducir la cantidad de reclamos e inconformidades.

A pesar de lo anterior, los objetivos específicos planteados permiten dar una correcta orientación al proyecto, además de ajustarse a las necesidades tanto de la empresa como académicas. La propuesta del primer objetivo específico se convirtió en una parte fundamental del proyecto, pues el funcionamiento de la línea presentaba una serie de deficiencias que perjudicaban la calidad de los productos. La propuesta del segundo objetivo fue crucial, ya que implicó un análisis y entendimiento sobre cómo interactúan los parámetros de la línea y su implicancia en los resultados finales. El tercer objetivo se encuentra estrechamente relacionado con el segundo, pues corresponde a un paso previo para lograr definir nuevos parámetros en la línea. La propuesta de este objetivo fue fundamental, ya que se desconoce quién y en qué momento se definieron los parámetros actuales. De esta forma, se pudieron validar y posteriormente optimizar los parámetros bajo los cuales se trabaja en la línea. Finalmente, el último objetivo específico permite cuantificar económicamente el problema, sin embargo, no se contó con la suficiente información para obtener conclusiones más significativas.

La empresa ha sido proactiva en la toma de decisiones relacionadas con el proyecto, facilitando y acelerando gestiones cuando ha sido necesario. Esto es resultado del trabajo multidisciplinario que se llevó a cabo durante todo el proyecto. Sin embargo, se debe mejorar la agilidad y prontitud en la entrega y envío de la información solicitada. Además, en términos generales, existen aspectos que no se abordaron principalmente por temas de tiempo, pero que la empresa debe atender en el mediano y largo plazo para propiciar el buen funcionamiento de la línea.

4.4.2. Discusiones sobre alcances

Los alcances se ajustaron adecuadamente al trabajo realizado y permitieron definir el proyecto, aclarando qué aspectos se abordarían y cuáles no. Existe una coherencia entre los objetivos específicos y los alcances, siendo estos últimos un complemento de los objetivos, clarificando hasta dónde se llegaría con el proyecto. Los alcances definen los límites para construir una solución que, si bien no aborda todas las problemáticas presentes en la línea, permite crear una primera solución que dé paso a soluciones más complejas y completas. De esta forma, la regularización de la línea se alinea correctamente con la decisión de no crear un plan de mantenimiento, ya que el proyecto se centra en visibilizar y regularizar los problemas actuales de la línea. La estandarización de parámetros se delimita al no abordar aquellos que no fuesen críticos, como por ejemplo la validación de los baños de tratamiento de superficie, dado que bajo los parámetros actuales la pintura se adhiere al acero sin complicaciones. De igual manera, la no implementación de la propuesta de parámetros ni la posterior cuantificación de su efecto definen un proyecto que, si bien es implementable, está sujeto a mejoras, tanto en los resultados como en la complejidad de las soluciones, las cuales pueden abordarse tomando como punto de partida los resultados obtenidos en este proyecto.

La definición de estos alcances permitió delegar a la empresa la responsabilidad de velar por la correcta mantención de la línea en el mediano y largo plazo. Este punto es fundamental, ya que el no preocuparse ni otorgar un seguimiento adecuado al funcionamiento de la línea fueron las principales causas de todas las irregularidades que se presentaron en el proceso. Con base en esto, una vez identificadas las principales necesidades de la línea, la empresa se ha encargado de propiciar tanto las mejoras en la operación como en la mantención de las máquinas utilizadas.

Por otro lado, la definición de estos alcances limita el estudio de los resultados. En primer lugar, la no creación de un plan de mantención para la línea podría repercutir en que el trabajo realizado se pierda a mediano plazo. En segundo lugar, no implementar los nuevos parámetros de la línea priva de la oportunidad de analizar si efectivamente estos entregan el resultado esperado, además de impedir realizar mejoras o ajustes. Asimismo, los alcances debieron plantearse de forma mucho más extensa, para englobar todos aquellos aspectos importantes para el funcionamiento de la línea que no se estaban incorporando, como, por ejemplo, la no reformulación de los autocontroles, las pruebas mecánicas de calidad, entre otros.

4.4.3. Discusiones sobre metodología

La metodología aplicada permitió abordar las dos aristas del problema central. En primer lugar, las irregularidades en las necesidades del proceso de pintado se abordaron a través del levantamiento general en la línea, junto con la planificación continua. En segundo lugar, las irregularidades operacionales se enfrentaron mediante la estandarización de parámetros. Si bien la metodología ofrecía un lineamiento de trabajo, este era flexible según las necesidades que surgieran.

Por otro lado, la empresa tuvo una participación activa en la implementación de la metodología. Inicialmente, el levantamiento se planeó de manera lineal por las etapas del proceso; sin embargo, la empresa solicitó cambios en el orden del levantamiento, ya que se identificaron sectores más críticos que no seguían ese orden lineal. Con base en esto, la empresa pidió iniciar el levantamiento en los sectores que impactaban directamente en la calidad de las bobinas pintadas. Como resultado, el orden seguido para el levantamiento fue el siguiente: primero el sector de entrada, luego el sector de salida, seguido por el sector de pintado, y finalmente, el sector de tratamiento de superficie.

Aunque la metodología permitió abordar el proyecto de manera efectiva, no se utilizó una metodología preexistente para guiar el proceso. En general, se siguió una metodología planteada y construida en conjunto con el equipo de Excelencia Operacional. A pesar de esto, la metodología incorporó de manera adecuada las herramientas descritas dentro del marco conceptual, ya que ambas herramientas fueron utilizadas para abordar las dos aristas del problema general.

4.4.4. Discusiones sobre resultados

En primer lugar, la cuantificación económica se realizó basándose en el costo de un kilo de producto. Sin embargo, este ejercicio no es el más idóneo, ya que la empresa produce distintos tipos de planchas, placas, tejas, etc. Por lo tanto, el ejercicio debió haberse llevado a cabo de manera mucho más exhaustiva y específica para cada tipo de producto. Además, no se pudo incorporar un valor asociado a los costos por reprocesos debido a inconformidades, ya que había poca información disponible. Finalmente, esta cuantificación incluye solo los costos asociados a la línea de pintura; sin embargo, los costos pueden ser mayores si se consideran los costos de las demás plantas de la empresa, que son necesarias para la reposición de productos. Por ejemplo, si se genera un reclamo por 20 planchas con aislación cuya causa de origen está en la pintura, se deben considerar no solo los costos de la línea de pintura para fabricar nuevamente las planchas, sino también los de la planta de frío, lo cual puede incluir recurso humano, materia prima, consumo de energía, entre otros.

En cuanto al levantamiento general realizado en la línea, este constituyó un trabajo exhaustivo, ya que las anomalías de cada sector se detectaron a través de "entrevistas" con los operadores de cada sector. En estas entrevistas se les preguntó por cada uno de los ítems visibles en la figura 4.1 de la sección 4.2. Para el caso de insumos, se consultó si había una cantidad suficiente de stock para trabajar; y, en caso de máquinas o instrumentos, se preguntó en qué condiciones estaban y si estas permitían trabajar de forma óptima. Tanto en el caso

de los insumos como en el de las máquinas e instrumentos, se consultó si detectaban alguna necesidad o carencia adicional, o si veían alguna oportunidad de mejora para el proceso. Una vez obtenida esta información, se corroboraba con el supervisor de la línea, quien debía confirmar o aclarar la información proporcionada por los operadores. Después de levantar y validar la información, esta se presentaba en las reuniones semanales de elaboración del plan de acción, donde fue fundamental para crear acciones correctivas para cada una de las anomalías detectadas. Así, la dinámica de las reuniones consistía en revisar el cumplimiento de las acciones y acordar nuevas acciones.

Aunque el trabajo realizado fue extenso, resulta complicado cuantificar la regularización del proceso, lo cual está directamente relacionado con la dificultad de cuantificar los resultados, especialmente en términos económicos, como la reducción de costos o el aumento de la productividad. Esto se debe a que el trabajo dentro de la empresa, y particularmente en la línea, es multidisciplinario, por lo que no es fácil atribuir los efectos a una sola causa. No obstante, la línea ha tenido una mayor visibilización de las necesidades presentes, además de un mayor interés por parte de las gerencias de la empresa. Esto permite resolver de manera más oportuna las problemáticas que puedan surgir.

Respecto a los resultados obtenidos en el análisis realizado en RStudio, este se llevó a cabo comenzando con un análisis exploratorio de los datos, donde se buscó identificar correlaciones entre las variables. Se observó que 10 de las 15 principales correlaciones son entre variables independientes y, de forma complementaria, no se pudieron obtener conclusiones claras sobre la relación entre los valores de las variables independientes y el comportamiento de la variable dependiente. Posteriormente, se construyeron 4 modelos predictivos para explicar la variabilidad del PMT, los cuales arrojaron un ajuste menor al 60%. Además, el nivel de predicción del PMT es mejorable, pues todos los modelos presentaron un error residual cuadrático superior a 11; cuanto más cercano a cero sea este valor, mejor será la predicción.

Esto puede deberse a varias causas. En primer lugar, se excluyeron del análisis y de los modelos variables que, en principio, también son relevantes para explicar el PMT, como la viscosidad de la pintura al momento de ser aplicada, los micromilímetros de espesor de la pintura o la catenaria de la línea (tensión del acero al atravesar la línea). La catenaria se dejó fuera ya que es un dato no registrado en la línea, y los micromilímetros y la viscosidad corresponden a datos que no son recuperables dentro de los registros para ser agregados a la base de datos construida; estos deben ser registrados al momento de elaborarse cada producto. En segundo lugar, aunque menos probable, podría deberse a la confiabilidad y robustez de los datos, ya que la base de datos se construyó con los registros realizados por los operadores, los cuales pueden no ser del todo confiables. Los datos presentan coherencia, ya que si no fuera así, la línea produciría productos con problemas de calidad con mucha mayor frecuencia; sin embargo, para realizar análisis de datos donde las conclusiones son sensibles a desviaciones, esto podría generar errores y problemas al momento de construir modelos.

En cuanto a los resultados obtenidos a través del análisis realizado en Excel, la relación establecida entre los parámetros de la línea podría no ser la óptima, ya que eventualmente debería incluir otras variables dentro de la interacción, según lo discutido en el párrafo anterior. Además, el factor K obtenido se calculó como un valor único para todos los esquemas y espesores; sin embargo, este factor K podría ser más específico y tener un valor distinto para cada espesor. Esto se podría lograr calculando el K promedio agrupado por espesor, aunque se

requeriría una mayor cantidad de datos para mantener la confianza en los resultados, ya que con la cantidad actual de datos, cada espesor contaría con aproximadamente 1/5 de los datos. Finalmente, las propuestas de estandarización, como se mencionó, se realizaron a través del solver de Excel, el cual se configuró para optimizar un PMT de 415°F; sin embargo, la configuración entregada por solver depende de los valores iniciales introducidos para el cálculo. Es decir, si se aplica el solver con una configuración inicial que considere temperaturas bajas para ambas zonas del horno, el solver entregará una configuración con valores tendientes a ser más bajos. Esto presenta un problema de variabilidad en los resultados, lo que implica que la propuesta entregada no es necesariamente la exacta o definitiva. Por lo tanto, se debe tener en cuenta esta salvedad al momento de generar nuevas propuestas de parametrización. Una forma de resolver este problema es agregar restricciones a la configuración, pues esto reduce los grados de libertad del solver, permitiendo obtener resultados más específicos. Estas restricciones deben definirse en función de los intereses de la empresa, ya que se pueden establecer configuraciones enfocadas en la calidad, es decir, un proceso más controlado, o en la productividad, con un proceso más eficiente en el uso del tiempo.

4.4.5. Extensiones del proyecto

En línea con lo comentado en las discusiones de los resultados, la propuesta de extensión del proyecto está relacionada directamente con solventar las limitaciones que se presentaron en este proyecto. Para lo cual, se debe realizar una recopilación de datos que permita crear una nueva base de datos, más completa y de mayor confianza, sobre la cuál realizar nuevamnete los análisis ya hechos. Para cumplir dicho objetivo, se plantean a continuación los pasos a seguir.

1. Realizar mediciones en la línea, registrando las variables de interés ya consideradas, y agregando las nuevas. Se sugiere realizar de primera fuente la medición del PMT a través de la ocupación de thermolabels.
2. Construir una nueva base de datos con los registros recolectados en el paso anterior.
3. Realizar análisis en RStudio y Excel con la nueva base de datos.
4. Recalcular el factor K, con las consideraciones mencionadas en la sección anterior.
5. Entregar una nueva propuesta de estandarización de parámetros, utilizando el factor K actualizado, y en consideración de lo mencionado en la sección anterior.

Capítulo 5

Conclusiones

La cuantificación económicamente del impacto que tiene la no estandarización de parámetros de la línea no se cumplió plenamente. Aunque se realizó una cuantificación económica basada en el costo por kilo de producto, este análisis fue generalizado y no específico para cada tipo de producto que la empresa fabrica. Esta generalización no permite capturar con precisión el impacto económico total de la no estandarización de los parámetros de la línea, ya que los costos asociados a los reprocesos por inconformidades pueden variar significativamente según el tipo de producto y su complejidad. Además, el análisis se centró únicamente en los costos directos de la línea de pintura, sin considerar plenamente los costos adicionales que surgen en otras plantas de la empresa. Si se hubiera cumplido completamente el objetivo de cuantificar este impacto económico de manera más detallada y específica, la empresa podría haber identificado con mayor precisión las áreas donde la falta de estandarización está generando mayores costos. Con esta información, la empresa podría tomar decisiones más informadas para implementar estándares que reduzcan los reprocesos y mejoren la calidad del producto final.

El levantamiento de línea reveló problemas significativos en la producción, tales como desviaciones en las materias primas, fallos en las maquinarias y necesidades operacionales no atendidas. La detección de estas anomalías permitió crear un plan de acción para solucionar estas problemáticas. Aunque al término del proyecto se logró un cumplimiento del 54 % del plan, se puede asegurar que se regularizó el funcionamiento de la línea. Al finalizar el levantamiento, se tuvo claridad sobre todos los problemas y necesidades presentes, resolviendo las más urgentes y fijando acciones para abordar las pendientes. Esto genera valor para la empresa, ya que un proceso desordenado está perpetuamente sujeto a fallos, lo que incrementa los desperdicios y reduce tanto la disponibilidad como la eficiencia productiva. Así, regularizar el proceso es un paso necesario antes de su optimización.

El análisis de los parámetros y la posterior construcción de modelos predictivos proporcionaron un marco de referencia crucial para comprender la relevancia de diversas variables en la obtención de un PMT específico. Con base en estos análisis, se construyó una relación matemática que relaciona los parámetros estudiados a través de un factor K de aproximadamente 0,0224. Esto asegura un entendimiento de las variables y cómo los parámetros de la línea se relacionan con las características de las materias primas para la obtención de pro-

ductos finales. Este análisis genera valor para la empresa al constituir una base sólida para la elaboración de propuestas de mejora en la línea. Si bien es necesario agregar aspectos adicionales para construir soluciones más completas, la metodología aplicada es perfectamente replicable con la adición de datos que completen el análisis. Junto con la recopilación de una mayor cantidad de datos, esto permitiría obtener conclusiones más específicas y ajustadas para los distintos esquemas de producción de la línea.

El análisis permitió generar, a través del Solver de Excel, dos propuestas de estandarización de parámetros de la línea. La primera propuesta muestra valores similares a los que se utilizan actualmente, aunque estos resultados consideran límites dados por el marco de trabajo actual, como la temperatura o velocidad mínima. Al liberar estas restricciones al Solver, se obtuvieron resultados más alejados de los actuales. De este modo, ambas propuestas ofrecen a los trabajadores un marco de referencia que, si se sigue, debería garantizar que los productos sean de buena calidad, atribuyendo las desviaciones a factores externos al proceso, como las condiciones no ideales de las materias primas, especialmente las pinturas. Esto genera valor para la empresa, ya que proporciona un mayor entendimiento sobre el trabajo que realizan los operadores en la línea. Actualmente, existe un distanciamiento entre ellos y las gerencias, generando desconfianza en el proceso. Las propuestas de estandarización ayudan a solventar esta dificultad y aseguran que, mientras se cumplan todas las condiciones de trabajo y se regularicen las materias primas, los productos pintados en la línea serán de calidad.

El proyecto sentó las bases para futuras investigaciones en la línea de pintura, aunque no logró cuantificar de manera específica el impacto económico de la no estandarización de parámetros. Si bien el análisis económico fue general y no capturó la variabilidad de costos entre los distintos productos, el levantamiento detallado permitió regularizar el funcionamiento de la línea, lo que es esencial para su posterior optimización. Además, el análisis de parámetros y la construcción de modelos predictivos establecieron un marco inicial para entender las variables clave en la calidad del producto final. Aunque estos modelos requieren complementos para ser más precisos, la metodología aplicada es replicable, lo que facilita futuros estudios más exhaustivos. Las propuestas de estandarización generadas mediante el Solver de Excel proporcionaron un marco de referencia útil para los operadores, asegurando la calidad del producto dentro de los límites actuales y abriendo la posibilidad de futuras mejoras. El proyecto constituye una base sólida para futuras investigaciones porque establece una estructura metodológica clara y adaptable, lo que permite a otros investigadores tomar el trabajo realizado como punto de partida, agregar datos y realizar análisis más detallados. En resumen, este proyecto ha proporcionado una base robusta que puede ser utilizada para profundizar en la excelencia operacional y mejorar la calidad de los productos en la empresa.

Bibliografía

- [1] R. M. Barnes. *Motion and Time Study: Design and Measurement of Work*. John Wiley & Sons, 1991.
- [2] Cintac. Grupo cintac, s.f.
- [3] Empresa Cintac. Cintac, s.f.
- [4] Grupo Cintac. Memoria integrada 2023 [archivo pdf], 2023.
- [5] J. K. Liker and J. K. Franz. *El modelo Toyota para la mejora continua: Conectando la estrategia y la excelencia operacional para conseguir un rendimiento superior*. Profit Editorial, 2020.
- [6] MACH 65. Informe macroeconomía y construcción [archivo pdf], 2024.
- [7] Real Academia Española. Curado. En *Diccionario de la lengua española*, s.f. Recuperado el 22 de julio de 2024, de <https://dle.rae.es/curado>.
- [8] G. M. Spinks, Z. Liu, H. Brown, M. Swain, H. See, and E. Evans. Paint layer thermomechanical properties determined by in situ dynamic mechanical analysis in 3-point bending. *Progress In Organic Coatings*, 49(2):95–102, 2004.
- [9] K. D. Weiss. Paint and coatings: A mature industry in transition. *Progress In Polymer Science*, 22(2):203–245, 1997.
- [10] A. Wörnheim. *Holistic evaluation and testing of coil coatings*. Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2023.

Anexos

.1. Anexo A: Resumen giros 2022 y 2023 de Grupo Cintac

| | 2022 | 2023 |
|---|-------------|-------------|
| Ingresos consolidados | 446,7 | 410,6 |
| EBITDA consolidado | -13,8 | 20,8 |
| Resultado neto | -48,1 | -36,9 |
| Costos directos operacionales | 493,5 | 461,8 |
| Monto total distribuido a trabajadores en remuneraciones y beneficios | 64,1 | 62,9 |
| Monto pagado a empresas colaboradoras | 429,4 | 398,9 |
| Monto pagado al Estado a través de impuestos | 30,1 | -10,1 |
| Monto pagado a accionistas | 22,6 | 0,0 |
| Monto pagado a financistas | 13,3 | 23,4 |
| Monto retenido en la empresa | 22,6 | 0,0 |

Figura 1: Valor económico generado y distribuido en Grupo Cintac en Millones de US\$.
Fuente: Memoria Integrada 2023

.2. Anexo B: Línea de pintura



Figura 2: Bobinas de acero



Figura 3: Sector entrada



Figura 4: Sector tratamiento de superficie



Figura 5: Sector pintado coater 2



Figura 6: Sector pintado horno y enfriador 2



Figura 7: Sector salida

.3. Anexo C: Modelo lineal 4

```
##  
## Call:  
## lm(formula = PMT ~ TempRealH2Z1 * Vel + TempRealH2Z1 * Espesor +  
##   Espesor * Vel + TempRealH2Z2 * Vel + TempRealH2Z2 * Espesor +  
##   TempRealH2Z1 * TempRealH2Z2, data = train_data)  
##  
## Residuals:  
##      Min       1Q   Median       3Q      Max   
## -21.9190  -5.0514   0.1576   4.1375  24.7256   
##  
## Coefficients:  
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      
## (Intercept)      4.925e+02  3.735e+02   1.319  0.18978      
## TempRealH2Z1      1.172e-01  1.036e+00   0.113  0.91007      
## Vel              -1.205e+01  4.294e+00  -2.806  0.00585 **   
## Espesor           1.031e+02  1.997e+02   0.517  0.60641      
## TempRealH2Z2      5.276e-02  5.200e-01   0.101  0.91935      
## TempRealH2Z1:Vel  3.936e-03  6.757e-03   0.583  0.56130      
## TempRealH2Z1:Espesor 3.516e-01  6.877e-01   0.511  0.61012      
## Vel:Espesor       -5.195e+00  1.605e+00  -3.237  0.00156 **   
## Vel:TempRealH2Z2  1.664e-02  5.310e-03   3.135  0.00216 **   
## Espesor:TempRealH2Z2 -2.719e-01  3.546e-01  -0.767  0.44460      
## TempRealH2Z1:TempRealH2Z2 -4.968e-04  1.216e-03  -0.408  0.68371      
## ---  
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
##  
## Residual standard error: 8.261 on 120 degrees of freedom  
## Multiple R-squared:  0.5693, Adjusted R-squared:  0.5334   
## F-statistic: 15.86 on 10 and 120 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 8: Modelo lineal 4

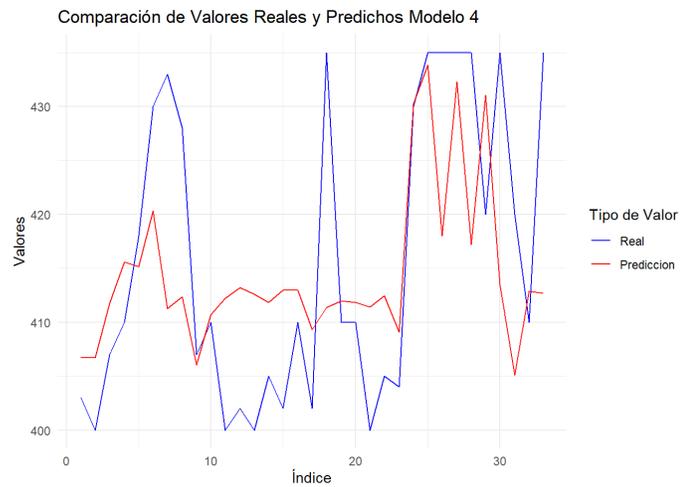


Figura 9: Comparación predicción modelo 4