



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

# Aplicación de la Metodología 5S y Desarrollo de un Modelo de Programación para la Optimización de Compras de Repuestos

Agustina Iara Sandman Cabrera  
Santiago Juan Boix Gastelú  
Agustina Pérez Irazábal

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniería de Producción.

## **Tutores**

Lorena Silveira  
Gerardo Gazzano  
Javier Alsó

## **Tribunal**

Mariana Silva (IEM)  
Mauricio Ohanian (IIQ)  
Antonio Mauttone (INCO)

Montevideo, Uruguay  
Junio de 2025

## Resumen ejecutivo

En este proyecto se aborda la problemática de la organización del entorno laboral y la gestión de inventario de repuestos en una planta industrial del sector siderúrgico. La empresa se enfrenta a deficiencias significativas en términos de desperdicio de recursos y falta de organización en el lugar de trabajo. Además, se enfrenta a desafíos adicionales relacionados con la gestión del inventario de repuestos. La falta de claridad sobre la cantidad óptima de stock necesaria y la falta de un proceso consolidado para la importación de estos componentes resultan en gastos excesivos. Esta incertidumbre no solo impacta negativamente en los costos operativos, sino que también dificulta la planificación estratégica y la toma de decisiones informadas.

Para abordar esta situación, se desarrollan dos líneas de acción complementarias. Por un lado, se realiza un estudio detallado sobre la aplicación de la metodología 5S, implementando únicamente las primeras tres etapas (Clasificación, Orden y Limpieza) en las áreas de Laminado en Frío y Producción de Mallas Electrosoldadas. Esta implementación incluye relevamientos, diagnósticos visuales, entrevistas al personal y capacitaciones, con el objetivo de comenzar un proceso sostenido de mejora en la organización y limpieza del entorno laboral.

Por otro lado, se formula un modelo matemático de optimización para la planificación de compras de repuestos críticos. El modelo considera restricciones presupuestales y de capacidad de almacenamiento, tiempos de entrega diferenciados por origen, costos de desabastecimiento y una demanda estimada a partir de datos históricos mediante una distribución de Stuttering Poisson. A través de la ejecución de diversos casos de prueba y escenarios simulados, se verifica que el modelo es capaz de generar soluciones factibles y coherentes, priorizando el funcionamiento de las máquinas, anticipando compras cuando es posible, y reflejando con precisión el impacto económico de las decisiones.

Ambas herramientas resultaran complementarias en su enfoque preventivo y estratégico. Mientras la metodología 5S sienta las bases para un entorno de trabajo más ordenado y eficiente, el modelo de optimización brinda una herramienta analítica que apoya la toma de decisiones operativas. La aplicación conjunta de estas estrategias demuestra que es posible implementar soluciones de bajo costo y alto impacto en entornos industriales complejos, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sustentable.

**Palabras clave:** metodología 5S, mejora continua, inventario, optimización, repuestos.

**Keywords:** 5S methodology, continuous improvement, inventory, optimization, spare parts.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>9</b>
1.1	Descripción de la problemática	12
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>19</b>
3.1	La Metodología 5S en la Manufactura Esbelta	19
3.2	Metodología 5S	20
3.2.1	Fases de Implementación de la Metodología 5S	20
3.2.2	Impacto de la Metodología 5S en la Productividad y Cultura Organizacional	21
3.2.3	Implementación y Desafíos de 5S	21
3.2.4	Digitalización de 5S	22
3.2.5	Aplicación de 5S en el Diseño y Optimización de Layouts	23
3.2.6	Aplicación de 5S en la Gestión de Inventarios y Almacenes	24
3.3	Gestión de inventarios	24
3.3.1	Herramientas clásicas	25
3.3.2	Clasificación de Modelos de Gestión de Inventarios	27
3.3.3	Demanda Incierta con Reposición Fija	28
3.3.4	Demanda Incierta con Revisión Aleatoria	31
3.3.5	Demanda Incierta con Puntos de Reorden	35
3.3.6	Mantenimiento	38
<b>4</b>	<b>Metodología 5S</b>	<b>41</b>
4.1	Análisis primera evaluación	43
4.2	Plan de acción	46
4.3	Ejecución plan de acción	47
4.4	Determinación de capacidad máxima y layout	56
4.5	Continuidad y proyección a futuro de la metodología 5S	58
<b>5</b>	<b>Metodología gestión de stock</b>	<b>59</b>
5.1	Análisis de datos	59
5.2	Desarrollo	60
5.2.1	Supuestos	62
5.2.2	Modelo	64
5.2.3	Validación del modelo	68
5.2.4	Ejecución del modelo con datos reales	82
5.2.5	Análisis de sensibilidad	88
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>95</b>
6.1	Trabajo a Futuro	97
6.2	Lecciones aprendidas	98
<b>7</b>	<b>Anexo</b>	<b>101</b>
7.1	Revisión exhaustiva de la literatura	101
7.1.1	Procedimiento metodológico	101
7.1.2	Metodología aplicada a Gestión de Inventarios	101
7.1.3	Metodología aplicada a 5s	108
7.2	Herramientas utilizadas para la aplicación de 5S	109
7.3	Clasificación de la demanda en cada repuesto	119
7.4	Salidas variables casos de prueba	119

7.5	Archivo de datos de entrada para el caso real . . . . .	124
7.6	Demanda en los escenarios . . . . .	133
<b>Bibliografía</b>		<b>135</b>

## Índice de tablas

1	Glosario de siglas utilizadas en el informe . . . . .	8
2	Clasificación de papers de demanda incierta . . . . .	27
3	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 0 . . . . .	68
4	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 0 . . . . .	69
5	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 0 . . . . .	69
6	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 1 . . . . .	70
7	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 1 . . . . .	70
8	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 1 . . . . .	70
9	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 2 . . . . .	71
10	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 2 . . . . .	71
11	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 2 . . . . .	71
12	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 3 . . . . .	72
13	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 3 . . . . .	72
14	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 3 . . . . .	72
15	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 4 . . . . .	73
16	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 4 . . . . .	73
17	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 4 . . . . .	74
18	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 5 . . . . .	75
19	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 5 . . . . .	75
20	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 5 . . . . .	75
21	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 6 . . . . .	76
22	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 6 . . . . .	77
23	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 6 . . . . .	78
24	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 7 . . . . .	79
25	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 7 . . . . .	79
26	Demandas mensuales por repuesto - Caso de prueba 7 . . . . .	79
27	Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 8 . . . . .	80
28	Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 8 . . . . .	80
29	Demandas mensuales por repuesto - Caso de prueba 8 . . . . .	81
30	Unidades adquiridas por repuesto . . . . .	87
31	Comparación de la función objetivo por escenario . . . . .	89
32	Sensibilidad de la función objetivo y paradas de máquina ante variaciones en el costo de desabastecimiento. . . . .	91
33	Activación mensual por máquina en los tres escenarios . . . . .	93
34	Colección Timbó . . . . .	102
35	Colección Google Scholar . . . . .	102
36	Colección Science Direct . . . . .	102
37	Clasificación de papers con demanda incierta que utilizan métodos paramétricos. . . . .	107
38	Clasificación de papers con demanda incierta que utilizan métodos no paramétricos. . . . .	108
39	Cantidad de artículos sobre 5S en la colección Google Scholar . . . . .	109
40	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 7 . . . . .	121
41	Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 8 . . . . .	123
42	Valores de faltante inicial por repuesto – Caso de prueba 8 . . . . .	124

## Índice de figuras

1	Laminador - Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	10
2	Máquina de Soldar - Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	10
3	Bobinas Laminador - Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	10
4	Rollos salvajes - Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	10
5	Mallas en paño - Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	11
6	Plano del galpón donde se encuentran las dos máquinas productivas - elaboración propia . . . . .	11
7	ARC propuesto por los autores en Rashindra et al. [2023] . . . . .	23
8	Gráficos seguimiento taller de auditorías según check list a modo de ejemplo - elaboración propia. . . . .	42
9	Primer evaluación - promedio por sentido - elaboración propia. . . . .	45
10	Cantidad de elementos por ubicación - elaboración propia. . . . .	48
11	Cantidad de elementos por estado en la máquina de mallas - elaboración propia. . . . .	49
12	Cantidad de elementos por estado en el Laminador en Frío - elaboración propia. . . . .	49
13	Frecuencias de uso en estante debajo del pupitre máquina de mallas - elaboración propia. . . . .	49
14	Estado inicial estante. Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	49
15	Estado final estante. Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	49
16	Frecuencias de uso en mueble en pupitre máquina de mallas - elaboración propia. . . . .	50
17	Frecuencias de uso en mueble móvil máquina de mallas - elaboración propia. . . . .	50
18	Frecuencias de uso en mueble del pupitre del Laminador en Frío - elaboración propia. . . . .	51
19	Frecuencias de uso en mueble zona de salida del Laminador en Frío - elaboración propia. . . . .	51
20	Tabla de seguimiento de inventario . . . . .	52
21	Hoja de ingreso, egreso y consulta de stock - elaboración propia. . . . .	53
22	Estado inicial de los tachos en el galpón: (a), (b) y (c). Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	54
23	Estado inicial de los tachos en el taller: (a) y (b). Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	54
24	Estado final de los tachos en el galpón: (a), (b) y (c). Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	55
25	Estado final de los tachos en el taller: (a) y (b). Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	55
26	Estado actual área material en proceso. Foto tomada por los autores del trabajo . . . . .	56
27	Ejemplo distribución Stuttering Poisson . . . . .	62
28	Evolución mensual del stock, compras y demandas - elaboración propia. . . . .	84
29	Evolución de stock en unidades de espacio - elaboración propia. . . . .	85
30	Porcentaje de tiempo operativo por máquina - elaboración propia. . . . .	86
31	Repuestos comprados por escenario - elaboración propia. . . . .	90
32	Cantidad de meses de maquina parada por escenario - elaboración propia. . . . .	90
33	Variación de la función objetivo según la variación de costo de desabastecimiento - elaboración propia. . . . .	91
34	Cantidad de paradas anuales por máquina en función del costo de desabastecimiento - elaboración propia. . . . .	92
35	Número de publicaciones por año según categoría - elaboración propia. . . . .	103
36	Número de publicaciones por año según categoría: post Abstracts - elaboración propia. . . . .	104
37	Evolución del número total de publicaciones por año - elaboración propia. . . . .	104

38	Número de publicaciones por año según categoría: clasificación final - elaboración propia. . . . .	105
39	Evolución del número total de publicaciones por año: clasificación final - elaboración propia. . . . .	105
40	Número de publicaciones por año: clasificación final - elaboración propia. . .	109
41	Evaluaciones 5S galpón - elaboración propia . . . . .	110
42	Evaluaciones 5S taller - elaboración propia . . . . .	111
43	Fragmento del seguimiento 5S realizado en el taller mecánico - elaboración propia	112
44	Fragmento de la Tabla resumen del programa 5S en el taller mecánico - elaboración propia . . . . .	112
45	Plan de Acción - elaboración propia. . . . .	113
46	Flujograma plan de acción - elaboración propia. . . . .	114
47	Gantt plan de acción - elaboración propia. . . . .	115
48	Microsoft Forms - elaboración propia . . . . .	115
49	Paso a paso - elaboración propia. . . . .	116
50	Capacitación 5S - elaboración propia. . . . .	117
51	Planilla de limpieza - elaboración propia. . . . .	118
52	Clasificación de repuestos - elaboración propia. . . . .	119
53	Demanda escenario bajo - elaboración propia. . . . .	133
54	Demanda escenario medio - elaboración propia. . . . .	134
55	Demanda escenario alto - elaboración propia. . . . .	134

## Glosario de siglas

<b>Sigla</b>	<b>Nombre</b>
VA	Actividades de valor agregado
NVA	Actividades sin valor agregado
AS	Actividades de soporte
VSM	Mapeo de la Cadena de Valor
TPM	Mantenimiento Productivo Total
SMED	Cambio de Herramientas en Minutos
SLP	Systematic Layout Planning
ARC	Activity Relation Chart
EOQ	Cantidad Económica de Pedido
P	Revisión Periódica
Q	Revisión Continua
FMEA	Análisis de modos y efectos de fallas
RPN	Índice de Prioridad de Riesgo
FTA	Árbol de fallas
K-S	Test de Kolmogorov-Smirnov
IoT	Internet de las Cosas
RLD	Distribuciones de vida útil restante
DSS	Sistemas de soporte a la decisión
SMILP	Programación estocástica de enteros mixtos lineales
SBA	Aproximación Syntetos-Boylan
TSB	Teunter-Syntetos-Babai

**Tabla 1:** Glosario de siglas utilizadas en el informe

# 1. Introducción

En el presente proyecto de grado se analizan aspectos fundamentales relacionados con la gestión de inventarios y la implementación de la metodología 5S, con el objetivo de mejorar la organización, eficiencia y control dentro de un entorno industrial.

La metodología 5S se aplicará para estandarizar y organizar el entorno laboral, asegurando un espacio de trabajo seguro, limpio y eficiente. Por otro lado, se diseñará una solución para optimizar la gestión de inventarios de repuestos críticos, abordando problemáticas como la falta de previsión en la demanda y los costos asociados a la compra de repuestos y desabastecimiento.

El problema central identificado radica en la ausencia de un sistema efectivo que permita prever la demanda de repuestos críticos en dos máquinas productivas, lo que genera incertidumbre en las adquisiciones, riesgos de exceso de stock y posibles interrupciones operativas debido a la falta de disponibilidad de piezas de repuesto. Por ello, se desarrollará un modelo de programación matemática orientado a optimizar las decisiones de compra, considerando costos de desabastecimiento, adquisición, envío, capacidad de almacenamiento, restricciones presupuestarias y tiempos de entrega. Dado que la demanda es incierta, se estima su distribución y se genera una trayectoria de demanda futura, lo que convierte al modelo en una herramienta clave para el análisis y un apoyo para la toma de decisiones informadas.

Este trabajo se desarrolla en el marco de la empresa Gerdau, una empresa brasileña con una trayectoria de 123 años, destacándose como la mayor productora de acero en Brasil y una de las principales proveedoras de aceros largos en América y de aceros especiales a nivel mundial. La empresa se encuentra presente en el sector siderúrgico uruguayo desde 1980 como Gerdau Laisa S.A.

En Uruguay, Gerdau se dedica a la producción de acero, partiendo de chatarra como materia prima y transformándola en diversos tipos de barras comerciales. Una de sus áreas productivas es la denominada Transformaciones en Frío, la cual a su vez se divide en los siguientes procesos productivos: Terminación, Mallas y Servicios Especiales. El siguiente proyecto tiene como alcance el proceso denominado Mallas, el cual comprende dos máquinas productivas: un Laminador en Frío (como se puede ver en la Figura 1) y una Máquina de Soldar (como se puede ver en la Figura 2).



**Figura 1:** Laminador - Foto tomada por los autores del trabajo



**Figura 2:** Máquina de Soldar - Foto tomada por los autores del trabajo

El Laminador, produce bobinas de alambre (como se puede ver en la Figura 3) a partir de rollos salvajes (como se puede ver en la Figura 4) El proceso consiste en pasar el alambre por una serie de rodillos que reducen progresivamente su diámetro y mejoran sus propiedades mecánicas, logrando las dimensiones y características requeridas. Las bobinas obtenidas no solo se comercializan directamente con los clientes, sino que además, son empleadas como materia prima en la Máquina de soldar para la fabricación de mallas electrosoldadas (como se puede ver en la Figura 5) tanto en paño como en rollo.



**Figura 3:** Bobinas Laminador - Foto tomada por los autores del trabajo

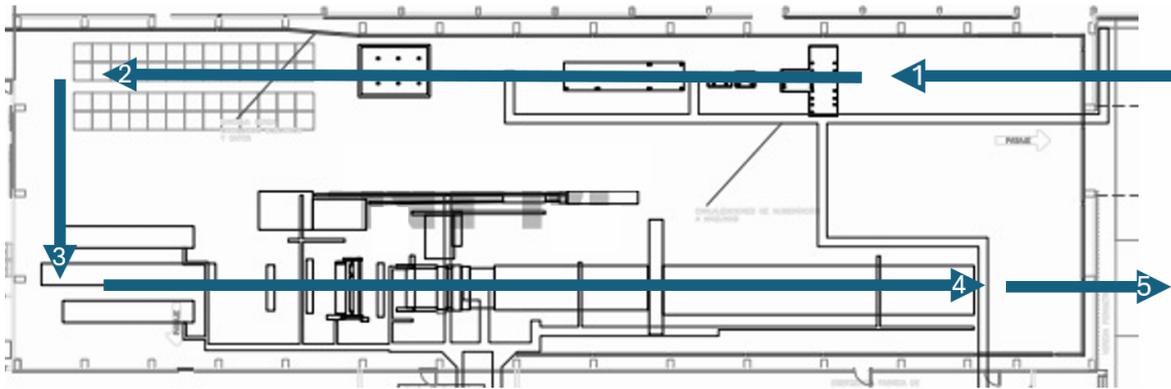


**Figura 4:** Rollos salvajes - Foto tomada por los autores del trabajo



**Figura 5:** Mallas en paño - Foto tomada por los autores del trabajo

De este modo, ambas máquinas están interrelacionadas dentro del proceso productivo y se encuentran ubicadas en un mismo espacio físico. El galpón de producción presenta una distribución en forma de “U”, diseñada para optimizar la secuencia de operaciones y el movimiento de materiales. A continuación, se detalla cada etapa del proceso, representada por las flechas numeradas en el layout que se muestra en la Figura 6:



**Figura 6:** Plano del galpón donde se encuentran las dos máquinas productivas - elaboración propia

1. Ingreso de materia prima:

El proceso comienza con la entrada de rollos salvajes provenientes de otra área de la empresa. Estos rollos, que constituyen la materia prima, se descargan y almacenan dentro del galpón, ya que no pueden estar expuestos a la humedad antes de su procesamiento. Esta zona cumple una función clave de acopio previo al primer paso productivo.

2. Laminado en frío:

Los rollos salvajes son sometidos a un proceso de laminado en frío. Esta operación tiene como objetivo mejorar las propiedades mecánicas del material y convertir los rollos en bobinas. Las bobinas generadas se almacenan temporalmente dentro del mismo galpón, conformando un stock intermedio para abastecer la siguiente etapa.

3. Carga hacia máquina de mallas:

Desde el stock de bobinas, se realiza la alimentación de la máquina de mallas. Este paso marca la transición desde la preparación del material hacia la etapa final de producción, donde se genera el producto terminado.

4. Producción de mallas:

En esta etapa, las bobinas previamente laminadas son procesadas para producir mallas electrosoldadas. El material se transforma en producto terminado a través de un proceso automatizado.

#### 5. Área de salida de producto terminado:

Las mallas electrosoldadas terminadas se acumulan en la zona de expedición ubicada al final del recorrido. Desde aquí, se organizan para su despacho y salida del galpón, cerrando así el ciclo de producción.

Además, el área de Transformaciones en Frío incluye un equipo de mantenimiento mecánico, un taller mecánico y un contenedor destinado al almacenamiento de repuestos, los cuales también fueron considerados dentro del alcance inicial del proyecto. En estas zonas se relevaron diversas oportunidades de mejora y se definieron acciones concretas para su abordaje. No obstante, debido a limitaciones de tiempo, no fue posible avanzar con su implementación durante el período de trabajo.

### 1.1. Descripción de la problemática

En este contexto, Gerdau Laisa enfrenta dos problemáticas distintas pero críticas para su eficiencia operativa: la gestión de inventarios de repuestos y la organización en las áreas de trabajo.

La gestión de inventarios presenta dificultades significativas debido a la falta de un sistema efectivo para prever la demanda de repuestos críticos. No se dispone de un mecanismo claro que permita anticipar cuándo y qué repuestos serán necesarios, por lo que actualmente, la compra de repuestos se realiza basándose en la experiencia del personal de mantenimiento, sin seguir una planificación estructurada ni un método formal, introduciendo un alto grado de subjetividad y variabilidad en el proceso. Como resultado, la empresa se enfrenta a dos riesgos principales: el exceso de stock, que aumenta los costos de almacenamiento, o la falta de disponibilidad de repuestos en momentos cruciales, lo que puede poner en riesgo la continuidad operativa.

En cuanto al exceso de stock de repuestos, no es viable almacenar todos los repuestos de una máquina por diversas razones. Mantener un inventario excesivo de repuestos implica tener capital inmovilizado. Este capital podría ser utilizado para otras inversiones productivas en la empresa, pero al estar destinado a repuestos que no se utilizan de inmediato, no genera ningún valor hasta que se necesiten. Además, almacenar una gran cantidad de repuestos también significa que se estaría acumulando un gasto innecesario en piezas que no siempre serán utilizadas, lo que resulta en una ineficiencia económica.

Otro desafío relacionado con el exceso de stock es la necesidad de un espacio físico adecuado para su almacenamiento, lo cual implica costos y esfuerzos adicionales. Si los repuestos no están correctamente organizados y etiquetados, se pueden presentar diversos problemas, como dificultades en su acceso, desconocimiento sobre las piezas disponibles o, peor aún, creer que se dispone de una pieza específica cuando en realidad no está disponible. Esto puede generar complicaciones al momento de realizar mantenimiento en las máquinas, ya que puede llevar a la compra innecesaria de repuestos que ya estaban disponibles, creando un ciclo de compras innecesarias que afecta la eficiencia operativa de la empresa.

Por otro lado, en caso de una parada no planificada y la falta de un repuesto necesario para reparar la máquina, las consecuencias pueden ser aún más graves. Una parada de producción no planificada en el Laminador no solo implica una pérdida de productividad para

la máquina en sí, sino que también interrumpe el abastecimiento a la máquina de mallas. Al no recibir material, esta podría quedar inactiva o no trabajar a su capacidad óptima, lo que lleva a una baja en la eficiencia del sistema de producción en general.

A partir de la parada del Laminador, se puede generar un déficit de inventario, lo que podría ocasionar falta de producto para cumplir con los pedidos. Esta detención afectaría no solo al proceso interno, sino también a la distribución de productos a los clientes, generando un atraso en la entrega de los pedidos. Esto afectaría la relación con los clientes y podría dañar la reputación de la empresa, ya que la demora en la entrega de productos podría llevar a insatisfacción, posibles cancelaciones de pedidos y pérdida de confianza en la capacidad de la empresa para cumplir con sus compromisos.

La máquina de mallas no produce bajo pedido, sino para mantener stock disponible, por lo que paradas no planificadas en esta máquina pueden generar quiebres de stock. Esto no solo afectaría la capacidad de producción interna, sino que, también podría generar retrasos en la entrega a los clientes que esperan esos productos específicos. El incumplimiento de los plazos de entrega puede generar que los clientes busquen alternativas en la competencia, lo que podría resultar en una pérdida de ventas y de cuota de mercado.

Además, la detención de ambas máquinas podría implicar costos adicionales en términos de mano de obra para mitigar el impacto, como horas, o incluso la destinación de recursos adicionales para intentar reactivar rápidamente las máquinas o implementar soluciones temporales. Estos costos adicionales afectarían el presupuesto de operación y podrían reducir los márgenes de ganancia, además de generar ineficiencias a largo plazo.

Un desafío adicional es que los tiempos de entrega de los repuestos importados son inciertos y prolongados. Los tiempos de entrega que manejan los proveedores son en muchos casos de al menos 60 días, ya que, las piezas no se tienen en stock, sino que se fabrican específicamente por pedido. Esto ejerce aún más presión sobre la planificación del inventario, ya que la incertidumbre en la demanda de repuestos, junto con los plazos extendidos de importación, dificulta la toma de decisiones informadas sobre la reposición de inventarios. Esta falta de predictibilidad afecta negativamente tanto los costos operativos como la capacidad de respuesta ante fallas inesperadas de equipos.

Por otro lado, Transformaciones en Frío presenta importantes deficiencias en cuanto a la organización y eficiencia de sus áreas de trabajo, especialmente en los sectores vinculados al laminado en frío y la producción de mallas electrosoldadas. Actualmente, no existe un sistema estandarizado para el orden, la limpieza ni la disposición de los elementos utilizados cotidianamente. Herramientas, insumos y repuestos se almacenan sin una lógica claramente definida, lo que provoca desorden generalizado y dificulta el acceso rápido a los recursos necesarios.

Uno de los problemas más notorios es la ausencia total de señalización visual o etiquetado en los espacios de trabajo y almacenamiento. Esto obliga a los operarios a depender de su memoria y experiencia individual para ubicar elementos clave, generando tiempos de búsqueda prolongados, pérdidas ocasionales de herramientas y, en muchos casos, la percepción errónea de que ciertos materiales no están disponibles, lo que puede derivar en compras innecesarias.

Además, se observa una acumulación de materiales que sugiere la existencia de stock innecesario o subutilizado, lo que implica no solo un uso ineficiente del espacio físico. La falta de criterios claros para la disposición de los elementos también representa un riesgo desde el punto de vista operativo y de seguridad, ya que, herramientas mal ubicadas, pasillos obstrui-

dos y zonas de trabajo desorganizadas incrementan la posibilidad de accidentes e interfieren con el flujo productivo.

Estas condiciones también impactan en el área de mantenimiento, donde la búsqueda de elementos necesarios retrasa las tareas correctivas o preventivas, generando pérdidas de tiempo que podrían evitarse con una mejor organización.

La limpieza, por su parte, no se realiza de manera periódica ni sistemática, sino solo de forma puntual y reactiva, lo que contribuye a la acumulación de residuos y al deterioro progresivo del entorno.

Ambas problemáticas, aunque distintas, afectan directamente la eficiencia operativa de la empresa, y su resolución contribuye a un entorno de trabajo más seguro, organizado y productivo, así como a una gestión más eficiente de los recursos y del inventario.

La cuantificación del problema se enfoca en la máquina de mallas, ya que es la que tiene el mayor impacto económico dentro del proceso productivo. Esta máquina no depende únicamente de su propio funcionamiento, sino también del Laminador. Convirtiéndola en un punto especialmente crítico para la operación.

En promedio, se registran unas 118 horas de parada por mes, lo que equivale a aproximadamente 5 días sin producción. Esto genera una pérdida estimada de 123 toneladas por mes, sobre una capacidad mensual de 525 toneladas, lo que representa un 23 % de pérdida de producción. Este número refleja un problema importante que afecta directamente la eficiencia y la capacidad de respuesta de la planta.

Lo más relevante es que incluso mejoras modestas en la gestión de estas paradas pueden traducirse en resultados notables. Aumentar la producción efectiva no solo reduce el costo por tonelada fabricada, sino que también amplía la capacidad de ventas, lo que a su vez incrementa el margen de utilidad.

Desde una perspectiva económica, optimizar la disponibilidad de esta máquina no solo permite una mayor entrega de producto al mercado, sino que reduce los costos asociados a la ineficiencia operativa. Menores tiempos de parada implican menos recursos desaprovechados, menor necesidad de reprogramaciones y una mejor utilización de la capacidad instalada. Además, al contar con más producción efectiva, se diluyen mejor los costos fijos del sistema, lo que mejora el rendimiento general y los márgenes operativos.

Cabe destacar que, si bien la cuantificación presentada se focaliza en los efectos económicos asociados a la gestión de inventarios, es importante aclarar que no se realizó una estimación del impacto generado por la desorganización física en las áreas de trabajo. Actualmente, la empresa no dispone de herramientas, registros ni indicadores que permitan relevar de forma precisa las pérdidas asociadas a esta problemática. A pesar de ello, se reconoce que las deficiencias en orden y limpieza afectan de forma transversal la eficiencia operativa y constituyen un área crítica que motivó el desarrollo del presente trabajo.

El resto de este informe se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que guían el desarrollo del proyecto. La Sección 3 expone el marco teórico, donde se desarrollan los conceptos fundamentales de la metodología 5S dentro del enfoque de manufactura esbelta, así como las principales herramientas y modelos aplicados a la gestión de inventarios bajo condiciones de incertidumbre. La implementación práctica de la metodología 5S se describe en la Sección 4, incluyendo diagnósticos

iniciales, planes de acción y resultados obtenidos. Posteriormente, en la Sección 5, se aborda el desarrollo del modelo de optimización aplicado a la planificación de compras de repuestos, partiendo del análisis de datos reales y culminando con la validación y análisis de sensibilidad del modelo propuesto. Finalmente, en la Sección 6, se presentan las conclusiones generales del trabajo y las recomendaciones para futuras líneas de acción en la empresa.



## 2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es mejorar la organización de las áreas de trabajo y optimizar la gestión de inventarios de repuestos críticos en el proceso de Mallas de la planta Gerdau Laisa, con el propósito de asegurar una mayor disponibilidad operativa, reducir ineficiencias y favorecer una toma de decisiones más informada y sostenible en el tiempo.

En cuanto a la organización de las áreas de trabajo, se busca contar con un diagnóstico claro del estado actual de orden y limpieza, generando información confiable que permita identificar problemáticas críticas, plantear acciones específicas para afrontarlas y sostener las mejoras alcanzadas en el tiempo. Asimismo, se persigue optimizar el uso del espacio físico en el galpón de producción, reduciendo pérdidas de tiempo y riesgos de seguridad, y garantizando un entorno laboral más seguro y eficiente.

En lo que respecta a la gestión de repuestos, el objetivo es diseñar un esquema de planificación de compras que permita anticipar necesidades, minimizar el riesgo de desabastecimiento y optimizar el uso de recursos disponibles, considerando las restricciones actuales del proceso. Finalmente, se propone validar el modelo desarrollado mediante escenarios de prueba y análisis de sensibilidad, de modo de comprobar su coherencia, estabilidad y utilidad práctica como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de inventarios.

El alcance de este proyecto se centra en el proceso de Mallas, que comprende dos máquinas productivas cuya totalidad del proceso se realiza en un único galpón. Dentro del alcance se incluye tanto el galpón donde se ejecuta el proceso productivo como el taller de mantenimiento y su almacén de repuestos, ya que este espacio actúa como nexo entre la producción y la gestión de inventarios, permitiendo abordar de manera integral la disponibilidad de repuestos críticos y su relación con la continuidad operativa de las máquinas.



## 3. Marco Teórico

### 3.1. La Metodología 5S en la Manufactura Esbelta

La manufactura esbelta, o lean manufacturing, es un enfoque que tiene como objetivo la eliminación de desperdicios en los procesos de producción. Este concepto fue introducido por Toyota en la década de 1950 y se basa en la maximización del valor agregado a través de la reducción de operaciones innecesarias o ineficientes.

En este contexto, se identifican ocho tipos de desperdicios que afectan la productividad: defectos, sobreproducción, sobreprocesamiento, espera, transporte, inventario, movimiento y talento no utilizado. La clave del enfoque lean radica en identificar y eliminar estos desperdicios en todos los niveles de la producción, lo que mejora la eficiencia, reduce costos y aumenta la competitividad de la organización.

Las actividades dentro del proceso de producción se dividen en actividades de valor agregado (VA), actividades sin valor agregado (NVA) y actividades de soporte (AS). Mientras que las actividades VA son aquellas que transforman un producto en algo por lo que el cliente está dispuesto a pagar, las NVA incrementan costos sin aportar beneficios, convirtiéndose en el principal objetivo a eliminar o reducir. Las AS, por su parte, aunque no añaden valor directamente, son necesarias para facilitar las actividades de VA. En este sentido, la metodología 5S juega un papel clave en la identificación y eliminación de actividades NVA, ya que promueve la organización, el orden y la eficiencia en el entorno de trabajo, optimizando así los procesos y reduciendo desperdicios [Shahriar et al. \[2023\]](#).

[Hafidz and Soediantono \[2022\]](#) plantean que, entre las herramientas fundamentales de la manufactura esbelta se encuentra la metodología 5S, la cual juega un papel fundamental. Desarrollada por Hiroyuki Hirano en la década de 1980, 5S es una herramienta de gestión que busca mejorar la eficiencia y la efectividad de los procesos en el lugar de trabajo, promoviendo la organización, la limpieza y la disciplina. Adicionalmente, [Shahriar et al. \[2023\]](#), destaca que el propósito de la metodología va más allá de simplemente mantener un lugar de trabajo limpio, 5S se enfoca en mejorar la eficiencia operativa, la seguridad laboral y la calidad del producto mediante un sistema disciplinado de organización y control.

La integración de herramientas como 5S con otros enfoques de manufactura esbelta, como el Mapeo de la Cadena de Valor (VSM), Mantenimiento Productivo Total (TPM) o Cambio de Herramientas en Minutos (SMED), permite lograr mejoras significativas en la eficiencia de los procesos. En particular, 5S destaca como un pilar fundamental al establecer una base sólida de organización que facilita la aplicación de técnicas más complejas. Esto se debe a que su enfoque en la eliminación del desorden, la estandarización y la disciplina operativa reduce la variabilidad en los procesos y mejora la accesibilidad de herramientas e información. Un entorno de trabajo ordenado y limpio no solo optimiza el flujo de materiales y minimiza tiempos improductivos, sino que también favorece la detección temprana de problemas en equipos y procesos, siendo estos aspectos claves para la implementación eficaz de VSM, TPM y SMED. Además, su implementación es altamente adaptable, incluso en empresas con limitados recursos financieros, permitiendo obtener resultados visibles a corto plazo, como la reducción de tiempos de búsqueda, disminución de errores y un aumento en la seguridad laboral.

## 3.2. Metodología 5S

### 3.2.1. Fases de Implementación de la Metodología 5S

Su implementación está basada en cinco principios, cada uno de los cuales corresponde a una palabra en japonés que comienza con la letra “S”: Seiri (Clasificar), Seiton (Ordenar), Seiso (Limpiar), Seiketsu (Estandarizar) y Shitsuke (Sostener). Estas fases buscan crear un lugar de trabajo organizado que incremente la seguridad, reduzca los riesgos de accidentes, mejore la calidad del producto y fomente una cultura de mejora continua [Hafidz and Soediantono \[2022\]](#).

Por su parte, [Shahriar et al. \[2023\]](#), detalla las 5s como se muestra a continuación:

#### Seiri

La primera fase, Seiri o Clasificación, se enfoca en la eliminación de elementos innecesarios en el lugar de trabajo. El objetivo es reducir el desorden y desechar aquellos materiales o herramientas que no son utilizados con frecuencia o que no aportan valor al proceso. Este paso es esencial para mejorar la eficiencia, ya que un entorno libre de elementos innecesarios permite a los trabajadores centrarse en lo que realmente importa y facilita la gestión de los recursos.

#### Seiton

El segundo paso, Seiton u Orden, tiene como objetivo organizar los elementos necesarios de manera estratégica para optimizar el tiempo y el espacio. Los objetos deben colocarse de forma que sean fácilmente accesibles y visibles, evitando la congestión en el lugar de trabajo. El uso de métodos visuales para esta organización es clave, ya que reduce el tiempo dedicado a la búsqueda de herramientas y materiales, mejorando así la eficiencia operativa.

#### Seiso

Una vez que se han eliminado los elementos innecesarios y los elementos esenciales se han organizado adecuadamente, se pasa a la fase de Seiso o Limpieza. Esta etapa busca eliminar la suciedad y los daños que puedan afectar tanto a los equipos como al entorno laboral. Además, permite detectar fallas tempranas, ya que la limpieza facilita la visualización de rajaduras, piezas flojas, pérdidas de fluido u otros desperfectos que podrían derivar en fallos más graves. También se trata de identificar y eliminar la causa raíz de los problemas relacionados con la limpieza, lo que ayuda a prevenir futuros inconvenientes y contribuye a un ambiente de trabajo más seguro y eficiente.

#### Seiketsu

El siguiente paso, Seiketsu o Estandarización, implica la creación de procedimientos y reglas claras para mantener el orden y la limpieza establecidos en las fases anteriores. La estandarización se logra a través de la creación de pautas visuales y normas de trabajo que aseguren la continuidad en la organización y limpieza. Este paso es fundamental para garantizar que los beneficios obtenidos en las fases previas no se pierdan con el tiempo, sino que se mantengan de manera constante en el día a día.

#### Shitsuke

La fase de Shitsuke o Disciplina es la que asegura la sostenibilidad del sistema 5S. En este paso, se busca crear una cultura de autodisciplina en los empleados, para que sigan aplicando los principios de 5S de manera constante. La implementación exitosa de esta fase requiere de un compromiso por parte de toda la organización, con capacitación continua y la creación de incentivos para mantener el interés y el entusiasmo por parte de los trabajadores. Shitsuke es la fase más desafiante, ya que depende de la voluntad y el comportamiento proactivo de los empleados para mantener los estándares de organización y limpieza a largo plazo.

Por su parte, [Rashindra et al. \[2023\]](#) muestra su aplicación práctica en un caso destacado en la industria del caucho, donde un diseño de planta ineficiente generaba tiempos prolongados de transporte de materiales y acumulación de desechos. A través de su implementación, se llevaron a cabo acciones concretas como la eliminación de herramientas dañadas y materiales obsoletos para liberar espacio, la delimitación visual de zonas para organizar materiales y la introducción de rutinas de limpieza regulares para mantener un entorno laboral limpio y seguro. Además, se crearon normas visuales que garantizaron la estandarización en la organización y limpieza de las áreas de trabajo, mientras que capacitaciones continuas y auditorías periódicas promovieron la disciplina necesaria para la sostenibilidad del sistema.

### **3.2.2. Impacto de la Metodología 5S en la Productividad y Cultura Organizacional**

En un entorno altamente competitivo y en constante cambio, las organizaciones se enfrentan a la necesidad de mejorar sus procesos productivos sin incrementar los costos. La implementación de las 5S contribuye significativamente a este objetivo, ya que permite a las empresas mejorar la eficiencia de sus operaciones, reducir costos y aumentar las ganancias al eliminar el desperdicio. Además, las 5S favorecen la mejora continua y son una herramienta clave dentro de sistemas más amplios de calidad total, que también incluyen estándares internacionales.

En el ámbito industrial y de manufactura, las 5S también se integran con otras estrategias de productividad verde, lo que permite no solo mejorar los procesos, sino también reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad. Así, las 5S no solo son beneficiosas para la mejora de la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a un mejor desempeño ambiental [Hafidz and Soediantono \[2022\]](#).

De [Shahriar et al. \[2023\]](#) se desprende que la implementación de 5S tiene un impacto profundo en la productividad y en la cultura organizacional. A través de la creación de un ambiente de trabajo más organizado y limpio, las empresas pueden reducir el tiempo perdido en la búsqueda de materiales, mejorar la seguridad laboral y reducir los riesgos de accidentes. Además, la estandarización de procesos contribuye a una mayor consistencia en la calidad del producto, ya que se minimizan los errores y los defectos. También se generan beneficios directos para el personal, permitiendo lograr un mejor lugar de trabajo para todos, ya que se optimiza el espacio disponible, se fomenta el orgullo por el lugar en el que se trabaja y se proyecta una mejor imagen ante los clientes, fortaleciendo la confianza y la reputación de la organización.

### **3.2.3. Implementación y Desafíos de 5S**

Aunque la metodología 5S parece sencilla en su concepto, su implementación efectiva puede ser un reto significativo para las organizaciones. La adopción exitosa de las 5S requiere no solo la implementación de las prácticas, sino también un cambio cultural dentro de la empresa. Es necesario que todas las personas, desde las que ocupan puestos operativos hasta directivos, participen activamente en el proceso, lo cual demanda capacitación continua y el desarrollo de una mentalidad orientada a la mejora continua conocida como la mentalidad Kaizen.

Sin embargo, el mayor desafío radica en la sostenibilidad de la implementación. Las 5S no deben ser vistas como un programa temporal, sino como una filosofía a largo plazo. La

estandarización de los procesos, la integración de políticas consistentes y la educación continua, son esenciales para asegurar que los beneficios de las 5S perduren en el tiempo [Hafidz and Soediantono \[2022\]](#).

Otra de las principales dificultades que plantea [Shahriar et al. \[2023\]](#) radica en la resistencia al cambio, especialmente entre colaboradores con largos años de experiencia que están acostumbrados a trabajar de una manera específica y pueden percibir el 5S como innecesario o disruptivo. Esta resistencia puede aumentar si no se proporciona una capacitación adecuada que explique claramente los objetivos, beneficios y el impacto positivo que la metodología tendrá tanto en los procesos, como en su entorno de trabajo. Como se mencionó anteriormente, la falta de comunicación efectiva y la ausencia de una cultura de trabajo en equipo, también son barreras críticas. Sin una coordinación adecuada entre los diferentes niveles de la organización, las actividades 5S pueden ejecutarse de manera inconsistente, generando confusión y resultados desiguales. Para mitigar estos desafíos, es fundamental aplicar herramientas de gestión del cambio, como programas de sensibilización y técnicas de gestión participativa, que faciliten la adopción de la metodología y fomenten el compromiso del personal en su implementación.

Aunque se considera una metodología de bajo costo, la implementación de 5S requiere otros recursos fundamentales, como tiempo, dedicación del personal y compromiso organizacional. La ausencia de estos elementos puede enlentecer o incluso detener el avance del proceso. Por último, uno de los mayores desafíos de 5S es asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

#### **3.2.4. Digitalización de 5S**

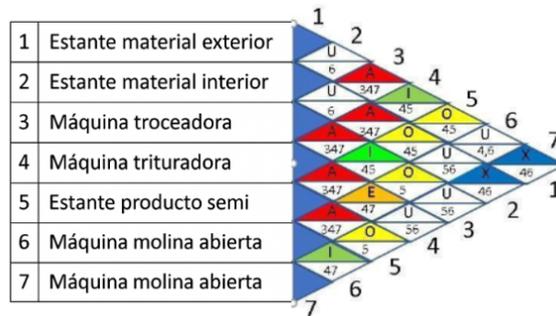
En el marco de la metodología 5S, la digitalización ha surgido como una evolución que combina los conceptos tradicionales con herramientas tecnológicas, como aplicaciones móviles y plataformas online, para optimizar la supervisión, el seguimiento y la evaluación en el lugar de trabajo. Un caso destacado es el de [Mrabti et al. \[2023\]](#), donde se implementó un sistema denominado “5S Digital”, desarrollado como una aplicación que integra varias funcionalidades para mejorar el monitoreo y la ejecución de las auditorías. Este programa permite capturar imágenes del estado inicial y final de las áreas de trabajo, asegurando una trazabilidad visual del progreso. Además, lograron centralizar toda la documentación de auditorías, planes de acción y reportes en una plataforma accesible a todos los niveles de la organización, facilitando la colaboración y el seguimiento de responsabilidades. También incluye herramientas de análisis en tiempo real, como reportes generados en Power BI que evalúan el desempeño de las áreas según indicadores específicos. La aplicación ofrece opciones para filtrar evaluaciones pendientes y completas, así como funcionalidades de cámara para documentar y comparar mejoras en el entorno laboral.

La digitalización permitió optimizar la supervisión de la gestión en planta, mejorar la transparencia en el progreso de las acciones correctivas y facilitar la detección de debilidades operativas. Estas herramientas, no sólo promovieron un entorno de trabajo organizado y eficiente, sino que también redujeron desperdicios y mejoraron el flujo de materiales e información. Sin embargo, el éxito de la digitalización en la metodología 5S, depende del nivel de madurez lean de la organización. Esto subraya la necesidad de evaluar cuidadosamente el momento adecuado para implementar herramientas digitales y priorizar las tecnologías más relevantes para las necesidades específicas de cada empresa. Aunque estas soluciones son efectivas, su adopción requiere una inversión significativa y una infraestructura tecnológica avanzada, factores que pueden no estar alineados con las capacidades o prioridades estratégi-

cas de todas las organizaciones.

### 3.2.5. Aplicación de 5S en el Diseño y Optimización de Layouts

Dado lo mencionado por [Cervantes et al. \[2023\]](#) sobre la aplicación combinada de las metodologías Systematic Layout Planning (SLP) y 5S, y el análisis de [Rashindra et al. \[2023\]](#) acerca de la integración de las 5S con el Activity Relation Chart (ARC), podemos concluir que la combinación de las 5S con herramientas de diseño de layouts es una estrategia efectiva para abordar problemas comunes, como la distribución ineficiente, la generación de desperdicios y el manejo inadecuado de materiales. Estas herramientas complementan los principios de 5S al enfocarse en la reorganización del espacio físico y la optimización de los flujos de trabajo en entornos industriales. En la Figura 7 se muestra el ARC propuesto por los autores, que ejemplifica cómo se representan las relaciones de proximidad entre áreas y su relevancia para el rediseño del layout.



**Figura 7:** ARC propuesto por los autores en [Rashindra et al. \[2023\]](#)

En detalle, el diagrama ACR muestra qué tan relacionadas están las distintas actividades del área de producción. Cada celda combina un color y una letra para indicar la importancia de la relación, el rojo significa absolutamente importante, naranja muy importante, verde importante, amarillo ordinario, blanco no importante y azul innecesario. Los números indican diferentes criterios como flujo de información, grado de supervisión, seguridad, ruido, etc. Interpretando el diagrama se puede ver qué actividades deberían estar más cerca unas de otras, lo que permite proponer diseños de layout que reduzcan distancias y hagan el flujo de materiales y tareas más eficiente.

El SLP es una metodología estructurada que facilita el rediseño de plantas industriales basándose en criterios como la proximidad funcional, el flujo de materiales, la seguridad y la reducción de tiempos de transporte. Su enfoque se centra en analizar las relaciones entre las distintas áreas de trabajo para minimizar recorridos innecesarios, giros, cruces y obstáculos. Esta herramienta ha demostrado ser especialmente útil en sectores donde la disposición física impacta directamente en la productividad y los costos operativos. En el caso mencionado en [Cervantes et al. \[2023\]](#), el SLP permitió identificar áreas críticas dentro del proceso de producción, rediseñar su layout y optimizar los recorridos, logrando reducir la distancia de manejo de materiales en un 43.77% y los tiempos de transferencia en un 8.75%.

Por otro lado, el ARC es una herramienta analítica que se utiliza para evaluar las relaciones funcionales entre áreas o procesos, asignando niveles de importancia a cada conexión. Esto facilita la toma de decisiones sobre la disposición de los espacios para garantizar un flujo más eficiente y seguro. En el caso de [Rashindra et al. \[2023\]](#), el ARC fue clave para

reorganizar las áreas del taller, lo que combinado con la metodología 5S, resultó en una reducción del 51.5% en las distancias recorridas y del 32.06% en los tiempos de transporte. La implementación de 5S en este contexto aseguró que la reorganización fuera sostenible en el tiempo mediante la eliminación de elementos innecesarios, la asignación de espacios definidos y la estandarización de procesos.

### 3.2.6. Aplicación de 5S en la Gestión de Inventarios y Almacenes

Dado lo mencionado por el estudio de [Andrade et al. \[2023\]](#) sobre la aplicación de 5S en la gestión de inventarios, se puede evidenciar como esta metodología tiene un impacto significativo en la organización y eficiencia de los almacenes. En este caso, el programa 5S se utilizó para abordar problemas comunes como la acumulación de materiales obsoletos, la falta de control en los insumos y los tiempos prolongados para localizar herramientas y productos.

La implementación de 5S permitió una transformación integral del almacén, comenzando con la eliminación de insumos vencidos y no esenciales (Seiri), seguida de la clasificación y organización visual de los materiales según su frecuencia de uso (Seiton). Estas acciones fueron acompañadas por rutinas de limpieza regulares para mantener las áreas despejadas y prevenir la contaminación (Seiso). Además, se crearon estándares claros para la ubicación y manejo de materiales, asegurando consistencia y reduciendo errores operativos (Seiketsu). Finalmente, se implementaron capacitaciones periódicas y auditorías para garantizar la sostenibilidad de las mejoras (Shitsuke).

Los resultados fueron notables, destacando una reducción del 45% en los tiempos de búsqueda de materiales y una optimización significativa del espacio disponible. Esto no solo mejoró la eficiencia operativa, sino que también contribuyó a una mejor trazabilidad y control de los inventarios, minimizando el riesgo de pérdidas y promoviendo una cultura organizacional basada en la mejora continua. Este caso demuestra que la metodología 5S es una herramienta flexible y efectiva para la gestión de inventarios, especialmente en sectores donde la organización del almacén impacta directamente en la productividad.

### 3.3. Gestión de inventarios

La gestión de inventarios es un área fundamental en la administración de operaciones, con una trayectoria significativa en aplicaciones prácticas que abarca desde los primeros trabajos en la optimización de inventarios hasta las técnicas actuales basadas en aprendizaje automático. Los primeros estudios en la materia se remontan a Harris en 1913, y si bien existen soluciones analíticas para problemas de inventario con demanda determinista y artículos individuales, la complejidad crece al manejar múltiples artículos bajo demanda incierta [Johannsmann et al. \[2022\]](#).

En el caso específico dentro de la industria, los repuestos representan un desafío único debido a su alto valor y características particulares de demanda. Entre los problemas más comunes se encuentran los largos tiempos de entrega, la escasez de espacio en los almacenes y la baja calidad de los repuestos disponibles. Estos desafíos afectan no solo la eficiencia operativa sino también la competitividad de las empresas [Babaveisi et al. \[2023\]](#).

Por lo expresado anteriormente por [Johannsmann et al. \[2022\]](#) y [Babaveisi et al. \[2023\]](#) se destaca la importancia de contar con inventarios adecuados para asegurar la disponibilidad de piezas necesarias en actividades de mantenimiento y reparación. Cuando no se cuenta con los repuestos requeridos, el sistema técnico puede quedar inactivo por más tiempo, generando

costos adicionales tanto por el envío de emergencia como por la interrupción prolongada de actividades [Dursun et al. \[2023\]](#). Sin embargo, mantener un inventario amplio de repuestos también acarrea costos significativos, incluyendo los costos de almacenamiento, el riesgo de obsolescencia y los costos de oportunidad. La predicción precisa de la demanda de repuestos se vuelve crucial para equilibrar estos costos de inventario con los costos de inactividad en el sistema [Pan et al. \[2019\]](#).

En términos generales, en su trabajo, [Campos Lopes et al. \[2019\]](#) destaca algunas características clave en un sistema de inventario: el precio de compra, los costos de mantenimiento, el costo de escasez, el ciclo de pedido o reposición (el intervalo entre dos pedidos consecutivos), el tiempo de espera (el período desde que se realiza un pedido hasta que se recibe), la frecuencia de reposición (la cantidad de veces que se repone el inventario en un período de tiempo determinado), y el horizonte de planificación. Según este autor, gestionar los niveles de inventario correctamente permite mejorar el servicio al cliente, reducir costos y acceder a descuentos por volumen. Sin embargo, el autor también identifica varias desventajas asociadas con la gestión de inventarios, que incluyen: el capital inmovilizado en inventario, lo que puede limitar la liquidez de la empresa y generar costos financieros adicionales; el riesgo de desatender problemas de calidad, ya que un exceso de inventarios puede ocultar defectos en productos o procesos. Además, una gestión de inventarios ineficiente o descoordinada puede fomentar una falta de integración en la cadena de suministro. Por ejemplo, niveles de inventario desajustados pueden causar desconexiones entre los diferentes actores de la cadena, como proveedores, fabricantes y distribuidores.

### 3.3.1. Herramientas clásicas

Para presentar las herramientas clásicas de gestión de inventarios se desarrollan conceptos esenciales basados en el libro de [Ballou \[2004\]](#). Del libro se desprende que la gestión de inventarios desempeña un papel crucial en la administración de operaciones al equilibrar el abastecimiento de materiales con los costos asociados al almacenamiento y la escasez. Estas herramientas clásicas han sido la base del desarrollo teórico y práctico en este campo, destacándose por su simplicidad y aplicación en diversos escenarios.

Los modelos de gestión de inventarios tradicionales se basan en supuestos de demanda conocida y constante. Ejemplo de esto es el modelo de la Cantidad Económica de Pedido (EOQ), que busca minimizar el costo total del inventario al balancear los costos de pedido y los costos de mantenimiento. La ecuación clásica del EOQ es:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

Donde:

- $D$ : Demanda anual, medida en  $\left[\frac{\text{unidades}}{\text{año}}\right]$ .
- $S$ : Costo fijo por pedido, medido en  $\left[\frac{\text{costo}}{\text{pedido}}\right]$ .
- $H$ : Costo de mantenimiento por unidad anual, medido en  $\left[\frac{\text{moneda}}{\text{unidad}\cdot\text{año}}\right]$ .

A pesar de su aplicabilidad, el modelo tiene limitaciones notables ya que asume una demanda constante, no considera variaciones en los tiempos de entrega y es menos efectivo para demandas intermitentes o estocásticas.

También existen Modelos de Revisión Periódica (P) y Revisión Continua (Q). En el caso del Sistema P, se evalúa el inventario en intervalos regulares y se realizan pedidos que reponen

el inventario hasta un nivel objetivo. Mientras que en el Sistema Q, los pedidos se generan cuando el nivel de inventario alcanza un punto de reorden preestablecido. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas, ya que, el sistema Q requiere monitoreo constante, mientras que el sistema P presenta mayor riesgo de fluctuaciones en los niveles de inventario.

Otras de las herramientas clásicas es la clasificación ABC, la cual se basa en el principio de Pareto 80/20 y agrupa los productos en tres categorías según su importancia:

- A: Productos de alta rotación.
- B: Productos de rotación media.
- C: Productos de baja rotación.

Esta clasificación permite aplicar políticas diferenciadas de control de inventarios, optimizando los costos al priorizar los artículos críticos.

Por otro lado, los inventarios de seguridad ayudan a manejar la incertidumbre en la demanda y los tiempos de entrega.

Cabe destacar que el uso de técnicas clásicas resulta limitado cuando no se considera la intermitencia de la demanda o la criticidad de ciertos repuestos. Esto subraya la necesidad de adoptar herramientas modernas que integren tecnologías avanzadas, como modelos estocásticos y sistemas basados en aprendizaje automático, capaces de manejar demandas inciertas y optimizar el inventario a través de predicciones precisas. Estas herramientas permiten no solo mejorar la disponibilidad de los repuestos, sino también reducir los costos asociados al almacenamiento y minimizar los riesgos de interrupción en la producción.

Adicionalmente, [El-Assal et al. \[2024\]](#), complementa las herramientas tradicionales, presentando clasificaciones adicionales.

Una de ellas es el análisis VED (Vital, Esencial, Deseable) este método clasifica los repuestos según su criticidad para las operaciones:

- Vital (V): Repuestos imprescindibles para evitar la detención de procesos. Su falta puede generar pérdidas económicas importantes.
- Esencial (E): Ítems importantes, cuya ausencia es tolerable en el corto plazo, pero debe ser atendida rápidamente para evitar problemas mayores.
- Deseable (D): Repuestos cuya ausencia genera un impacto mínimo en la operación y pueden manejarse con tiempos de reposición más extensos.

Este enfoque permite a las empresas priorizar los recursos y tomar decisiones basadas en la importancia operativa de los ítems, asegurando que los repuestos más críticos estén siempre disponibles.

A su vez, se presenta el análisis XYZ. Este modelo clasifica los inventarios según la predictibilidad de la demanda:

- X: Ítems con demanda constante y predecible, lo que facilita su planificación.
- Y: Ítems con demanda moderadamente variable, que requieren un enfoque más dinámico en su gestión.
- Z: Ítems con demanda altamente errática e impredecible, que necesitan estrategias específicas como inventarios de seguridad elevados o acuerdos flexibles con proveedores.

El análisis XYZ es útil para ajustar las estrategias de inventario basándose en la estabilidad de la demanda, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y reduciendo el riesgo de desabastecimientos en ítems críticos.

En las próximas secciones se abordarán los modelos avanzados que complementan y superan las limitaciones de estas herramientas tradicionales.

### 3.3.2. Clasificación de Modelos de Gestión de Inventarios

En esta sección, se presenta una clasificación de los modelos de gestión de inventarios utilizados para la optimización de repuestos, con base en la revisión exhaustiva de la literatura disponible, la cual se presenta en el Anexo 7.1. En las tablas 37 y 38 (las cuales se pueden observar en el Anexo 7.1.2), se agrupan los modelos según criterios clave:

- Tipo de estrategia de revisión: Se categoriza el modelo según el tipo de revisión que se emplea en el proceso de gestión de inventarios: Revisión Fija, Revisión Aleatoria o Modelo Basado en Puntos de Reorden.
- Comportamiento de la demanda: Se agrupan según si la demanda es incierta o conocida. En este estudio, hemos decidido trabajar exclusivamente con demanda incierta, ya que refleja de manera más precisa las características de los repuestos, cuya demanda está sujeta a variabilidad debido a factores como fallos en los equipos. Durante un análisis preliminar, se descartaron los modelos de demanda conocida.
- Metodología de estimación de demanda: Los modelos se distinguen según su enfoque para tratar la demanda, Métodos Paramétricos o Métodos No Paramétricos. Los métodos paramétricos suponen que la demanda sigue una distribución conocida, mientras que los métodos no paramétricos permiten mayor flexibilidad al no hacer suposiciones sobre la distribución de la demanda.

Finalmente, es importante destacar que este proyecto no contempla los modelos de gestión de ítems reparables. Se decidió enfocarse únicamente en ítems no reparables, aquellos que, una vez dañados, deben ser reemplazados por uno nuevo, con el objetivo de simplificar el modelo y evitar las complejidades asociadas a procesos de reparación, y tiempos de retorno

A continuación, se introduce la Tabla 2, la cual tiene como objetivo facilitar la interpretación del lector mediante una clasificación estructurada de los papers que abordan la demanda incierta. En cada celda se ubican los artículos correspondientes, de acuerdo con el tipo de revisión (fija, aleatoria o basado en puntos de reorden), esto permite ver rápidamente cómo cada estudio gestiona la incertidumbre en la demanda, y el enfoque del modelo (paramétrico o no paramétrico) para ver si asumen una distribución conocida con parámetros estimables o si se basan solo en los datos. Esto permite, de manera más sencilla, identificar cuáles estudios se ajustan a las condiciones del modelo y, en consecuencia, cuáles textos se deben consultar para profundizar el análisis:

	Revisión Fija	Revisión Aleatoria	Modelo basado en puntos de reorden
Métodos Paramétricos			
No Paramétricos			

**Tabla 2:** Clasificación de papers de demanda incierta

### 3.3.3. Demanda Incierta con Reposición Fija

La gestión de inventarios en entornos de demanda incierta puede ser compleja, especialmente cuando se utiliza una reposición fija, es decir, cuando las decisiones de reabastecimiento se toman a intervalos regulares, sin ajustarse a las fluctuaciones de la demanda en tiempo real. A pesar de la incertidumbre en la demanda, este enfoque de reposición periódica sigue siendo eficaz y se utiliza ampliamente en el manejo de repuestos, ya que permite simplificar la planificación sin perder el control sobre los niveles de inventario.

La demanda de repuestos es particularmente problemática, como señala [Turrini and Meissner \[2018\]](#). Esta es intermitente, lo que significa que ocurre de forma poco frecuente, con muchos períodos en los que no hay demanda. Si además el tamaño de la demanda varía significativamente cuando ocurre, se considera errática. Cuando la demanda es tanto errática como intermitente, se le llama “lumpy”. Por otro lado, la demanda que es no errática pero intermitente se denomina “slow-moving” (de baja rotación). La naturaleza estocástica de la demanda de repuestos se debe a que la mayoría de las veces esta demanda surge de fallos en equipos mecánicos o electrónicos, lo que la hace altamente impredecible y propensa a ser lumpy.

Para caracterizar esta demanda, los autores utilizan dos parámetros estadísticos fundamentales: el intervalo medio entre demandas ( $P$ ) y el coeficiente de variación al cuadrado del tamaño de la demanda ( $CV^2$ ). Un valor alto de  $P$  indica que la demanda ocurre con poca frecuencia, mientras que un  $CV^2$  elevado sugiere que la variabilidad en el tamaño de los pedidos es significativa. A partir de estos valores, se puede determinar qué tipo de distribución probabilística es más adecuada para modelar la demanda de repuestos.

Varios estudios han adoptado esta estrategia, empleando modelos estocásticos para predecir el comportamiento de la demanda. En particular, la simulación de Monte Carlo se ha utilizado ampliamente para modelar la variabilidad de la demanda de repuestos en escenarios de mantenimiento preventivo. A través de esta técnica, se generan múltiples escenarios de demanda y se optimizan los niveles de inventario, lo que permite tomar decisiones de reabastecimiento periódicas que garantizan la disponibilidad de repuestos sin necesidad de ajustar los pedidos en tiempo real [Hamed et al. \[2019\]](#).

Además, diversos estudios que emplean ajustes de distribuciones de demanda han concluido que, aunque la demanda es irregular y en algunos casos “lumpy”, el uso de distribuciones probabilísticas permite una predicción razonable de los niveles de inventario necesarios. Estos enfoques permiten que, a pesar de la incertidumbre, las decisiones de reposición periódicas se mantengan eficientes, equilibrando los costos de almacenamiento con la necesidad de disponibilidad de repuestos. A través de la optimización de las distribuciones ajustadas, es posible reducir tanto los costos de inventario como los de escasez, lo que refuerza la viabilidad de la reposición fija en escenarios con demanda incierta [Turrini and Meissner \[2018\]](#).

Por otro lado, en el modelo de [Dursun et al. \[2023\]](#), se generan señales predictivas para predecir los fallos de los componentes. Basado en esas señales, se realiza una reposición fija al inicio de cada período para asegurar que el inventario esté disponible cuando ocurra un fallo. El artículo también explora cómo la precisión de las señales y el tiempo de anticipación de las predicciones afectan los costos y la cantidad de inventario necesario. Sin embargo, aunque el sistema en este caso tiene un componente predictivo, la política de reposición es fija (en intervalos de tiempo predefinidos), lo que le permite simplificar la toma de decisiones operativas.

Por último, como menciona [Stranieri et al. \[2024\]](#), el uso de aprendizaje profundo y pro-

gramación estocástica multietapa también ha sido una mejora significativa para predecir la demanda en entornos inciertos. Aunque estos enfoques avanzados permiten obtener predicciones más precisas, el modelo de reposición fija sigue siendo una estrategia efectiva, ya que permite tomar decisiones más simples y menos costosas sin necesidad de revisar constantemente los niveles de inventario. En particular, la integración de aprendizaje por refuerzo ha demostrado ser útil para mejorar las predicciones, pero siempre dentro de un marco donde la reposición sigue siendo periódica y no reactiva a las fluctuaciones diarias de la demanda.

### **Demanda Incierta con Reposición Fija: Métodos Paramétricos**

En el contexto de la gestión de inventarios, la clasificación de modelos en paramétricos y no paramétricos responde a la necesidad de abordar diferentes niveles de incertidumbre y complejidad en la toma de decisiones. Los modelos paramétricos, que asumen que los datos siguen distribuciones específicas, permiten aprovechar herramientas analíticas para simplificar y estructurar problemas complejos. Su inclusión en este marco teórico no solo facilita la implementación en sistemas computacionales, sino que también permite abordar cuestiones fundamentales, como la optimización de costos, la mejora de los niveles de servicio y la anticipación de la demanda en escenarios inciertos. Al entender la naturaleza de los datos y las limitaciones inherentes a los métodos, se logra seleccionar estrategias adecuadas.

El modelo de simulación de Monte Carlo presentado por [Hamedi et al. \[2019\]](#) se basa en la definición previa de distribuciones probabilísticas para modelar variables inciertas como la demanda de repuestos y los tiempos de entrega. Estas distribuciones, ajustadas a partir de datos históricos, permiten que el modelo capture de manera estructurada las fluctuaciones y patrones de estas variables clave. Al utilizar parámetros como la media y la desviación estándar para caracterizar las distribuciones, Monte Carlo genera muestras aleatorias que representan escenarios posibles. Esta dependencia de parámetros estadísticos definidos previamente distingue a Monte Carlo como una técnica paramétrica, ya que asume explícitamente que los datos se ajustan a una estructura probabilística conocida.

En cada iteración, el modelo evalúa los costos asociados al almacenamiento, las faltantes y los pedidos, buscando minimizar el costo total esperado. A través de esta simulación iterativa, el modelo identifica configuraciones óptimas para parámetros clave, como el stock de seguridad y los puntos de reorden, ajustándolos a las características específicas del entorno simulado.

Un complemento valioso para la simulación de Monte Carlo en el contexto del mantenimiento preventivo es el análisis de modos y efectos de fallas (FMEA), como presentan [Afdal and Linarti \[2023\]](#). Este modelo proporciona una metodología estructurada para identificar las causas de fallas, evaluar sus riesgos y priorizar acciones correctivas. Basado en diagramas de Ishikawa, el FMEA analiza las causas de fallas desde cuatro aspectos principales: humano, método, material y máquina. Utilizando el Índice de Prioridad de Riesgo (RPN), evalúa la severidad, ocurrencia y detectabilidad de cada modo de falla, lo que permite una intervención enfocada en las áreas de mayor impacto.

El FMEA se destaca como una herramienta robusta para manejar incertidumbres y evaluar la confiabilidad de los sistemas. Comparado con métodos como el análisis de árbol de fallas (FTA), el FMEA es más adecuado para priorizar fallas sin requerir probabilidades previas, lo que lo convierte en una metodología versátil y detallada para reforzar estrategias de mantenimiento preventivo y optimización de sistemas.

Por su parte, el modelo desarrollado por [Dursun et al. \[2023\]](#) complementa el enfoque de

Monte Carlo analizado previamente al abordar la gestión de inventarios de repuestos desde una perspectiva predictiva, utilizando señales generadas por algoritmos para anticipar fallos en los componentes críticos. Este modelo se caracteriza como paramétrico ya que depende de parámetros clave, como la precisión y la sensibilidad de las predicciones para calcular políticas óptimas de reabastecimiento. Estas predicciones se integran en un marco de procesos de decisión de Markov, donde los estados representan niveles de inventario, y las transiciones entre estados dependen de las señales predictivas y de la ocurrencia de fallos reales. Este enfoque permite optimizar las decisiones de inventario para minimizar los costos totales, que incluyen costos de almacenamiento, costos por desabastecimiento y costos por envíos de emergencia.

El modelo asume que las señales predictivas no son perfectas y, por lo tanto, introduce métricas como la precisión (fracción de señales correctas sobre el total de señales) y la sensibilidad (capacidad de detectar fallos reales). Estas señales, generadas por algoritmos predictivos a partir de datos de sensores u otras fuentes, actúan como indicadores que alertan sobre posibles fallos antes de que ocurran, permitiendo anticipar demandas y planificar el mantenimiento con mayor eficacia. A través de simulaciones, [Dursun et al. \[2023\]](#) analiza el impacto de estos parámetros en los costos operativos y los niveles de inventario necesarios. Por ejemplo, muestra que una alta sensibilidad combinada con un tiempo de entrega suficiente puede reducir significativamente los costos, incluso si la precisión de las señales no es perfecta. Además, los autores destacan que, para alcanzar un equilibrio óptimo, las señales predictivas deben estar lo suficientemente cerca de la perfección, especialmente en sistemas donde la demanda es incierta y las fallas tienen un alto costo operativo.

Se puede concluir que la principal distinción entre ambos métodos radica en cómo manejan la incertidumbre. Mientras que Monte Carlo modela la variabilidad a través de distribuciones probabilísticas que generan un rango amplio de escenarios posibles, el modelo de [Dursun et al. \[2023\]](#) utiliza información específica y actualizada, derivada de señales predictivas, para anticipar y responder a eventos antes de que estos ocurran.

El modelo de [Stranieri et al. \[2024\]](#) combina aprendizaje profundo con programación estocástica multietapa para optimizar decisiones en la gestión de inventarios bajo alta incertidumbre. Es un enfoque paramétrico porque utiliza distribuciones probabilísticas conocidas para modelar la incertidumbre y ajusta parámetros en redes neuronales profundas para aprender patrones dinámicos en los datos.

A través de la programación multietapa, el modelo toma decisiones secuenciales como cantidades de producción o reabastecimiento, ajustándolas en función de información progresivamente actualizada. Las redes neuronales permiten capturar relaciones complejas entre las variables del sistema, superando las limitaciones de métodos como Monte Carlo y procesos de Markov.

Sin embargo, este modelo presenta desventajas importantes que deben considerarse. Su complejidad computacional es significativamente alta debido al uso de redes neuronales profundas y programación estocástica multietapa, lo que requiere recursos computacionales robustos y un tiempo considerable para el entrenamiento y la optimización. Además, su desempeño depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos históricos utilizados para entrenar las redes neuronales; datos insuficientes o de baja calidad pueden llevar a resultados no óptimos.

Por otro lado, el artículo de [Turrini and Meissner \[2018\]](#) propone un enfoque paramétrico basado en el ajuste de distribuciones estadísticas. Específicamente, los autores emplean pruebas de bondad de ajuste, como el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), para identificar

las distribuciones que mejor representan los datos históricos de demanda. Este modelo es paramétrico porque se fundamenta en la selección de una distribución probabilística adecuada para describir las demandas futuras y utiliza parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar para definir los niveles óptimos de inventario.

Como se mencionó anteriormente, los autores destacan que la elección de la distribución más adecuada depende de  $CV^2$  y de  $P$ . Por ejemplo, según su clasificación, cuando el valor de  $P$  es alto y  $CV^2$  es bajo, la distribución Poisson es una opción viable, ya que la demanda es poco errática. En cambio, cuando  $CV^2$  es elevado, la demanda presenta una variabilidad significativa en los tamaños de los pedidos, lo que hace que distribuciones como la binomial negativa o la Poisson compuesta sean más adecuadas para capturar el comportamiento intermitente y altamente asimétrico de la demanda de repuestos.

Para evaluar qué distribuciones se ajustan mejor a la demanda de repuestos, [Turrini and Meissner \[2018\]](#) comparan cinco distribuciones probabilísticas: la distribución Poisson, utilizada cuando la demanda es intermitente pero no altamente variable en tamaño; la distribución normal, que rara vez es adecuada debido a la asimetría de la demanda de repuestos; la distribución gamma, que se adapta a datos sesgados, aunque no siempre es la mejor opción para demandas intermitentes; la distribución binomial negativa, que se ajusta bien cuando la demanda presenta alta variabilidad, ya que permite modelar sobredispersión; y la distribución Poisson compuesta (Stuttering Poisson), una extensión de la Poisson que incorpora variabilidad adicional en los tamaños de los pedidos y que es especialmente útil para demandas “lumpy”.

Para validar sus hallazgos, los autores aplican el test clásico de (K-S), que evalúa qué tan bien una distribución teórica se ajusta a los datos empíricos. Sin embargo, dado que en la gestión de inventarios es fundamental predecir correctamente los valores más altos de la demanda para establecer niveles de stock de seguridad, los autores introducen una versión modificada del test. A diferencia del test tradicional, esta nueva versión reduce la importancia de las diferencias en la cola izquierda de la distribución y enfatiza la precisión en la cola derecha, ya que los percentiles altos (90-95 %) son los que determinan la disponibilidad de repuestos.

Este ajuste permite seleccionar distribuciones que no solo representan adecuadamente los datos históricos, sino que también optimizan la gestión de inventarios. Los resultados del estudio muestran que la binomial negativa y la Poisson compuesta son las que mejor capturan el comportamiento de la demanda de repuestos, ya que pueden modelar tanto la intermitencia como la variabilidad en los tamaños de los pedidos. A su vez, el test modificado de Kolmogorov-Smirnov permite realizar una selección más precisa en términos de impacto operativo, minimizando el riesgo de sobrealmacenamiento o desabastecimiento.

#### **3.3.4. Demanda Incierta con Revisión Aleatoria**

En escenarios donde la demanda es incierta y no puede predecirse de manera confiable mediante métodos tradicionales, emergen políticas de revisión que no se ajustan a clasificaciones convencionales. Estas estrategias, aunque no completamente aleatorias, responden a patrones de demanda caracterizados por alta variabilidad e intermitencia.

El modelo propuesto por [Johannsmann et al. \[2022\]](#) utiliza un enfoque de programación estocástica entera mixta en dos etapas para gestionar el inventario de repuestos en condiciones de demanda incierta. En la primera etapa, se seleccionan las piezas de repuesto a incluir en el almacén, basándose en una simulación de escenarios de fallo estocásticos generados a

partir de distribuciones de probabilidad de fallos de piezas. Estos escenarios representan posibles situaciones que podrían ocurrir en el futuro, permitiendo anticipar las necesidades de repuestos. En la segunda etapa, se aplica un enfoque de revisión aleatoria: una vez ocurrido el fallo, se revela el escenario real de demanda de repuestos. El modelo asigna las piezas de repuesto de manera óptima, considerando el escenario de fallo específico que se ha materializado. Aquí, la aleatoriedad entra en juego, ya que las decisiones de asignación de piezas no se basan en un patrón fijo o predecible, sino en la probabilidad de que ocurra un fallo específico dentro de los escenarios definidos. La calidad de la decisión tomada en la primera etapa se evalúa según el valor esperado de los sistemas reparados en la segunda etapa, considerando todos los posibles escenarios de fallo.

Para describir en detalle el problema, el modelo define varios parámetros clave. Entre ellos, se incluyen las tasas de fallos de cada componente, la capacidad del almacén y la criticidad de cada máquina, que determina su prioridad en caso de fallos múltiples. También se consideran probabilidades asociadas a cada escenario de fallos, lo que permite evaluar soluciones en función de la incertidumbre en la demanda.

Las variables de decisión del modelo se dividen en dos etapas. En la primera, se determina cuántas unidades de cada tipo de repuesto deben incluirse en el almacén antes de conocer los fallos reales. En la segunda etapa, una vez que se revela el escenario de fallos, se decide cómo asignar los repuestos disponibles a los sistemas dañados con el objetivo de maximizar la cantidad de máquinas reparadas.

La función objetivo del modelo busca maximizar el valor esperado de las máquinas operativas tras la asignación de repuestos. Para ello, pondera la cantidad de máquinas reparadas en cada escenario según su prioridad, asegurando que los equipos más críticos sean atendidos de manera preferencial. Además, penaliza el almacenamiento excesivo de repuestos para evitar costos innecesarios y asegurar que la solución encontrada sea eficiente en términos de recursos.

Para garantizar la viabilidad del modelo, se imponen varias restricciones. Primero, se establece un límite en la cantidad total de repuestos que pueden almacenarse, determinado por la capacidad del almacén. Segundo, se restringe la asignación de repuestos en la segunda etapa, asegurando que en cada escenario la cantidad utilizada no supere la cantidad almacenada en la primera etapa. Tercero, se impone la condición de que una máquina solo pueda considerarse reparada si todas las piezas rotas en un escenario específico pueden ser reemplazadas con los repuestos disponibles.

Además, el modelo incorpora el concepto de nivel de servicio, que mide el porcentaje de máquinas que pueden ser reparadas en los distintos escenarios evaluados. Esta métrica permite analizar el impacto de diferentes estrategias de almacenamiento en la disponibilidad operativa y ayuda a equilibrar el costo del inventario con la efectividad del mantenimiento.

Otro avance reciente en este campo es el que se desarrolla en [Shia et al. \[2022\]](#). El modelo propuesto emplea Internet de las Cosas (IoT) para predecir las distribuciones de vida útil restante (RLD) de los componentes, lo que genera escenarios de fallo que informan las decisiones de mantenimiento e inventario. A partir de los datos de los sensores IoT, el modelo anticipa los fallos de los componentes y genera escenarios probabilísticos de cuándo y cómo pueden ocurrir estos fallos. Estos escenarios informan la gestión de inventarios, optimizando la cantidad de repuestos a almacenar y la programación de las acciones de mantenimiento. El enfoque se centra en la planificación de mantenimiento preventivo y correctivo, equilibrando la disponibilidad de repuestos con la minimización de costos. A través de la integración de predicciones basadas en IoT, el modelo permite realizar una planificación más robusta, to-

mando decisiones informadas sobre la cantidad de repuestos a almacenar y cuándo realizar el mantenimiento de los equipos, todo en función de la probabilidad de fallos futuros.

Sin embargo, aunque se posicionan como herramientas modernas y sofisticadas, su implementación aún enfrenta importantes desafíos. Entre ellos, se destaca que todavía no se ha consolidado como una práctica habitual de trabajo en muchas organizaciones. Esto se debe, en parte, a la variabilidad en los patrones de fallo que pretende abordar y a la limitada disponibilidad de datos históricos confiables necesarios para optimizar su funcionamiento.

Adicionalmente, [Baisariyev et al. \[2021\]](#) introduce la implementación de sistemas de soporte a la decisión (DSS). Estos representan un avance significativo en la gestión de inventarios bajo políticas de revisión aleatoria. Estos sistemas integran otras herramientas, como el método Bootstrap (explicado más adelante), implementado en Excel mediante programación en aplicaciones de Visual Basic, proporcionando previsiones precisas ajustadas a diferentes niveles de servicio. En este artículo se demostró que el uso de un DSS permite optimizar tanto la disponibilidad como los costos operativos de repuestos críticos. Además, estos sistemas incorporan funcionalidades para clasificar la demanda, facilitando la identificación de patrones intermitentes y ajustando niveles de inventario en tiempo real, lo que los convierte en una solución eficiente en entornos dinámicos y de alta incertidumbre.

Finalmente, [Affonso et al. \[2024\]](#), presenta un modelo híbrido innovador para abordar la gestión de inventarios en contextos de demanda incierta, específicamente en escenarios donde la demanda es intermitente y altamente variable. Este enfoque combina técnicas tradicionales, como el método de Croston y sus variantes (las cuales se explicaran más adelante), con métodos heurísticos para mejorar la precisión en la representación de patrones de consumo erráticos. A través de ajustes específicos, como la optimización de los intervalos de revisión y la calibración de los parámetros de suavizado para captar mejor la variabilidad de la demanda, el modelo permite generar distribuciones más ajustadas que capturan mejor las características particulares de los datos históricos. Este modelo está diseñado para integrarse en sistemas de revisión aleatoria y responde a umbrales o eventos que desencadenan decisiones de reabastecimiento. El enfoque se muestra especialmente útil en sectores donde la demanda de repuestos no solo es difícil de prever, sino que también presenta patrones altamente concentrados en periodos específicos.

### **Demanda Incierta con Revisión Aleatoria: Métodos Paramétricos**

Como mencionamos anteriormente, el modelo de programación estocástica de enteros mixtos lineales (SMILP) desarrollado por [Johannsmann et al. \[2022\]](#) se centra en la optimización de la asignación de repuestos en escenarios donde el almacenamiento está restringido y las fallas de los componentes son inciertas. Este enfoque paramétrico utiliza distribuciones probabilísticas, como la Poisson o la exponencial, para modelar las tasas de fallo de los componentes, lo que permite generar múltiples escenarios de demanda. A partir de estas distribuciones, el modelo estima las probabilidades de fallos esperados en un horizonte de planificación definido, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.

Por otra parte, [Shia et al. \[2022\]](#), aborda la integración de decisiones de mantenimiento predictivo e inventarios de repuestos, utilizando datos generados por tecnologías IoT. Como se mencionó anteriormente, este enfoque paramétrico utiliza RLD, derivadas de datos de sensores, para modelar escenarios de fallos y optimizar tanto el mantenimiento como el aprovisionamiento de repuestos. Los parámetros clave incluyen los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, los costos de inventario y las distribuciones probabilísticas que representan los tiempos hasta el fallo.

El modelo se plantea como un problema de programación estocástica de dos etapas. En la primera etapa, se toman decisiones sobre los niveles de inventario y los tiempos óptimos de mantenimiento, utilizando distribuciones RLD para predecir posibles fallos y evaluar los costos asociados. En la segunda etapa, los fallos reales se simulan utilizando escenarios generados a partir de las distribuciones RLD, y se ajustan las decisiones previamente tomadas para maximizar la confiabilidad operativa y minimizar los costos totales. Esto incluye decisiones sobre pedidos regulares y pedidos urgentes de repuestos, considerando los tiempos de entrega y los costos diferenciados entre ambos tipos de pedido.

Una característica técnica destacada del modelo es el uso de restricciones no anticipativas, las cuales garantizan que las decisiones tomadas en la primera etapa se basen únicamente en la información disponible antes de que se conozcan los escenarios de incertidumbre. Esto asegura que el modelo sea robusto frente a la variabilidad característica de los sistemas complejos. Además, el modelo incorpora un enfoque bayesiano, lo que implica que las distribuciones de la demanda de repuestos o del estado de los componentes no son fijas, sino que se actualizan de manera continua a medida que se recopilan nuevos datos de sensores. Gracias a este mecanismo, el modelo ajusta dinámicamente las decisiones, permitiendo una gestión más precisa y adaptativa basada en la información más reciente.

Este enfoque supera las limitaciones de los modelos tradicionales, como aquellos que asumen tasas de fallo constantes o que tratan las decisiones de mantenimiento e inventario de forma separada. En comparación con el modelo de [Johannsmann et al. \[2022\]](#), que se enfoca exclusivamente en la optimización del almacenamiento de repuestos bajo restricciones de capacidad, el modelo de [Shia et al. \[2022\]](#) ofrece una solución más integrada, al considerar conjuntamente las decisiones de mantenimiento e inventario. Sin embargo, su complejidad computacional es significativamente mayor debido al uso de escenarios detallados y actualizaciones dinámicas, lo que puede restringir su aplicabilidad en sistemas con recursos tecnológicos o computacionales limitados.

### **Demanda Incierta con Revisión Aleatoria: Métodos No Paramétricos**

Los métodos no paramétricos en la gestión de inventarios y el pronóstico de demanda son estrategias que no dependen de suposiciones previas sobre la distribución de los datos. A diferencia de los métodos paramétricos, estos enfoques no requieren una modelización basada en parámetros estadísticos fijos, lo que los hace más flexibles en contextos donde las distribuciones de los datos son inciertas o variables. En lugar de ajustar datos a una distribución conocida, estos métodos trabajan directamente con las muestras disponibles.

En el ámbito de la gestión de repuestos, los métodos no paramétricos han demostrado ser útiles para manejar demandas altamente intermitentes, irregulares y de gran variabilidad. Sin embargo, debido a su naturaleza intensiva en datos y complejidad computacional, estos métodos suelen requerir un volumen significativo de datos históricos y recursos tecnológicos avanzados para su implementación. Por estas razones, aunque ofrecen ventajas en términos de flexibilidad y adaptabilidad, su adopción es menos común en comparación con los enfoques paramétricos.

[Affonso et al. \[2024\]](#) utiliza el método Bootstrap, una técnica no paramétrica de remuestreo que genera distribuciones empíricas a partir de datos históricos sin asumir una forma específica. Este enfoque, combinado con heurísticas y cadenas de Markov, permite modelar transiciones entre estados y representar la variabilidad de la demanda de forma precisa, especialmente en entornos con datos altamente esporádicos.

[Baisariyev et al. \[2021\]](#) también aplica el Bootstrap en el sector de la aviación, utilizando remuestreo para modelar demandas intermitentes y erráticas. Al no depender de distribuciones predefinidas, el modelo captura patrones de ocurrencia basados únicamente en las características de los datos observados, ofreciendo una solución robusta para demandas complejas.

### 3.3.5. Demanda Incierta con Puntos de Reorden

La implementación de puntos de reorden en sistemas de inventario con demanda incierta ofrece un enfoque práctico y eficiente para gestionar la reposición automática de repuestos críticos. Este método se basa en establecer umbrales que, al alcanzarse, activan órdenes de compra, permitiendo manejar incertidumbres en la demanda y optimizar costos sin sacrificar la disponibilidad de productos.

El artículo presentado por [Campos Lopes et al. \[2019\]](#) muestra un modelo basado en la Simulación Monte Carlo para gestionar inventarios en entornos de demanda incierta, específicamente en sistemas de revisión con puntos de reorden. Como mencionamos anteriormente, este enfoque permite analizar cómo se comportan los niveles de inventario al variar parámetros clave, como el punto de reorden, el stock de seguridad y las cantidades de pedido. A través de la simulación, se generan múltiples escenarios probabilísticos basados en distribuciones de la demanda diaria y tiempos de entrega. Esto permite evaluar el impacto de diferentes configuraciones de inventario en métricas clave como el costo total, el riesgo de desabastecimiento y la eficiencia del reabastecimiento.

El modelo integra la probabilidad de ocurrencia de escenarios extremos, como picos de demanda inesperados, para ajustar dinámicamente el punto de reorden y garantizar la disponibilidad del producto sin incurrir en costos excesivos. En el caso de estudio, este método se utilizó para optimizar el inventario de productos críticos, mostrando cómo el uso de Monte Carlo puede ir más allá de los sistemas de revisión fija para adaptarse a políticas de reposición basadas en eventos. Esto refuerza la versatilidad de la Simulación Monte Carlo como herramienta para tomar decisiones informadas en entornos complejos y altamente dinámicos.

En este contexto, se introduce el aprendizaje profundo y las técnicas avanzadas de predicción de demanda, las cuales han revolucionado la planificación estratégica de inventarios al integrar enfoques tradicionales, como el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ), con herramientas modernas de aprendizaje automático. En la industria, la utilización de modelos híbridos como redes neuronales de memoria a largo plazo y sus combinaciones con redes neuronales recurrentes y unidades recurrentes cerradas ha demostrado ser especialmente efectiva para capturar patrones de demanda complejos y altamente dinámicos. Estos modelos destacan por su capacidad para identificar tanto tendencias a largo plazo como cambios temporales en la demanda, superando significativamente en precisión a los métodos tradicionales [Sukolkit et al. \[2024\]](#).

Por otra parte, el modelo EOQ sigue siendo una herramienta fundamental en la gestión de inventarios al calcular cantidades de pedido que minimicen costos operativos, pero su integración con modelos de aprendizaje automático lo convierte en una solución mucho más robusta. Estas combinaciones permiten aprovechar las fortalezas de ambos enfoques: la simplicidad y claridad del EOQ junto con la adaptabilidad y precisión de los modelos basados en datos. Este enfoque no solo reduce riesgos asociados a faltantes y excesos, sino que también optimiza la eficiencia operativa en sectores donde los patrones de consumo son volátiles y las

demandas fluctuantes requieren decisiones rápidas y fundamentadas.

Además, las herramientas de optimización basadas en metaheurísticas, como los algoritmos genéticos, han demostrado ser altamente efectivas en la gestión de inventarios multiproducto bajo condiciones de alta incertidumbre. Estas técnicas son particularmente útiles en entornos donde los tiempos de entrega y las demandas son variables y difíciles de predecir. El estudio desarrollado en [Jackson \[2019\]](#) utilizó simulaciones de eventos discretos en combinación con algoritmos genéticos para diseñar políticas de reabastecimiento que consideran restricciones de capacidad. Este enfoque permitió identificar combinaciones cercanas a las óptimas para determinar puntos de reorden y tamaños de lote, logrando reducir tanto los costos asociados al exceso de inventario como los riesgos de desabastecimiento en sistemas complejos.

Este enfoque es especialmente adecuado para sistemas donde la disponibilidad inmediata de inventario es crítica

El modelo propuesto integra simulaciones para capturar componentes estocásticos en la demanda y los tiempos de reposición, mientras que los algoritmos genéticos ajustan dinámicamente los parámetros de inventario, como niveles de stock de seguridad y asignación de capacidad de almacenamiento.

### **Demanda Incierta con Puntos de Reorden: Métodos Paramétricos**

Los métodos paramétricos aplicados a la gestión de inventarios bajo políticas de punto de reorden se fundamentan en la modelización matemática de la incertidumbre en la demanda y los tiempos de entrega, lo que permite optimizar decisiones clave como los niveles de inventario, puntos de reorden y costos totales del sistema.

El modelo desarrollado por [Babaveisi et al. \[2023\]](#) aplica una política de reabastecimiento denominada  $(s-1, S)$ . Esta política establece que cuando el inventario desciende hasta el nivel de seguridad definido en  $s-1$  (es decir, justo antes de alcanzar el mínimo aceptable  $s$ ), se genera un pedido que repone el inventario hasta el nivel máximo  $S$ . En otras palabras, el sistema funciona con dos parámetros, un punto de pedido  $(s-1)$  y un nivel objetivo de inventario  $(S)$ . De esta forma, se evita que el inventario caiga por debajo de un nivel crítico que podría afectar la disponibilidad de repuestos, al mismo tiempo que se previene la acumulación de existencias innecesarias. El modelo es de carácter paramétrico, ya que depende de distribuciones probabilísticas ajustadas para representar la demanda y los tiempos de reparación, considerando parámetros como tasas de falla y probabilidades de tránsito entre centros. Asimismo, incorpora una linealización por tramos para resolver problemas no lineales, lo que facilita su resolución computacional bajo múltiples restricciones. En conjunto, este enfoque permite minimizar los costos totales, integrando las decisiones de inventario y mantenimiento en un marco único que captura la complejidad operativa del sistema.

Por otra parte, [Jackson \[2019\]](#) introduce un modelo que combina simulación por eventos discretos con optimización mediante algoritmos genéticos, un enfoque paramétrico que utiliza distribuciones probabilísticas para modelar la demanda y los tiempos de reabastecimiento. Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización inspirada en la evolución biológica, utilizada para encontrar soluciones eficientes a problemas complejos. En el contexto de logística e inventarios, estos algoritmos son valiosos porque permiten hallar soluciones cercanas al óptimo en problemas donde los métodos tradicionales pueden fallar o resultar demasiado costosos computacionalmente. Los parámetros de las distribuciones, como la media y la varianza, se utilizan para generar escenarios representativos de las condiciones reales. Los algoritmos

genéticos ajustan dinámicamente configuraciones como el punto de reorden y el tamaño de lote, evaluando iterativamente soluciones óptimas para reducir costos y aumentar la eficiencia del sistema. Este enfoque es particularmente efectivo en sistemas multiproducto donde las interacciones entre variables introducen una alta complejidad.

Por su parte, [Kaya et al. \[2024\]](#) utiliza métodos paramétricos como Newsvendor y Croston para optimizar la gestión de inventarios con demanda intermitente. Newsvendor se basa en distribuciones probabilísticas para determinar niveles óptimos de inventario que minimicen costos esperados considerando desabastecimientos y excedentes. Croston, por su parte, emplea parámetros como la frecuencia promedio de la demanda y el tamaño promedio del pedido, ajustando las predicciones de inventario a patrones irregulares. Este modelo depende de la estimación precisa de estos parámetros a partir de datos históricos, proporcionando soluciones específicas para productos con comportamientos de demanda no uniformes.

Adicionalmente, [Tan et al. \[2024\]](#) utiliza un enfoque de optimización multiobjetivo basado en el algoritmo del lobo gris, Multi-Objective Grey Wolf Optimizer, para gestionar inventarios multiproducto bajo demanda estocástica. Este modelo es paramétrico porque utiliza distribuciones probabilísticas para generar escenarios de demanda y tiempos de entrega, así como funciones objetivo que combinan costos de inventario, ganancias y restricciones de espacio de almacenamiento. Los parámetros probabilísticos determinan la dinámica del sistema y guían la búsqueda de soluciones óptimas en un espacio complejo de decisión. El enfoque metaheurístico permite manejar múltiples objetivos y restricciones simultáneamente, maximizando ganancias mientras se optimizan costos operativos.

Otro estudio importante es el de [Pınçe et al. \[2021\]](#), donde se revisan métodos de series temporales. El método de Croston destaca por descomponer el proceso de demanda en dos componentes: el tiempo entre demandas y el tamaño de la demanda. Este enfoque permite realizar pronósticos más precisos al tratar estas dos características de manera independiente, asumiendo que la demanda sigue una distribución predefinida, como la Poisson. Sin embargo, el método original de Croston puede presentar limitaciones en ciertos escenarios, como cuando la demanda decrece o es extremadamente intermitente.

Para abordar estas limitaciones, Syntetos y Boylan propusieron la Aproximación Syntetos-Boylan (SBA), una variante que introduce un ajuste adicional para corregir el sesgo observado en el método de Croston. Este ajuste mejora la precisión de los pronósticos al estimar más eficientemente la frecuencia y el tamaño promedio de la demanda, especialmente en series con alta variabilidad. En este modelo revisan y comparan ambos enfoques, señalando que, aunque SBA tiende a ser más precisa en datos de demanda intermitente moderada, el método de Croston sigue siendo preferible en inventarios con demandas altamente esporádicas o en escenarios de demanda decreciente. Ambos métodos comparten la característica paramétrica de partir de distribuciones conocidas y ajustar parámetros como las tasas de llegada y los tamaños promedio de pedido para calcular niveles de inventario y puntos de reorden óptimos.

Además, para gestionar productos cuya demanda tiende a desaparecer por cambios en los requerimientos operativos o tecnológicos, se desarrolló el método TSB (Teunter-Syntetos-Babai). Este método introduce un enfoque dinámico, actualizando la probabilidad de demanda en cada período, incluso cuando no se produce una demanda. Esto lo diferencia de Croston y SBA, que solo ajustan sus estimaciones tras la ocurrencia de una demanda. Gracias a esta actualización continua, TSB permite una respuesta más rápida a la disminución o desaparición de la demanda.

Los autores concluyen que la selección del modelo debe considerar factores como la es-

tabilidad de la demanda, la intermitencia y la tendencia a largo plazo (si la demanda es decreciente o desaparece). De esta forma, se recomienda Croston para casos extremos de intermitencia, SBA para demandas con variabilidad moderada y TSB para productos con demanda en declive o alta incertidumbre futura.

### **Demanda Incierta con Puntos de Reorden: Métodos No Paramétricos**

Tanto el modelo de [Sukolkit et al. \[2024\]](#) como el de [Seyedan et al. \[2023\]](#) destacan por su enfoque no paramétrico en la gestión de inventarios bajo políticas basadas en puntos de reorden, aprovechando el poder del aprendizaje profundo para manejar patrones complejos en la demanda. Ambos utilizan redes neuronales avanzadas para analizar series temporales y generar predicciones precisas de demanda, pero aplican estas técnicas en contextos distintos. En ambos casos, los métodos no requieren suposiciones sobre distribuciones de demanda, lo que les permite ajustarse dinámicamente a las características de los datos históricos, optimizando decisiones de inventario y reduciendo costos operativos en entornos de alta incertidumbre. Estas similitudes resaltan cómo los enfoques no paramétricos basados en aprendizaje profundo pueden transformarse en herramientas clave para la gestión moderna de inventarios.

Una de las principales limitaciones de estos métodos es su alta dependencia de datos históricos. Estos modelos requieren grandes volúmenes de datos para entrenar las redes neuronales y garantizar predicciones precisas. Si los datos son limitados, incompletos o de baja calidad, el rendimiento del modelo puede disminuir significativamente. Otra desventaja relevante es su complejidad computacional. Las arquitecturas avanzadas, especialmente cuando se combinan en modelos de ensamble, demandan una infraestructura tecnológica robusta, tanto en términos de procesamiento como de almacenamiento. Esto implica mayores costos y tiempos de entrenamiento.

#### **3.3.6. Mantenimiento**

La planificación conjunta de las actividades de producción y mantenimiento es crucial en la gestión moderna de inventarios. Las actividades de mantenimiento afectan aspectos importantes de la producción, como la confiabilidad, la disponibilidad y los costos operativos. Se ha demostrado que un programa de mantenimiento ineficiente puede incrementar los costos hasta en un tercio debido a actividades innecesarias o inadecuadas [Gordon and Mannan \[2018\]](#).

Este impacto se agudiza en los sistemas de manufactura modernos, el mantenimiento desempeña un gran papel debido a la creciente automatización y mecanización. Según [Hwang and Samat \[2019\]](#), la integración de la gestión de mantenimiento con la planificación de la producción y el manejo de inventarios de repuestos es esencial para minimizar costos y optimizar el desempeño operativo. Como se menciona anteriormente, la falta de mantenimiento adecuado puede generar costos significativos, como tiempos de inactividad prolongados, penalizaciones por entregas tardías, costos no planificados y pérdida de ventas.

Las estrategias de mantenimiento se clasifican en tres categorías principales:

- **Mantenimiento correctivo:** este tipo de mantenimiento se realiza cuando un activo falla inesperadamente. Aunque puede ser apropiado en ciertos casos (como equipos de baja criticidad), su naturaleza reactiva puede generar costos elevados debido a interrupciones en la producción y retrasos causados por la falta de recursos.
- **Mantenimiento preventivo:** este tipo de mantenimiento se planifica en intervalos regulares basándose en datos de fallos históricos o recomendaciones del fabricante. Si bien

reduce la probabilidad de fallos inesperados y mejora la disponibilidad del sistema, puede ser costoso debido al consumo elevado de repuestos y al riesgo de mantenimiento excesivo.

- Mantenimiento predictivo: utiliza tecnologías avanzadas, como sensores y software de diagnóstico, para monitorear variables clave (vibración, temperatura, presión, etc.) y realizar mantenimiento solo cuando las condiciones del equipo superan ciertos umbrales. Aunque este enfoque es más eficiente en términos de optimización de recursos, requiere tecnologías de alto costo y personal especializado.

La investigación destaca que el mantenimiento no debe planificarse de manera aislada. La integración con la gestión de inventarios de repuestos es fundamental, ya que una escasez de piezas puede retrasar las tareas de mantenimiento, incrementando el tiempo de inactividad y los costos asociados. Por otro lado, el almacenamiento excesivo de repuestos genera costos elevados de mantenimiento de inventarios y almacenamiento.

[Muttaqin and Damayanti \[2018\]](#) refuerzan este argumento al subrayar que la optimización conjunta de inventarios y mantenimiento preventivo es clave para reducir costos operativos totales. Este enfoque aborda desafíos como la incertidumbre en la demanda de repuestos y los tiempos de falla, considerando tanto costos de mantenimiento (inspecciones, reparaciones, reemplazos) como costos de inventario (almacenamiento, obsolescencia y desabastecimiento).



## 4. Metodología 5S

Para comenzar a desarrollar el plan enfocado en 5S en Gerdau Laisa, fue fundamental realizar un diagnóstico inicial que permitiera conocer el estado del galpón donde se desarrollan los procesos productivos y del taller de mantenimiento en relación con la metodología 5S. Para ello, se elaboraron dos formularios de evaluación específicos para cada sector en donde se identificaron distintos aspectos clave a relevar dentro de cada principio de las 5S.

Los ítems seleccionados para la evaluación fueron definidos a partir de la experiencia, así como del intercambio de conocimientos en una serie de reuniones con una Técnica Previsionista. Además, se consideró el aporte de un miembro del equipo de proyecto que se desempeña en Gerdau, específicamente en las áreas involucradas en el alcance del estudio. Esta combinación de perspectivas aseguró un enfoque alineado con la realidad operativa de los espacios analizados.

El diagnóstico inicial nos brindó una medición objetiva del punto de partida. Sin este, cualquier esfuerzo de mejora carecería de referencia, lo que dificultaría la determinación de avances concretos y la identificación de áreas críticas que requieren intervención.

Los formularios se estructuraron de manera que cada ítem de evaluación estuviera claramente definido, asignándole una categoría correspondiente a una de las cinco S. Se estableció una escala del 1 al 5 para calificar cada aspecto relevado. Con el objetivo de eliminar subjetividades y garantizar una evaluación uniforme, en los valores extremos de la escala (1 y 5) se incluyó una descripción detallada de lo que representa cada nivel. Una calificación de 1 indicaba el incumplimiento total del criterio evaluado, reflejando una situación que requería intervención inmediata. En el otro extremo, una calificación de 5 representaba un cumplimiento óptimo y sostenido en el tiempo, evidenciando la correcta implementación del principio evaluado. Los formularios se pueden observar en las Figuras 41 y 42 en el Anexo 7.2.

La evaluación inicial fue realizada por un analista de Transformaciones en Frío, quien estuvo acompañado en cada sector por un trabajador con experiencia en el área evaluada. En el caso del galpón, se contó con la participación de un operario de una de las máquinas productivas, mientras que en el taller, el acompañante fue un integrante del equipo de mantenimiento que desempeña sus tareas en ese espacio. Para el relevamiento, se utilizó el formulario impreso previamente diseñado, en el que se fueron leyendo y analizando cada ítem, identificando su correspondencia con la realidad observada y asignando en simultáneo un puntaje de acuerdo con los lineamientos establecidos. Una vez completada la evaluación en papel, los datos fueron transferidos al formulario en formato digital, lo que permitió estructurar y analizar la información de manera sencilla y precisa.

En la fase de Clasificación, por ejemplo, se analizaron aspectos como el uso adecuado de herramientas, repuestos e insumos, la existencia de cantidades mínimas y máximas definidas y el correcto almacenamiento de los materiales en su lugar correspondiente. En el caso de Orden, se evaluó si los equipos y herramientas tenían ubicaciones específicas correctamente identificadas, si no había equipos encendidos sin necesidad, si los residuos se gestionaban de manera adecuada, entre otros. Seguir este enfoque para las cinco S, permitió obtener un diagnóstico detallado y cuantificable del estado inicial de la planta, sirviendo como base para la implementación de mejoras y la posterior verificación de los avances logrados con la metodología 5S.

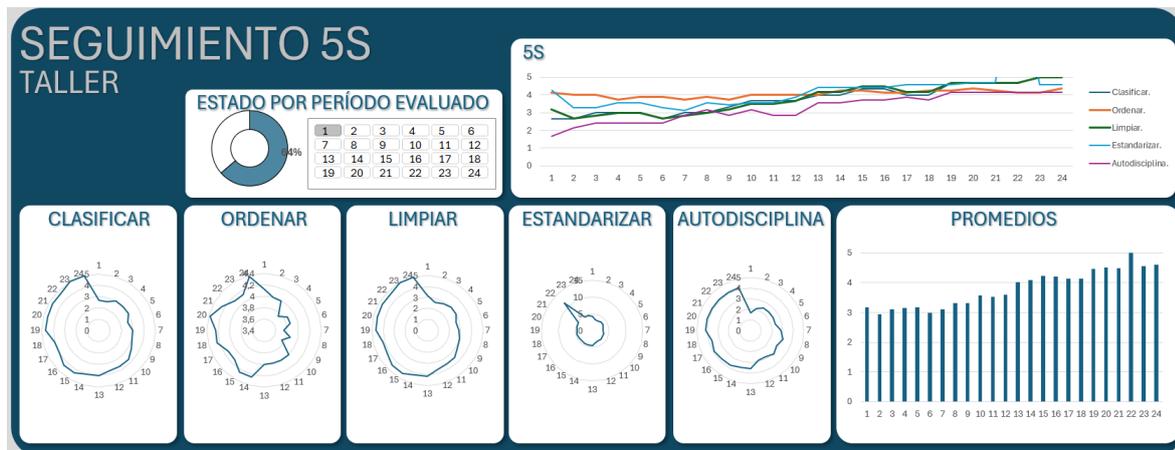
La evaluación se lleva a cabo con una periodicidad quincenal, lo que permite un monitoreo continuo de la evolución del programa y la implementación de medidas correctivas cuando

sea necesario. Para ello, se utiliza una planilla de seguimiento en la que se registran las calificaciones asignadas a cada ítem evaluado, obteniendo así un puntaje total para cada una de las cinco S. En la Figura 43 del Anexo 7.2 se presenta un fragmento ilustrativo del formato aplicado para este registro en el taller mecánico.

Además, la última columna de cada fila incluye una representación gráfica lineal, lo que permite visualizar la evolución de cada ítem a lo largo del tiempo. Asimismo, se incorporan métricas clave, como el total y el promedio de las puntuaciones en cada evaluación. Estas métricas facilitan el análisis de tendencias y permiten evaluar el grado de alineación con los estándares establecidos, brindando una referencia objetiva para la toma de decisiones y la mejora continua del programa.

Estos valores se consolidan posteriormente en una tabla resumen, en la que se visualizan los puntajes obtenidos para cada S en cada período de evaluación, junto con métricas agregadas como el puntaje total redondeado y el porcentaje acumulado de avance. La Figura 44 del Anexo 7.2 muestra un ejemplo parcial de esta tabla.

Para facilitar el análisis y la interpretación de estos datos, se incorporaron gráficos que permiten visualizar de manera clara y rápida el avance del programa, identificando tendencias y áreas de mejora. De este modo, se busca asegurar una implementación efectiva y sostenida de la metodología 5S en la planta. Se puede observar en la Figura 8 un ejemplo con resultados generados al azar para facilitar la comprensión de los gráficos.



**Figura 8:** Gráficos seguimiento taller de auditorías según check list a modo de ejemplo - elaboración propia.

Los gráficos presentados en el tablero de seguimiento del programa 5S cumplen una función clave en la evaluación y monitoreo del desempeño de la implementación de 5S. Su estructura permite analizar el avance de cada principio a lo largo del tiempo, detectar áreas de oportunidad y optimizar el proceso de mejora continua.

El gráfico de anillo representa el avance general del programa en términos porcentuales, reflejando el grado de cumplimiento alcanzado hasta el momento. Esta visualización permite evaluar, de manera rápida y clara, cuánto se ha avanzado en la implementación de las 5S y qué porcentaje resta para alcanzar el estándar ideal. Dado que la meta es lograr un cumplimiento del 100 %, este gráfico facilita la identificación de brechas en la ejecución y el establecimiento de estrategias para acortar esas diferencias.

Los gráficos de radar, asignados individualmente a cada una de las cinco S, permiten una evaluación detallada de su desempeño a lo largo de los períodos de medición. A través de estas representaciones, es posible identificar si algún principio está experimentando una mejora sostenida o, por el contrario, si se ha estancado o presenta retrocesos. Esto posibilita la asignación eficiente de recursos y esfuerzos hacia aquellos principios que requieren mayor atención.

El gráfico de líneas comparativo proporciona una visión integral del comportamiento de cada una de las 5S en términos de valores promedio. Esta representación permite determinar cuáles de los principios han sido implementados con mayor éxito y cuáles aún presentan dificultades. Además, posibilita la identificación de tendencias y patrones en la evolución del programa, lo que resulta fundamental para ajustar estrategias y reforzar aquellos sentidos que presenten menor progreso.

Finalmente, el gráfico de promedios generales consolida el desempeño del programa en cada período evaluado, permitiendo analizar la evolución global de la implementación de las 5S. Este indicador ofrece una referencia clara del impacto de las acciones de mejora y permite validar si las estrategias adoptadas están logrando los resultados esperados.

#### **4.1. Análisis primera evaluación**

Al realizar la primera evaluación del programa 5S en el galpón, notamos un estado inicial en el que aún hay oportunidades significativas de mejora en todas las áreas evaluadas. En la evaluación inicial del galpón en el sentido Clasificar, los puntajes obtenidos reflejan que existen herramientas, repuestos e insumos fuera de su ubicación adecuada o en cantidades que no han sido claramente definidas. Esto sugiere la necesidad de establecer criterios más estrictos para determinar qué elementos deben permanecer en el área de trabajo y cuáles deben ser descartados o reubicados, asegurando así un entorno más organizado y eficiente.

El puntaje promedio obtenido fue de 1,7 sobre un máximo de 5, lo que indica que aún hay un margen significativo de mejora. Esta situación genera desorganización, dificultades para encontrar herramientas cuando se necesitan y, en consecuencia, afecta la productividad.

En la dimensión Ordenar, si bien algunos aspectos, como la disposición adecuada de los residuos, presentan valores satisfactorios, persisten deficiencias significativas en la organización de los equipos, herramientas y repuestos. Se evidencia la falta de un sistema de almacenamiento claramente identificado, lo que dificulta el acceso y uso eficiente de los recursos. Además, no se está cumpliendo con la devolución de herramientas y equipos a su ubicación correspondiente después de cada tarea, lo que contribuye a una disposición desorganizada del espacio de trabajo.

Asimismo, se detecta que las áreas destinadas al almacenamiento de material no conforme y stock de insumos no están debidamente demarcadas, lo que puede generar confusión y errores en su manipulación. A esto se suma que el espacio de almacenamiento resulta insuficiente o mal definido, afectando la eficiencia operativa y generando pérdidas de tiempo en la búsqueda de herramientas y materiales.

El puntaje promedio obtenido en esta evaluación fue de 2,9, lo que refleja oportunidades de mejora en la estructura organizativa del área.

En la evaluación del sentido Limpiar, los resultados reflejan deficiencias significativas en la limpieza y mantenimiento del área de trabajo. Se observa que, si bien las máquinas pro-

ductivas no presentan pérdidas severas de insumos como aceite, agua o aire, el estado de limpieza general de la zona es deficiente. Esto se evidencia en la baja puntuación obtenida en ítems clave, como la conservación de equipos, herramientas y repuestos, así como la limpieza general del entorno de trabajo, lo que indica la presencia de suciedad acumulada en pisos, paredes, techos, mesas y carteles.

Además, se identifica una falta de estructura en la gestión de la limpieza. No están claramente definidas las personas responsables de esta tarea, ni se han establecido períodos regulares para su ejecución, lo que puede llevar a una acumulación progresiva de suciedad y desorden. Asimismo, aunque existen equipos de limpieza disponibles, su correcta utilización no parece estar garantizada, lo que podría estar afectando la eficacia de las labores de mantenimiento.

El puntaje promedio obtenido en esta evaluación fue de 1,8, reflejando un nivel bajo de cumplimiento en este aspecto de la metodología 5S.

En la evaluación del sentido Estandarizar, se observa que existen procedimientos establecidos para mantener el orden y la seguridad dentro del área de trabajo. Sin embargo, aunque algunos aspectos como la iluminación y los elementos de seguridad presentan un cumplimiento adecuado, otros muestran oportunidades de mejora. El valor promedio obtenido fue de 3,5. El aspecto más relevante dentro de la evaluación de Estandarizar es el cumplimiento de las normas de seguridad, ya que constituye un punto crítico para la empresa y recibe una atención prioritaria desde la gestión corporativa.

Finalmente, Autodisciplina obtuvo los valores más bajos, lo que indica que no hay una cultura consolidada de respeto por las normas 5S ni un compromiso sostenido por parte del equipo para mantener las mejoras implementadas. Con un puntaje de 1,3, esta S representa el mayor desafío, ya que sin hábitos arraigados, las mejoras en los demás sentidos pueden perderse con el tiempo.

La primera evaluación del programa 5S obtuvo un total de 11 puntos sobre 25, reflejando un avance del 44% en la implementación. Estos resultados establecen una línea base que permitirá medir avances en futuras evaluaciones, con el objetivo de alcanzar el 100% de cumplimiento, lo que significaría que cada ítem evaluado logre la máxima calificación.

Se realizó una evaluación similar a la del galpón, pero aplicada al taller, con el objetivo de analizar el estado de implementación del programa 5S en este espacio de trabajo. En términos generales, los resultados reflejan un nivel de cumplimiento más alto en comparación con el galpón, alcanzando un avance del 60%. Se observó un desempeño positivo en Ordenar y Estandarizar, con prácticas organizativas establecidas y una adecuada gestión de la seguridad. Sin embargo, en Clasificar, Limpiar y Autodisciplina se identificaron oportunidades de mejora, especialmente en la definición de criterios de almacenamiento, la planificación de la limpieza y el compromiso sostenido del personal con la metodología.

En comparación con el galpón, el taller mostró una mejor implementación en Clasificar, con un uso más eficiente de herramientas y repuestos, aunque aún persisten falencias en la definición de cantidades mínimas y máximas, lo que puede afectar la gestión del stock.

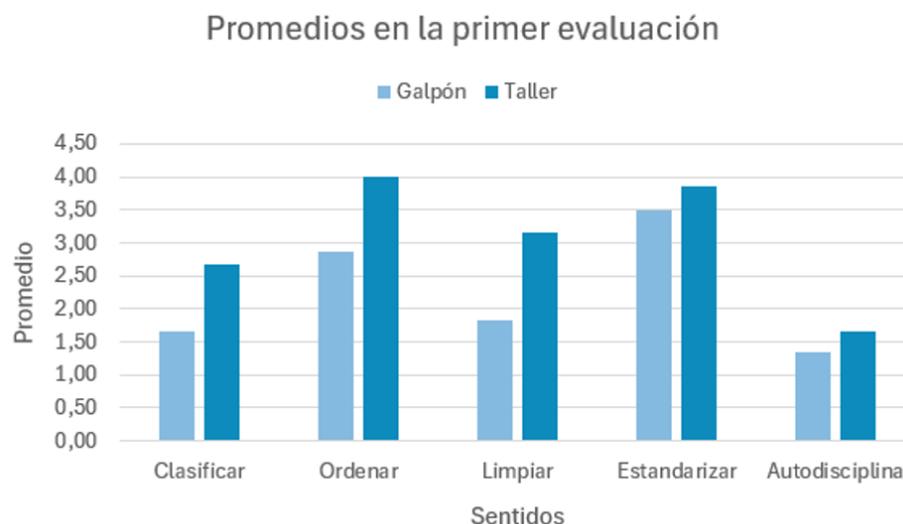
En Ordenar, el desempeño fue notablemente superior, reflejando un entorno más estructurado y con hábitos de almacenamiento más consolidados. No obstante, la correcta devolución de herramientas y equipos sigue siendo un punto a reforzar para evitar pérdidas de tiempo y desorganización.

El sentido Limpiar presentó mejores resultados en el taller debido a la disponibilidad de equipos adecuados, aunque, al igual que en el galpón, la falta de planificación y asignación de responsabilidades limita la efectividad de las tareas de limpieza, impidiendo su mantenimiento a largo plazo.

En Estandarizar, ambos espacios mostraron resultados similares, destacándose la correcta gestión de la seguridad y la existencia de procedimientos definidos. Sin embargo, sigue siendo necesario optimizar la señalización y mejorar la actualización de la documentación disponible.

Como se puede observar en la Figura 9, el sentido de Estandarizar presenta un puntaje relativamente alto, lo cual no es común en este tipo de diagnósticos. Este resultado sugiere que ya existen normas y procedimientos establecidos en el área evaluada. Sin embargo, el hecho de que algunos aspectos, como la señalización de sectores y placares, tengan puntajes más bajos indica que estos estándares no se cumplen de manera uniforme en la operativa diaria. Para corregir esta situación, es fundamental capacitar al personal sobre la importancia de respetar y aplicar los estándares definidos, asegurando su cumplimiento en todos los aspectos.

Por último, Autodisciplina fue la dimensión con menor puntaje en ambas áreas, evidenciando la falta de una cultura consolidada de 5S. La ausencia de controles regulares y el bajo nivel de compromiso del personal dificultan la sostenibilidad de las mejoras implementadas, lo que representa el principal desafío para la consolidación del programa.



**Figura 9:** Primer evaluación - promedio por sentido - elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos en la primera evaluación, se diseñó un plan de acción orientado a abordar las áreas críticas identificadas y fortalecer los aspectos con menor grado de cumplimiento. Esta etapa permite transformar el diagnóstico inicial en medidas concretas. De esta forma, la primera evaluación se emplea como un punto de partida estratégico para la optimización continua del entorno de trabajo, asegurando que las mejoras implementadas sean progresivas, medibles y alineadas con los objetivos del programa.

## 4.2. Plan de acción

A partir del formulario inicial, se estableció un criterio de clasificación basado en la asignación de colores según los puntajes obtenidos en cada ítem evaluado. Los valores 1 y 2 fueron marcados en rojo, indicando aspectos críticos que requieren una intervención inmediata. El puntaje 3 se representó en amarillo, señalando oportunidades de mejora, mientras que los valores 4 y 5 fueron identificados en verde, reflejando condiciones adecuadas que no requieren acciones urgentes. Con este enfoque, se priorizaron los ítems críticos para su resolución. Dado el alcance del proyecto, el plan de acción se centró en las primeras tres “S” (clasificación, orden y limpieza) y abordó exclusivamente los aspectos que habían sido categorizados en rojo, garantizando así una intervención eficaz en las áreas más problemáticas.

La estructura utilizada en el plan de acción sigue el enfoque del método 5W1H, una técnica de análisis y planificación que permite organizar la información de manera clara y estructurada para facilitar la ejecución de tareas (Ver Figura 45 en el Anexo 7.2). Este método se basa en responder seis preguntas fundamentales: qué se debe hacer (What), por qué es necesario (Why), quién es responsable de ejecutarlo (Who), cuándo debe realizarse (When), dónde se llevará a cabo (Where) y cómo se implementará (How). Sin embargo, en este caso no se incluyó explícitamente la pregunta “Por qué” (Why), ya que la necesidad de cada acción quedó determinada previamente en el diagnóstico realizado a través del formulario inicial. En lugar de justificar cada tarea dentro del plan, se optó por enfocarse directamente en qué acciones eran necesarias, cómo debían ejecutarse, quién debía realizarlas, cuándo se llevarían a cabo y dónde se aplicarían, priorizando la resolución efectiva de los problemas identificados.

El plan de acción fue diseñado de manera secuencial, de modo que cada actividad contribuye al desarrollo de la siguiente, asegurando un flujo ordenado en la implementación. Se parte de una etapa de diagnóstico y relevamiento, seguida por la implementación de mejoras organizativas y finalizando con acciones de mantenimiento y control.

Con el objetivo de organizar de manera más clara y eficiente la ejecución del plan de acción, se elaboró un flujograma y un diagrama de Gantt. El flujograma permite visualizar de forma secuencial las actividades propuestas, facilitando la comprensión del proceso completo y la identificación de dependencias entre tareas. Por su parte, el diagrama de Gantt brinda una representación temporal de las actividades, ayudando a coordinar los tiempos de ejecución y realizar un seguimiento del avance del proyecto. Ambos elementos complementan la planificación descrita en esta sección y pueden encontrarse en el Anexo 7.2, en las Figuras 46 y 47, respectivamente.

En primer lugar, se ejecutará la fase de clasificación, que comenzará con un inventario detallado para identificar y registrar los repuestos disponibles junto con su estado. Esto permite evaluar la frecuencia de uso de cada repuesto y determinar qué materiales son esenciales y cuáles no se utilizan regularmente. A partir de esta información, se definirá el destino de los repuestos en desuso, evaluando si podrán ser redistribuidos, almacenados en sectores secundarios o descartados.

Una vez clasificados los repuestos, se procederá a la definición de stock mínimo y máximo para aquellos considerados críticos. Para ello, se revisará el historial de uso y consumo de cada repuesto y se consultará a operarios y técnicos sobre necesidades específicas. Con estos datos, se establecerán cantidades mínimas y máximas en la lista de inventario, garantizando que los repuestos esenciales estén siempre disponibles sin generar acumulaciones innecesarias. Paralelamente, se implementará el registro de cantidades disponibles y consumos en un sistema digital, lo que permitirá monitorear en tiempo real la disponibilidad de los repuestos.

Luego se avanzará en la fase de orden, estableciendo criterios para mejorar la disposición de los materiales según su frecuencia de uso. Esto permitirá que los repuestos más utilizados sean fácilmente accesibles, optimizando los tiempos de búsqueda y minimizando interrupciones en las operaciones. Además, se evaluará la necesidad de nuevos espacios de almacenamiento para garantizar una disposición adecuada y evitar desorden.

En la fase de limpieza, se asignarán responsables para cada área con el fin de garantizar el mantenimiento del orden y se establecerán rutinas de limpieza periódicas. A su vez, se identificarán y señalarán los tachos de basura con etiquetas claras que indicarán el tipo de residuo correspondiente, además de designar responsables para su vaciado regular y supervisar el cumplimiento de estas tareas.

### **4.3. Ejecución plan de acción**

En primer lugar, se realizó el formulario de Microsoft Forms, el cual se puede ver en la Figura 48 del Anexo 7.2, con el propósito de registrar y gestionar el inventario de repuestos, herramientas e insumos disponibles en el galpón productivo. Su diseño busca facilitar la recopilación de información sobre los elementos ubicados en las proximidades de las máquinas, permitiendo un control más eficiente de los recursos.

El formulario comienza solicitando el nombre del elemento, lo que permite su identificación dentro del inventario. Luego, se establece una clasificación en tres categorías: herramienta, repuesto, insumo u otro, con el fin de diferenciar los tipos de elementos registrados. Además, se requiere que el trabajador indique la cantidad disponible, asegurando que el inventario refleje el stock real en el galpón.

Para mejorar la trazabilidad, se incluyó un campo destinado al código SAP del elemento, permitiendo su vinculación con el sistema de gestión. En caso de que el ítem no cuente con un código SAP, se consulta si el trabajador considera necesario que tenga uno, lo que facilita la estandarización y control de los recursos.

Otro aspecto importante del formulario es la ubicación del elemento dentro del galpón. Se ofrecen opciones predefinidas de almacenamiento, como muebles o estantes específicos, lo que permite conocer con exactitud dónde se encuentra cada ítem.

Además, se incorporó una evaluación del estado del elemento, clasificándolo en tres categorías. Un estado bueno indica que el ítem puede seguir utilizándose sin inconvenientes. Un estado medio sugiere que el elemento debe ser evaluado para determinar si necesita reparación o mantenimiento. Un estado malo señala que el ítem debe ser desechado o reemplazado.

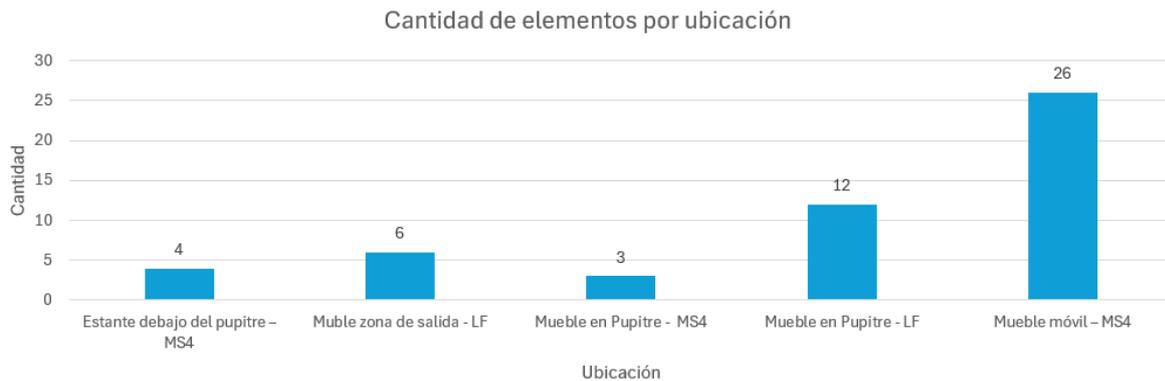
Finalmente, se incluyó una pregunta sobre la frecuencia de uso del elemento, permitiendo seleccionar entre opciones como diario, semanal, mensual o mayor a un mes. Esta información es relevante para priorizar el control, reabastecimiento de los elementos más utilizados y posterior disposición.

A medida que los trabajadores completan el formulario, toda la información ingresada se almacena automáticamente en una planilla de Excel. Este archivo permite visualizar y analizar la información en tiempo real.

Para la ejecución del relevamiento y alimentación del formulario de Microsoft Forms, el

facilitador del área en conjunto con operadores referentes de cada una de las máquinas, llevaron a cabo un inventario detallado que permitió registrar todos los elementos presentes en el área de trabajo, junto con su ubicación específica. Previo a esta tarea, se identificaron cinco zonas diferenciadas de almacenamiento: el mueble móvil ubicado en la zona de la máquina de mallas, el mueble cerca del pupitre del Laminador en Frío, el mueble en la zona de salida también del Laminador, el estante debajo del pupitre de la máquina de mallas y un mueble adicional en el pupitre de la misma zona.

Como se puede observar en la Figura 10, el mayor volumen de repuestos se halló en el mueble móvil de la máquina de mallas, donde se contabilizaron 26 elementos. Le siguió el mueble del pupitre del Laminador, con un total de 12 elementos. Las otras tres ubicaciones presentaron una menor concentración, con 3, 4 y 6 elementos. Este relevamiento permitió obtener una visión clara de la distribución física del inventario dentro del galpón, constituyendo una base fundamental para analizar la utilidad y necesidad de cada ítem. A partir de esta información, se evaluó qué elementos resultaban esenciales para el funcionamiento cotidiano, y cuáles podrían ser redistribuidos, trasladados a zonas secundarias o descartados, en función de su estado y frecuencia de uso.



**Figura 10:** Cantidad de elementos por ubicación - elaboración propia.

Además del relevamiento por ubicación, se efectuó una evaluación del estado de los elementos asociados a las dos máquinas principales del área como se puede ver en las Figuras 11 y 12. En el caso de la máquina de mallas, se registraron 33 elementos, de los cuales 32 estaban en buen estado y uno en estado medio, indicando que deberá ser reemplazado a mediano plazo. Para el laminador, se relevaron 18 elementos, 17 de ellos en buen estado y uno en estado medio. En ninguno de los casos se encontraron ítems en mal estado u obsoletos, lo que evidencia una adecuada conservación de los recursos disponibles y una gestión responsable del inventario.

Cantidad de elementos por estado en la máquina de mallas



**Figura 11:** Cantidad de elementos por estado en la máquina de mallas - elaboración propia.

Cantidad de elementos por estado en el Laminador en Frío

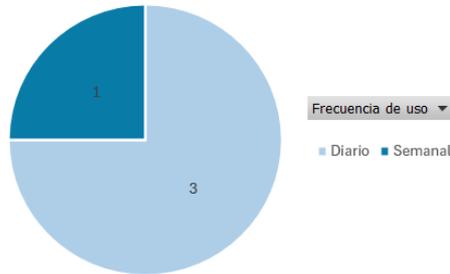


**Figura 12:** Cantidad de elementos por estado en el Laminador en Frío - elaboración propia.

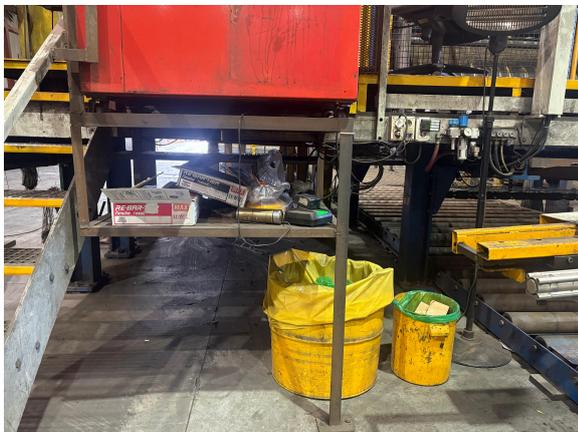
Al analizar en detalle cada una de las zonas de almacenamiento, se obtuvieron los siguientes resultados:

En el estante debajo del pupitre de la MS4, se relevaron cuatro elementos con frecuencias de uso diaria y semanal como se observa en la Figura 13. Se determinó que su permanencia en dicha ubicación está plenamente justificada por su cercanía al puesto de trabajo. No obstante, se identificaron oportunidades de mejora en cuanto al orden interno, lo que podría optimizar los tiempos de acceso y favorecer la estandarización del espacio. A continuación, en las Figuras 14 y 15, se muestran imágenes comparativas del estado del estante antes y después de implementar las mejoras propuestas.

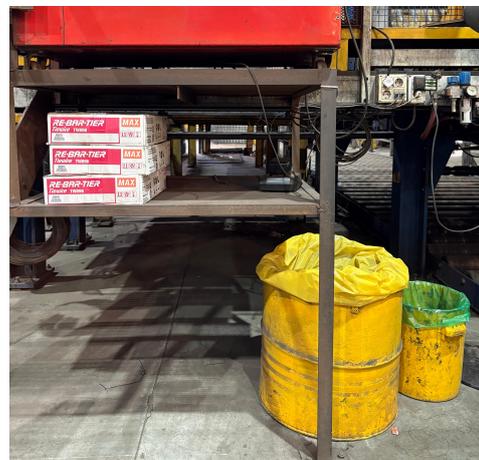
Frecuencias de uso en estante debajo del pupitre máquina de mallas



**Figura 13:** Frecuencias de uso en estante debajo del pupitre máquina de mallas - elaboración propia.

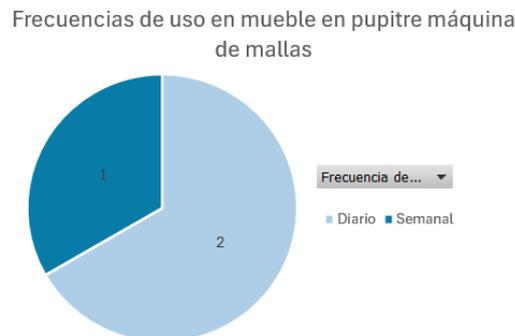


**Figura 14:** Estado inicial estante. Foto tomada por los autores del trabajo



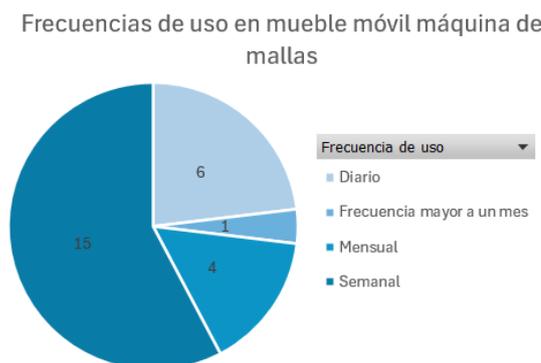
**Figura 15:** Estado final estante. Foto tomada por los autores del trabajo

En el mueble del pupitre de la MS4, se identificaron tres elementos con frecuencias similares (ver Figura 16), y se recomendó su permanencia en el lugar. También se observaron posibilidades de mejora en la organización interna, con el fin de lograr mayor agilidad y claridad visual.



**Figura 16:** Frecuencias de uso en mueble en pupitre máquina de mallas - elaboración propia.

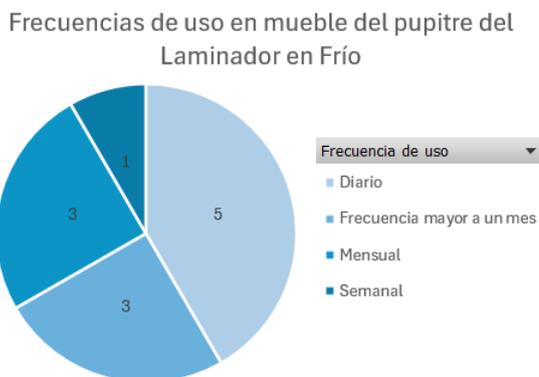
En el mueble móvil de la máquina de mallas, dada la cantidad y diversidad de elementos identificados, se realizó un análisis más exhaustivo. Si bien la lista es extensa, se determinó que todos los elementos deben permanecer en el mueble móvil, ya que su presencia allí facilita tanto la operación cotidiana de los operadores como las tareas del equipo de mantenimiento. La disponibilidad inmediata de herramientas e insumos en esta ubicación contribuye a reducir tiempos de búsqueda y de traslado, impactando positivamente en la eficiencia operativa. Como se puede observar en la Figura 17, se destacó un elemento con frecuencia de uso mayor a un mes, cuya permanencia también fue validada por tratarse de una herramienta crítica para la operación. Su disponibilidad en el puesto de trabajo permite dar respuesta inmediata ante fallas o imprevistos, sin generar demoras en la producción. Asimismo, se detectó una herramienta en estado medio, cuyo desgaste es coherente con el uso frecuente. Se dio aviso al facilitador del área para gestionar su reposición. En general, se concluyó que el mueble cumple un rol estratégico, y su contenido está alineado con las necesidades reales del puesto.



**Figura 17:** Frecuencias de uso en mueble móvil máquina de mallas - elaboración propia.

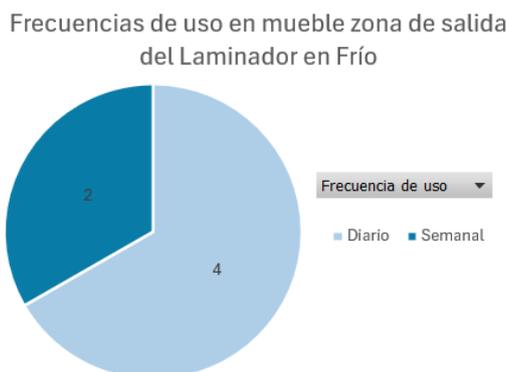
En el mueble del pupitre del LF, se encontraron tres elementos de uso poco frecuente como se observa en la Figura 18. Dos de ellos (latas de pintura y cadenas del puente grúa) fueron retirados y reubicados en zonas específicas ya existentes para estos elementos, con el fin de evitar desviaciones en la organización. El tercero, tres estufas de uso personal, se decidió mantenerlos en el mueble, ya que este se consideró un lugar adecuado, limpio y de

fácil acceso para su utilización durante el invierno por los operadores de esa máquina.



**Figura 18:** Frecuencias de uso en mueble del pupitre del Laminador en Frío - elaboración propia.

En el mueble de la zona de salida del LF (Figura 19), todos los elementos relevados fueron considerados necesarios. Se trató de herramientas y dispositivos para ensayos de calidad y otros asociados a la operativa de la zona, cuya permanencia contribuye a evitar desplazamientos innecesarios y a mantener la fluidez del proceso.



**Figura 19:** Frecuencias de uso en mueble zona de salida del Laminador en Frío - elaboración propia.

Finalizado el análisis de las frecuencias de uso en las zonas de interés, se procedió a examinar otro componente del formulario, el campo destinado al ingreso del código SAP. Si bien el formulario contempló un campo para el ingreso del código SAP del elemento, con el objetivo de fortalecer la trazabilidad y facilitar la vinculación con el sistema de gestión, se constató que la información proporcionada por los operadores respecto a la existencia o necesidad de un código SAP fue subjetiva y no basada en datos reales. Esto afectó la calidad y utilidad esperada de dicho campo. Lo que inicialmente se proyectaba como una herramienta constructiva para la estandarización y el control, en la práctica no aportó resultados significativos, por lo que se considera necesario reformular su implementación en futuras etapas del proyecto.

En términos generales, el relevamiento evidenció que los elementos presentes en las diferentes zonas se encuentran, en su mayoría, correctamente ubicados en función de su uso y utilidad. Si bien se detectaron oportunidades de mejora relacionadas con el orden interno y la reubicación puntual de ciertos materiales, el sistema de almacenamiento refleja un entorno de trabajo funcional, con bases sólidas para avanzar hacia una estandarización más robusta

y sostenible en el tiempo.

De esta manera, a partir del relevamiento realizado mediante el formulario y del análisis posterior de los datos obtenidos, se considera que se han cumplido satisfactoriamente los primeros seis pasos del plan de acción propuesto: la identificación de elementos y su ubicación (Paso 1), la evaluación de su estado (Paso 2), el diseño de un sistema de control mediante el formulario (Paso 3), la determinación de su grado de utilización (Paso 4), la clasificación según frecuencia de uso (Paso 5) y la evaluación del destino de los elementos no utilizados (Paso 6).

Respecto al paso 7, relativo a la definición de stock mínimo y máximo de repuestos críticos, se constató que las cantidades actualmente disponibles se ajustan adecuadamente a la operativa del área. Sin embargo, dado que no se identificaron faltantes ni excesos significativos, se recomienda mantener un seguimiento continuo que permita ajustar los niveles de stock en función del consumo real en el tiempo, especialmente para los elementos de alta rotación o criticidad operativa.

En relación con el paso 8 del plan de acción, se abordaron dos estrategias complementarias orientadas a mejorar el registro y seguimiento del inventario. En el caso del galpón, la información obtenida mediante el formulario de Microsoft Forms permitió construir una base de conocimiento inicial sobre los elementos almacenados a pie de máquina. A partir de esta información, se diseñó una tabla de seguimiento mensual que permite monitorear los movimientos de los repuestos en forma continua, detectando desvíos y anticipando necesidades de reposición. A continuación se presenta una representación en la Figura 20:

Fecha	Repuesto	Ubicación	Stock Inicial	Entradas	Salidas	Stock Final	Stock Min	Stock Max	¿Alerta?	Acciones

**Figura 20:** Tabla de seguimiento de inventario

La Tabla de seguimiento de inventario presentada en la Figura 20 incluye columnas para registrar la fecha en que se realiza el registro, el repuesto y su ubicación, el stock inicial, así como las entradas y salidas correspondientes, lo que permite calcular el consumo real y las reposiciones en el período. El stock final resulta del balance entre el stock inicial, las entradas y las salidas. Además, se incluyen los valores de stock mínimo y máximo, que son los rangos previamente definidos para evitar quiebres de stock o acumulación excesiva. La columna “¿Alerta?” actúa como indicador para señalar si el stock final se encuentra fuera de los rangos establecidos, ya sea por estar por debajo del mínimo o por encima del máximo, y la columna de acciones sirve para documentar las medidas a tomar, como la solicitud de reposición o el ajuste de stock. Esta tabla facilita el control periódico del inventario y proporciona información clave para la toma de decisiones en la gestión de repuestos.

Por su parte, para el caso del contenedor de repuestos, se desarrolló un archivo de Excel, como se observa en la Figura 21. El mismo tiene como objetivo gestionar el control de stock de repuestos mediante un sistema de ingreso y egreso de materiales. Su diseño permite a los usuarios registrar la entrada de productos al inventario y descontar unidades cuando se produce un egreso, garantizando un seguimiento preciso de la disponibilidad de cada artículo.



Para el paso 13 del plan de acción, se propuso la implementación de una demarcación visual en el área destinada al almacenamiento de materiales no conformes y material en proceso. Esta acción tiene un papel fundamental para evitar interferencias con el trabajo diario, asegurar la correcta identificación de los materiales y mantener el orden en el entorno operativo. Si bien no será realizada dentro del marco de este proyecto, debido a limitaciones de planificación y tiempo, se destaca su relevancia como una mejora necesaria y de alto impacto. Se recomienda su ejecución a la brevedad por parte de la organización, utilizando pintura amarilla para delimitar de forma clara las zonas de interés.

En el marco del punto 14 del plan de acción, se abordó la necesidad de asegurar que los tachos de basura estuvieran correctamente identificados y ubicados en zonas específicas. Durante los recorridos por planta se observó que, en varios sectores, los tachos no contaban con una ubicación fija ni con etiquetas que indicaran el tipo de residuo correspondiente, lo cual generaba acumulación desordenada de residuos y dificultades en su clasificación. Además, en los casos donde sí había etiquetas, se constató que no seguían el estándar definido por la empresa. El estado inicial del galpón y del taller se puede observar en la Figura 22 y en la Figura 23.



**Figura 22:** Estado inicial de los tachos en el galpón: (a), (b) y (c). Foto tomada por los autores del trabajo



**Figura 23:** Estado inicial de los tachos en el taller: (a) y (b). Foto tomada por los autores del trabajo

Como primer paso, se identificaron todos los tachos existentes en planta. A partir de este relevamiento, se diseñaron e imprimieron las etiquetas necesarias con la clasificación correspondiente, como se puede observar en las Figuras 24 y 25.



**Figura 24:** Estado final de los tachos en el galpón: (a), (b) y (c). Foto tomada por los autores del trabajo



**Figura 25:** Estado final de los tachos en el taller: (a) y (b). Foto tomada por los autores del trabajo

Este trabajo permitió estandarizar la identificación y disposición de los tachos, facilitar su correcta utilización por parte del personal y reducir la acumulación de residuos en lugares no apropiados.

Por otro lado, para mejorar los puntos 15, 16 y 17 del plan de acción (orientados a mejorar la limpieza de las áreas involucradas), se diseñó e implementó una planilla de seguimiento de limpieza para los sectores de Laminador y Mallas como se puede ver en la Figura 51 del Anexo 7.2. Estas herramientas buscan asegurar el cumplimiento regular de las tareas asignadas, así como facilitar la trazabilidad de las mismas a través del registro de firmas.

Cada planilla contempla un esquema de trabajo semanal dividido por turnos (mañana y tarde), en el que se alternan dos tipos principales de tareas: limpieza y orden general del área, y limpieza de tachos de residuos y despuntes de metal generados en el proceso. Esta rotación permite distribuir las responsabilidades de forma equitativa entre los turnos, mantener la constancia en la limpieza y fomentar el compromiso del personal mediante la asignación clara y previsible de actividades. Además, el registro de firmas al finalizar cada tarea permite llevar

un control efectivo y visibilizar posibles desvíos.

Los responsables de llevar a cabo estas tareas son los trabajadores de cada máquina por turno, quienes además de sus tareas habituales, asumen la responsabilidad de mantener el orden y la limpieza en su sector correspondiente.

Para complementar este sistema y asegurar que cada equipo entienda con claridad el área de la planta bajo su responsabilidad, se elaboró un plano de zonificación, en el cual se delimitan visualmente las zonas asignadas a cada grupo. Esto refuerza el enfoque de trabajo por sectores, facilita la supervisión y promueve una cultura de orden sostenida en el tiempo.

A partir de todas las acciones desarrolladas en esta etapa, se logró dar respuesta a las principales problemáticas detectadas en el diagnóstico inicial. El plan de acción permitió avanzar de forma estructurada en la implementación de mejoras, generando un entorno más ordenado y propicio para el trabajo. Estas intervenciones iniciales constituyen una base sólida para continuar profundizando la metodología y avanzar hacia su consolidación en el tiempo.

#### 4.4. Determinación de capacidad máxima y layout

Durante el desarrollo del proyecto, y a partir de diversas recorridas en planta, se identificó de forma reiterada un problema en el área destinada al stockeo del producto intermedio proveniente del Laminador. Puntualmente, se observó que las bobinas no se colocaban en los espacios delimitados ni se aprovechaba de forma eficiente la superficie disponible, lo cual generaba desorden y limitaba la capacidad real de almacenamiento. Ver Figura 26.



**Figura 26:** Estado actual área material en proceso. Foto tomada por los autores del trabajo

Si bien esta situación no formaba parte del plan de acción inicial, su recurrencia y el impacto potencial sobre la continuidad del proceso productivo motivaron la incorporación de una actividad adicional, el análisis de la capacidad máxima de almacenamiento de bobinas en condiciones ideales.

Si se aprovecha el espacio actual de la forma más eficiente posible, almacenando cada bobina lo más próxima entre sí y formando columnas de a tres unidades, es posible alcanzar una capacidad máxima de almacenamiento de 156 bobinas provenientes del Laminador en Frío. Esto equivale aproximadamente a 405 toneladas, lo que representa cerca de un mes de producción de la máquina de mallas y alrededor del 70 % de la producción mensual del laminador.

Esta capacidad de stockeo no solo optimiza el uso del espacio disponible, sino que también brinda un margen operativo importante para sostener la continuidad productiva ante posibles variaciones en la demanda o interrupciones puntuales del laminador.

Con base en la demanda de producción registrada durante el último año, se propone una estrategia de stockeo por medidas, que busca mantener un equilibrio entre disponibilidad, variedad y volumen almacenado. La distribución sugerida es la siguiente:

- 39 bobinas de 3,5 mm.
- 39 bobinas de 4,2 mm.
- 27 bobinas de 5,5 mm.
- 33 bobinas de 6 mm.
- 18 bobinas de 8 mm.

Teniendo en cuenta que se requieren al menos 32 bobinas para conformar un batch completo en la máquina de mallas, esta propuesta garantiza la cobertura total de tres de las cinco medidas más utilizadas (3,5 mm, 4,2 mm y 6 mm), permitiendo su procesamiento inmediato.

Además, considerando que la producción puede iniciarse con un mínimo de 18 bobinas, las dos medidas restantes (5,5 mm y 8 mm), que contarían con un stock inicial de 27 y 18 unidades respectivamente, también permitirían activar la producción sin demoras, siempre que se coordine el reabastecimiento desde el laminador en simultáneo.

De este modo, la propuesta permite mantener una producción continua y sin interrupciones, maximizando tanto la eficiencia en el uso del espacio como el rendimiento de los equipos involucrados.

Cabe destacar que, a grandes rasgos esta estrategia es la que actualmente se adopta en la práctica, pero no existe una definición concreta y unánime respecto a la cantidad de bobinas por medida a mantener en stock. Esto genera cierta variabilidad en la gestión del espacio, y es recurrente que se comience a almacenar bobinas en otras zonas del galpón sin haber ocupado por completo el área designada específicamente para su almacenamiento. Como consecuencia, el galpón adquiere un aspecto completamente desordenado. Además, el hecho de ubicar bobinas entre las máquinas, sin respetar los sectores definidos para el stock, genera obstrucciones que afectan directamente la operativa diaria, en particular, se bloquea la entrada al taller de mantenimiento, que actualmente es la única vía de acceso disponible para el ingreso de elevadores.

A partir de la determinación de la capacidad máxima de stockeo de bobinas en el galpón, se considera importante sugerir acciones concretas para aplicar en caso de alcanzar dicho límite. La saturación del área de almacenamiento designada representa un riesgo para la continuidad operativa y la eficiencia del proceso, por lo tanto, proponemos una serie de alternativas viables para enfrentar esta situación sin afectar significativamente el proceso productivo.

Una primera opción consiste en que, una vez alcanzado el límite de stock, el personal del laminador aborde tareas relacionadas con la metodología 5S, enfocándose en la mejora del orden, la limpieza y la organización del área. Simultáneamente, se propone que el equipo de mantenimiento aproveche ese período para realizar intervenciones planificadas en la máquina, ya sea mantenimiento preventivo o correctivo. Esta alternativa permite dar valor al tiempo en que el laminador no puede operar, mejorando las condiciones generales del entorno y asegurando la disponibilidad futura de los equipos. Sin embargo, implica una detención temporal del laminador, lo que puede impactar en la eficiencia de producción mensual si no se coordina correctamente.

Otra opción es habilitar un espacio externo al galpón donde se pueda continuar almacenando bobinas. Esto permite mantener operativa la línea del laminador sin interrupciones, brindando mayor flexibilidad al sistema. No obstante, esta solución puede implicar desafíos logísticos, como el traslado de bobinas tanto hacia el lugar de almacenamiento, como para su posterior consumo, y el control de inventario en múltiples ubicaciones. De esta forma se estaría perdiendo la ventaja identificada en la distribución de la planta.

También se plantea como alternativa reducir temporalmente el ritmo de producción del laminador, ajustando la velocidad de trabajo o disminuyendo los turnos de operación, con el objetivo de no generar más stock del que se puede almacenar sin llegar a detener completamente el proceso. Esta estrategia es útil para evitar la sobreproducción, pero puede generar ineficiencias por subutilización de los recursos humanos si se prolonga en el tiempo.

#### **4.5. Continuidad y proyección a futuro de la metodología 5S**

En cuanto a la metodología 5S, si bien la implementación realizada en Gerdau se centró en los primeros sentidos del proceso (las primeras 3S), el trabajo ejecutado permitió establecer una base sólida y replicable sobre la cual continuar desarrollando mejoras. Esta primera intervención no solo generó resultados visibles en términos de orden y organización, sino que también promovió un cambio cultural entre los operarios, orientado hacia la disciplina operativa y la eficiencia en el entorno de trabajo.

Es importante comprender que el verdadero impacto de la metodología 5S se consolida en el mediano y largo plazo, a medida que las prácticas instauradas se estandarizan y se incorporan de forma sistemática en la rutina diaria. En este sentido, se recomienda enfáticamente que la empresa continúe profundizando en la implementación de los sentidos restantes, apuntando a sostener los logros alcanzados y avanzar hacia una cultura organizacional alineada con los principios de mejora continua.

Asimismo, resulta clave la realización de una segunda auditoría interna en el corto plazo, que permita contrastar de forma objetiva los avances logrados respecto a la evaluación inicial. Dicha instancia no pudo ser contemplada dentro del alcance temporal de este proyecto, pero se considera fundamental para comenzar a generar una métrica sostenida en el tiempo sobre el estado y la evolución de las áreas intervenidas. De este modo, la empresa podrá monitorear el progreso, identificar nuevas oportunidades de mejora y tomar decisiones basadas en información concreta y actualizada.

La consolidación de esta metodología no solo permite mantener los beneficios obtenidos, sino también proyectar su implementación en otras áreas productivas y de soporte, maximizando el retorno de esta iniciativa y fortaleciendo la eficiencia operativa de manera integral.

## 5. Metodología gestión de stock

### 5.1. Análisis de datos

El análisis de datos constituyó una etapa fundamental para la parametrización del modelo matemático propuesto, ya que permitió traducir información operativa real en insumos cuantitativos concretos. Para ello, se recopilaron registros históricos de compras de repuestos correspondientes a las dos máquinas involucradas, abarcando la totalidad del año 2024.

Cabe mencionar que, idealmente, un análisis más robusto de la demanda habría requerido considerar datos históricos de un período más amplio, abarcando varios años. Sin embargo, esta posibilidad fue descartada debido a las limitaciones de tiempo impuestas por el cronograma del proyecto, así como por la disponibilidad y calidad de los registros anteriores al año 2024. En particular, se detectaron inconsistencias en los datos históricos más antiguos, como cambios en las denominaciones de artículos y ausencia de criterios homogéneos de carga, lo cual dificultaba su utilización directa sin un proceso de depuración significativamente extenso. Por ello, se optó por concentrar el análisis en el año 2024, asegurando así la coherencia y trazabilidad de la información utilizada.

Los datos fueron extraídos del sistema SAP de la empresa y se organizaron de forma mensual, generando una base estructurada con los repuestos adquiridos en cada uno de los doce meses del año. El supuesto utilizado fue que los repuestos comprados en el período fueron efectivamente utilizados, por lo tanto, se consideró que dicha información podía representar una aproximación razonable a la demanda real de repuestos durante ese lapso.

Previo al procesamiento, se realizó una depuración de los datos para asegurar su consistencia y relevancia. Se eliminaron de la base todos aquellos artículos que corresponden a adquisiciones excepcionales de equipamiento o sistemas completos, ya que su compra está asociada a proyectos puntuales y no responde a un patrón de reposición periódica. Asimismo, se excluyeron los insumos que forman parte de los procesos productivos regulares y que se adquieren de forma periódica bajo un sistema de planificación ya establecido, dado que la demanda de estos insumos es conocida y se gestiona por separado. También se corrigieron errores de tipeo y se unificaron denominaciones en aquellos casos donde un mismo repuesto había sido registrado con diferentes nombres, a fin de evitar duplicaciones en el conteo y asegurar una correcta trazabilidad.

Luego del proceso de limpieza, para cada repuesto registrado se identificó, en cada mes, la cantidad comprada, el costo asociado, el proveedor y el origen del repuesto (clasificado en tres grupos: nacional, importado del Mercosur o importado de otros destinos). Esta información fue organizada en una base de datos, permitiendo parametrizar variables clave como los costos, la frecuencia de uso y el tipo de abastecimiento. Adicionalmente, en esta etapa se clasificaron los repuestos en tres categorías según el espacio físico que ocupan (chico, mediano y grande).

De un total de aproximadamente 120 repuestos, se seleccionaron 30 para trabajar en este estudio. Esta elección se basó en la necesidad de contar con una muestra representativa pero manejable, que permitiera realizar análisis posteriores de manera eficiente. Utilizar todos los repuestos habría generado una salida de datos excesiva, dificultando su procesamiento y la extracción de conclusiones útiles. La selección se realizó aplicando un modelo VED (Vital, Esencial, Deseable), priorizando aquellos repuestos considerados más críticos para el sistema.

## 5.2. Desarrollo

Para el desarrollo del modelo de planificación de repuestos se tomaron como referencia general algunos lineamientos del trabajo de [Johannsmann et al. \[2022\]](#), especialmente en lo relativo a la toma de decisiones anticipadas de compra de repuestos bajo incertidumbre de demanda, y la consideración conjunta de restricciones logísticas y presupuestales. A partir de estas ideas se construyó un modelo adaptado al contexto particular de este trabajo, cuya formulación completa se presenta en la sección a continuación.

Para estimar la demanda futura de repuestos, utilizamos los datos históricos del año 2024 de ambas máquinas. Nos basamos en la metodología propuesta por [Turrini and Meissner \[2018\]](#), quienes analizaron la gestión de inventarios de repuestos mediante el ajuste de distribuciones.

En la conclusión del paper, se menciona que las distribuciones que mejor se ajustan a los datos de demanda de repuestos son la Binomial Negativa y la Stuttering Poisson. De acuerdo con la clasificación de la demanda:

- Si la demanda es intermitente y errática, la distribución recomendada es la Stuttering Poisson.
- Si la demanda no es intermitente pero es errática, la distribución recomendada es la Binomial Negativa.

Siguiendo su enfoque, calculamos el promedio de demanda ( $\mu$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ) para evaluar la dispersión de los datos. A partir de estos valores, obtuvimos el coeficiente de variación al cuadrado ( $CV^2$ ), definido como:

$$CV^2 = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2$$

Este coeficiente permite clasificar la demanda en diferentes categorías:

- $CV^2 < 0,5$  Demanda estable.
- $0,5 \leq CV^2 < 1,5$  Demanda moderada.
- $CV^2 \geq 1,5$  Demanda errática.

Adicionalmente, calculamos el coeficiente  $P$ , que mide la frecuencia de períodos sin demanda. Este se define como:

$$P = \frac{\text{Número de períodos con demanda cero}}{\text{Total de períodos analizados}}$$

Este coeficiente permite distinguir entre:

- $P < 1,32$  Demanda de alta frecuencia.
- $P \geq 1,32$  Demanda intermitente.

A partir de la caracterización del comportamiento de los repuestos, identificamos que la demanda de los 30 repuestos seleccionados sigue un patrón errático e intermitente (los resultados se pueden observar en la Figura 52 en el Anexo 7.3). Con base en esta observación, determinamos que la distribución que mejor se ajusta, según el estudio presentado en [Turrini and Meissner \[2018\]](#), es la Stuttering Poisson. Se concluye que todos los repuestos fueron

clasificados como intermitentes y erráticos, lo que podría resultar inusual en otros contextos. Sin embargo, este comportamiento es coherente con el entorno operativo de la planta, donde la demanda de repuestos es altamente esporádica, con largos períodos sin requerimientos y solicitudes puntuales en bajas cantidades. La alta variedad de ítems y el bajo consumo mensual por repuesto individual explican esta homogeneidad en la clasificación.

Para comprender en detalle las fórmulas que rigen esta distribución, recurrimos a los trabajos de [Chen et al. \[2010\]](#) y [Zhang et al. \[2012\]](#), los cuales proporcionan un análisis exhaustivo de su formulación y aplicación.

El cálculo del parámetro  $p$  (parámetro de ajuste geométrico) se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$p = \left( \frac{2}{1 + \left( \frac{\sigma^2}{\mu} \right)} \right)$$

A partir de este valor de  $p$ , se estima el parámetro  $\lambda$  (tasa de ocurrencia de eventos por mes) como el producto entre la media y  $p$ , es decir :

$$\lambda = p \cdot \mu$$

Luego, se generan los coeficientes  $\alpha_k$  que representan la probabilidad de que un evento de demanda sea de tamaño  $k$  (siendo  $k$  la cantidad de repuestos que se demandan), siguiendo una distribución geométrica de la forma:

$$\alpha_k = p \cdot (1 - p)^{k-1}, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, N$$

Estos coeficientes auxiliares se usan para construir la distribución total de demanda mensual. La probabilidad de observar exactamente  $n$  unidades demandadas en un mes, denotada como  $P(n)$ , se calcula recursivamente. Se comienza con:

$$P(0) = e^{-\lambda}$$

y luego se aplica la fórmula:

$$P(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n k \cdot \alpha_k \cdot \lambda \cdot P(n - k)$$

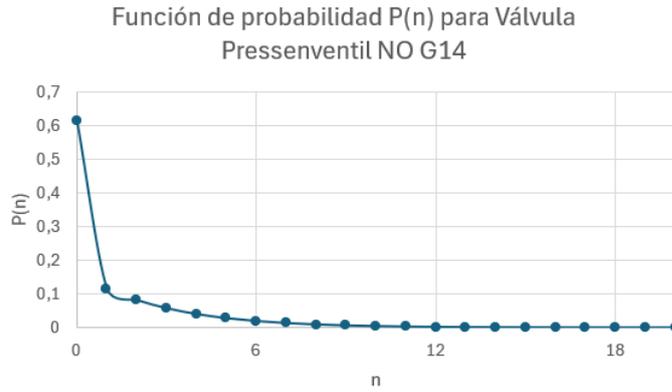
Esto genera una distribución discreta que asigna una probabilidad a cada valor de demanda desde 0 hasta un valor máximo, en nuestro caso 20 unidades, ya que este número asegura que la función de probabilidad acumulada para cada uno de los repuestos se aproxime a 1.

A continuación, en la Figura 27 se presenta un ejemplo de cómo se comporta la distribución de Stuttering Poisson en uno de los repuestos.

A partir de la función de probabilidad, se construye la función acumulada  $F(n)$ , que representa la probabilidad de que la demanda sea menor o igual a un valor dado  $n$ , es decir:

$$F(n) = P(X \leq n) = \sum_{i=0}^n P(i)$$

Una vez construida la función acumulada  $F(n)$ , esta se utiliza para simular valores de demanda de forma coherente con la distribución ajustada. Para cada combinación de repuesto y mes, se genera un número aleatorio  $u \in [0, 1]$ , y se busca el menor valor  $n$  tal que  $F(n) \geq u$ . Este procedimiento permite obtener una demanda simulada que respeta la estructura de probabilidades empíricamente observada.



**Figura 27:** Ejemplo distribución Stuttering Poisson

Por ejemplo, si la función acumulada es:

$$F(0) = 0,3$$

$$F(1) = 0,6$$

$$F(2) = 0,85$$

$$F(3) = 1,0$$

y se genera un número aleatorio  $u = 0,72$ , entonces se asigna una demanda simulada de  $n = 2$ , ya que es el menor valor que cumple  $F(n) \geq u$ .

Esta metodología se aplica con el objetivo de obtener un valor estimado de demanda futura para cada repuesto y mes, utilizando un valor aleatorio distinto cada vez. De esta forma, se evita caer sistemáticamente en valores bajos, medios o altos, y se preserva la variabilidad natural de la demanda. Así, se genera una proyección más realista que puede ser utilizada directamente como entrada en el modelo de optimización.

### 5.2.1. Supuestos

Para la construcción del modelo, se establecen los siguientes supuestos:

- Se considera un único modelo matemático para ambas máquinas, dado que no son completamente independientes entre sí. En particular, el Laminador es responsable de producir la materia prima utilizada por la máquina de Mallas. Esto implica que una escasez de repuestos en el Laminador podría generar una interrupción en la producción de materia prima, afectando el funcionamiento de la máquina de Mallas.
- El espacio de almacenamiento de repuestos es compartido entre ambas máquinas. Sin embargo, cada máquina utiliza repuestos específicos e independientes, sin que haya intercambio de repuestos entre ellas.
- El presupuesto destinado a la adquisición de repuestos es único y se gestiona de manera conjunta para ambas máquinas. Esto significa que la asignación de recursos debe equilibrarse entre las dos para garantizar su operatividad sin generar sobrecostos innecesarios.
- Se considera que los tiempos de entrega de los repuestos son conocidos y que existe un tiempo de reposición determinado para cada tipo de repuesto. Para ello, los repuestos se clasificaron en tres categorías: repuestos Nacionales, repuestos del Mercosur y repuestos

de otros orígenes, asignando a cada grupo un lead time fijo basado en datos históricos y tiempos de importación registrados.

- Suponemos que antes del cumplimiento del lead time de la primera compra, no hay stock disponible de ningún repuesto.
- La demanda de repuestos se asume determinista, calculada a partir del ajuste probabilístico Stuttering Poisson.
- Se clasifican los repuestos en tres categorías según su volumen: chicos, medianos y grandes. El almacén tiene una capacidad limitada específica.
- Se asume un único proveedor para Mercosur y un único para Otros, aplicando un solo costo de envío por origen y por período. Los repuestos nacionales no generan costo de envío y no se incluyen en esta consideración.

### 5.2.2. Modelo

En esta sección se presenta la formulación matemática del modelo. Si bien este no busca representar de forma exacta toda la complejidad del sistema real, constituye una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones. El modelo se basa en un enfoque de revisión periódica mensual, donde las decisiones se evalúan en intervalos regulares a lo largo de un horizonte de planificación. Su objetivo es simplificar el entorno operativo a través de supuestos razonables, permitiendo analizar de forma estructurada las distintas variables involucradas en la planificación de repuestos. A partir de esta simplificación, se obtiene una base cuantitativa que facilita la evaluación de alternativas y contribuye a mejorar la eficiencia y efectividad del proceso de gestión.

A continuación, se detallan los conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo que lo componen.

#### Conjuntos

1.  $M$ : Conjunto de máquinas.
2.  $R$ : Conjunto de repuestos.
3.  $T$ : Cantidad de períodos en el horizonte de planificación, definido como  $T = \{1, \dots, meses\}$ .
4.  $A_r \subseteq M, \forall r \in R$ : Conjunto de máquinas asignadas a cada repuesto. Cada repuesto está asociado a una única máquina y no puede repetirse en ambas máquinas.
5.  $R_N \subseteq R$ : Conjunto de repuestos Nacionales.
6.  $R_M \subseteq R$ : Conjunto de repuestos provenientes del Mercosur.
7.  $R_O \subseteq R$ : Conjunto de repuestos de otros orígenes.
8.  $CHICO \subseteq R$ : Conjunto de repuestos que ocupan poco espacio de almacenamiento.
9.  $MEDIANO \subseteq R$ : Conjunto de repuestos que ocupan un espacio intermedio.
10.  $GRANDE \subseteq R$ : Conjunto de repuestos que ocupan un gran volumen de almacenamiento.

#### Parámetros

1.  $meses$ : Cantidad total de meses en el horizonte de planificación.
2.  $D_{rmt}, \forall r \in R, m \in A_r, t \in T$ : Demanda pronosticada.
3.  $C_m^{des}, \forall m \in A_r$ : Costo de desabastecimiento por máquina.
4.  $C_r^{compra}, \forall r \in R$ : Costo de compra unitario.
5.  $C^{envio-M}$ : Costo fijo por realizar un pedido a un proveedor Mercosur.
6.  $C^{envio-O}$ : Costo fijo por realizar un pedido a un proveedor del resto del mundo.
7.  $S$ : Capacidad total del almacén (unidades de espacio).
8.  $s^{chico}, s^{mediano}, s^{grande}$ : Espacio ocupado por un repuesto según su tamaño.
9.  $B$ : Presupuesto máximo anual.

10.  $L_r$ : Lead time en meses según el origen del repuesto. Pudiendo ser Nacional, Mercosur u Otros.
11.  $M$ : Cota superior que representa un valor suficientemente grande.

### Variables de Decisión

1.  $x_{rt}$  : Stock de repuestos  $r$  en el período  $t$ .
2.  $o_{rt}$  : Cantidad de repuestos  $r$  comprados en el período  $t$ .
3.  $z_{mt}$  : Variable binaria que indica si la máquina  $m$  está operativa en el período  $t$ . Vale 1 si la máquina está operativa o 0 si está detenida.
4.  $y_{r,m,t}$  : Cantidad de repuestos  $r$  faltantes en la máquina  $m$  en el período  $t$ , siendo  $t$  mayor al lead time
5.  $faltante - inicial_{r,m}$ : Cantidad de repuestos  $r$  faltantes en la máquina  $m$  cuando el periodo  $t$  es menor igual al lead time.
6.  $pedido\_M_t$ : Variable binaria que indica si se realiza algún pedido a un proveedor del Mercosur en el período  $t$ .
7.  $pedido\_O_t$ : Variable binaria que indica si se realiza algún pedido a un proveedor del grupo Otros en el período  $t$ .

### Observaciones relevantes

En relación a como se define el conjunto de máquinas asignadas a cada repuesto  $A_r \subseteq M$ ,  $\forall r \in R$ , GLPK no permite trabajar de forma natural con lo que se conoce como subconjuntos paramétricos o relacionales. Estos subconjuntos son aquellos que no se definen de forma independiente, sino en función de otro conjunto. Por ejemplo, en lugar de tener un único conjunto global de máquinas o de repuestos, se plantea tener subconjuntos específicos que dependen de cada elemento del otro conjunto, como el conjunto de máquinas asignadas a cada repuesto o el conjunto de repuestos asociados a cada máquina. Esto representa una relación entre elementos de dos conjuntos, y puede tomar distintas formas, como una relación uno a uno o uno a muchos.

En el caso del modelo de asignación de repuestos a máquinas, es más conveniente definir un subconjunto de máquinas para cada repuesto, es decir, establecer para cada repuesto a qué máquina está asignado. Esta forma de representar la relación, permite modelar el problema de forma más clara, compatible y escalable dentro del lenguaje de GLPK. Tener esta asignación directa facilita mucho la escritura de las restricciones del modelo, ya que se puede recorrer el conjunto de repuestos y, para cada uno, acceder directamente a la máquina correspondiente sin necesidad de lógica adicional.

En cambio, si se definiera un subconjunto de repuestos por cada máquina, la relación se vuelve más difícil de manejar. Desde esa estructura no es sencillo saber, para un repuesto dado, cuál es la máquina asociada, lo cual complica la implementación de restricciones que necesitan recorrer los repuestos y conocer su máquina. Para resolverlo sería necesario crear estructuras auxiliares o repetir lógica, lo cual aumenta la complejidad y disminuye la claridad del modelo.

Por eso, aunque ambos enfoques representan la misma relación, definir la asignación desde el repuesto hacia la máquina es mucho más práctico para trabajar en GLPK, especialmente en modelos donde cada repuesto está asociado a una única máquina y se requiere recorrerlos frecuentemente.

En cuanto a la variable faltante inicial, esta no tiene impacto en el valor óptimo ni en las decisiones que toma el modelo. Su incorporación tiene un propósito exclusivamente analítico, ya que, permite identificar de forma sencilla los repuestos cuya demanda no podrá ser cubierta debido a limitaciones de tiempo de entrega. Se trata de una variable auxiliar, definida para facilitar la interpretación de la salida del modelo y apoyar al usuario en la toma de decisiones.

Por otro lado, cabe destacar que las variables no binarias del modelo, se definieron únicamente con la condición de ser variables no negativas, sin imponer restricción de integralidad. Esta decisión se fundamenta en que, al utilizar parámetros enteros como datos de entrada, el modelo tiende a devolver valores enteros en estas variables de forma natural. De esta manera, se simplifica la resolución del modelo sin comprometer la validez práctica de los resultados.

## Función Objetivo

Minimizar los costos asociados a la gestión de repuestos en el horizonte de planificación. Se incluyen los costos de compra de repuestos, los costos generados por el desabastecimiento y los costos de envío asociados a los repuestos cuyos proveedores se encuentran fuera del país:

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{m \in A_r} \sum_{t \in T} C_m^{\text{des}}(1 - z_{m,t}) + \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} C_r^{\text{compra}} o_{rt} + \sum_{t \in T} (C^{\text{envio.M}} \cdot \text{pedido}_M t + C^{\text{envio.O}} \cdot \text{pedido}_O t) \quad (1)$$

## Restricciones

1. Evolución del stock: El inventario en un período  $t$  es igual al inventario del período anterior, más las compras recibidas tras el tiempo de entrega, menos la demanda para cada máquina, corregida por los faltantes. La evolución del stock se modela considerando el lead time  $L_r$  específico según el origen del repuesto:

$$x_{r,t} = x_{r,t-1} + o_{r,t-L_r} - \sum_{m \in A_r} (D_{r,m,t} - y_{r,m,t}) \quad \forall r \in R, \forall t \in T > L_r \quad (2)$$

Donde  $L_r$  representa el lead time correspondiente a cada repuesto según su procedencia

2. Inicialización del stock: No hay stock disponible antes de que se cumpla el lead time de cada repuesto.

$$x_{r,t} = 0 \quad \forall r \in R, \forall t \in T \leq L_r \quad (3)$$

3. Cubrimiento de la demanda: Asegura que los faltantes de repuestos solo pueden existir si la máquina está parada. Si la máquina está operativa en un período ( $z_{m,t} = 1$ ), no se permite ningún faltante. En cambio, si está detenida ( $z_{m,t} = 0$ ), se permite que la demanda no sea cubierta hasta un máximo igual a la demanda total.

$$y_{r,m,t} \leq D_{r,m,t} \cdot (1 - z_{m,t}), \quad \forall r \in R, m \in A_r, t \in T. \quad (4)$$

4. Forzar apagado por lead time: Si un repuesto tiene demanda en un mes anterior al lead time, entonces la máquina debe estar apagada ( $z_{m,t} = 0$ ) en ese período, ya que no se puede cubrir la demanda de repuestos en ese tiempo.

$$z_{m,t} \leq 1 - \frac{D_{r,m,t}}{M}, \quad \forall r \in R, m \in A_r, t \in T \leq L_r. \quad (5)$$

Donde  $L_r$  representa el lead time correspondiente a cada repuesto según su procedencia

5. Cálculo del faltante inicial por lead time: Si un repuesto posee un tiempo de entrega posterior al período actual, se considera que toda la demanda correspondiente no puede ser cubierta de forma inmediata y, por lo tanto, se acumula como faltante inicial.

$$\text{faltante\_inicial}_{r,m} = \sum_{t \in T: t \leq L_r} D_{r,m,t}, \quad \forall r \in R, m \in A_r \quad (6)$$

Donde  $L_r$  representa el lead time correspondiente a cada repuesto según su procedencia

6. Relación entre máquinas: debido a que en el Laminador se produce la materia prima de la máquina de Mallas, su funcionamiento está sujeto al del Laminador.

$$z_{\text{Laminador},t} \geq z_{\text{Soldadora},t} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

7. Capacidad del almacén

$$\left( \sum_{r \in \text{CHICO}} s^{\text{chico}} \cdot x_{rt} + \sum_{r \in \text{MEDIANO}} s^{\text{mediano}} \cdot x_{rt} + \sum_{r \in \text{GRANDE}} s^{\text{grande}} \cdot x_{rt} \right) \leq S, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

8. Restricción de Presupuesto

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} C_r^{\text{compra}} o_{rt} \leq B. \quad (9)$$

9. Activación de las variables de envío

$$\sum_{r \in R_M} o_{r,t} \leq M \cdot \text{pedido}_M t \quad (10)$$

$$\sum_{r \in R_O} o_{r,t} \leq M \cdot \text{pedido}_O t \quad (11)$$

10. Dominio de las variables

$$x_{rt} \geq 0, \quad o_{rt} \geq 0, \quad y_{r,m,t} \geq 0, \quad \text{faltante} - \text{inicial}_{r,m} \geq 0 \quad \forall r \in R, m \in M, t \in T. \quad (12)$$

$$z_{mt} \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in M, t \in T. \quad (13)$$

$$\text{pedido}_M t \in \{0, 1\}, \quad \text{pedido}_O t \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T. \quad (14)$$

### 5.2.3. Validación del modelo

A continuación se describe la validación del modelo realizado, que tiene como objetivo verificar si la formulación matemática propuesta representa adecuadamente la realidad del sistema bajo estudio. A través de esta etapa, se busca evaluar el comportamiento del modelo frente a situaciones o casos de prueba, asegurando que sus resultados sean coherentes con el funcionamiento esperado. De esta manera, se garantiza que las decisiones derivadas del modelo sean confiables y aplicables en contextos prácticos.

Cabe destacar que el modelo que se presenta en esta sección es el resultado de un proceso iterativo, en el que se realizaron múltiples versiones, pruebas preliminares y ajustes sucesivos tanto en la formulación como en la implementación computacional. Este enfoque permitió identificar y corregir errores lógicos, inconsistencias técnicas y mejorar progresivamente la representación del problema real. En los casos en los que la validación devela una falla u oportunidad de mejora en el modelo, se realizan las modificaciones correspondientes y se procede a validarlo nuevamente.

Para corroborar el correcto funcionamiento del modelo, se diseñaron 9 casos de prueba que permite verificar su respuesta ante escenarios específicos y controlados. Estos casos contemplan distintas combinaciones de parámetros clave y situaciones representativas, de forma de evaluar la solución obtenida. Además, permitieron identificar posibles errores lógicos o inconsistencias en la implementación computacional del modelo.

#### **Caso de prueba 0: Validación del comportamiento en ausencia total de demanda**

En este caso, se considera un horizonte temporal de 2 meses, con 2 repuestos (A y B) asignados a una única máquina (Z). El objetivo de este caso de prueba es analizar el comportamiento del modelo cuando la demanda de repuestos es nula durante todo el horizonte temporal.

Dado que no se presentan requerimientos de demanda, se espera que el modelo no realice compras ni mantenga inventario. Por lo tanto, las variables  $x_{rt}$  y  $o_{rt}$  deberían permanecer en cero para ambos repuestos en los dos periodos. Asimismo, al no existir faltantes, se espera que la máquina Z se mantenga operativa durante todo el horizonte temporal, lo que se refleja en la variable binaria  $z$ .

A continuación, se detallan los valores de entrada del modelo, los parámetros utilizados y los valores de salida obtenidos:

<b>Conjuntos</b>	<b>Valor</b>
Máquinas	Z
Repuestos	A, B
Repuestos Nacionales	A, B

**Tabla 3:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 0

Parámetros	Valor
Meses	2
Lead time repuestos Nacionales	1
D[A,Z,1]	0
D[A,Z,2]	0
D[B,Z,1]	0
D[B,Z,2]	0
CostoDesabastecimiento[Z]	3
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
Presupuesto	10

**Tabla 4:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 0

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	0
o[A,1]	0
o[A,2]	0
o[B,1]	0
o[B,2]	0
z[Z,1]	1
z[Z,2]	1

**Tabla 5:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 0

El modelo respondió correctamente, no se generaron compras ni se acumuló stock, y la variable binaria  $z$  indicó correctamente que la máquina se mantuvo operativa durante todo el horizonte temporal, por lo que el nivel de servicio alcanza el 100%.

Cabe aclarar que el concepto de “nivel de servicio” no fue implementado explícitamente como una restricción ni como un parámetro en el modelo. En su lugar, optamos por permitir que el modelo tome decisiones en función del equilibrio entre los costos de desabastecimiento, de compra de repuestos y de envío. Consideramos que esta es la opción más adecuada, ya que permite al modelo decidir, con los recursos disponibles, si es preferible mantener una máquina operativa o permitir su detención. Esto evita fijar de antemano un nivel de servicio que podría no ser óptimo y que, además, podría cambiar con el tiempo según las condiciones del sistema o las prioridades de la empresa.

### **Caso de prueba 1: Validación del comportamiento ante demanda puntual mínima**

Este caso se prueba para un período de 2 meses, y una demanda de 1 unidad del repuesto A en el mes 2. Se mantienen los mismos 2 meses de horizonte temporal, 2 repuestos (A y B) y 1 máquina (Z), con los repuestos A y B asignados a la máquina Z.

El objetivo de este caso de prueba es analizar cómo responde el modelo ante una demanda puntual. Se espera que el modelo genere 1 sola compra del repuesto A, en el mes anterior a la demanda. Por lo tanto, se espera que las variables las variables  $x_{rt}$  y  $o_{rt}$  reflejen esta necesidad, mientras que las demás variables de compra y stock deberían permanecer en cero.

A continuación, se detallan los valores de entrada del modelo, los parámetros utilizados y los valores de salida obtenidos:

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B
Repuestos Nacionales	A, B

**Tabla 6:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 1

Parámetros	Valor
Meses	2
Lead time repuestos Nacionales	1
D[A,Z,1]	0
D[A,Z,2]	1
D[B,Z,1]	0
D[B,Z,2]	0
CostoDdesabastecimiento[Z]	3
CostoCompra[A]	2
CostoCompra[B]	2
Presupuesto	10

**Tabla 7:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 1

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	0
o[A,1]	1
o[A,2]	0
o[B,1]	0
o[B,2]	0
z[Z,1]	1
z[Z,2]	1

**Tabla 8:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 1

El modelo se comportó como se esperaba, anticipando correctamente la necesidad de compra en función del lead time. También se observa que el nivel de servicio alcanza el 100 %.

### **Caso de prueba 2: Validación ante demanda no cubierta por falta de presupuesto**

Este caso de prueba introduce una situación crítica para el modelo. Se plantea una demanda puntual de una unidad del repuesto A en el segundo mes, manteniendo el mismo horizonte temporal de 2 meses, 2 repuestos (A y B) y 1 máquina (Z). Se plantea una situación de presupuesto limitado, lo cual impide adquirir la cantidad mínima necesaria del repuesto A para satisfacer la demanda.

El objetivo es verificar si el modelo identifica correctamente la necesidad de parar la máquina debido a la falta de recursos.

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B
Repuestos Nacionales	A, B

**Tabla 9:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 2

Parámetros	Valor
Meses	2
Lead time repuestos Nacionales	1
D[A,Z,1]	0
D[A,Z,2]	1
D[B,Z,1]	0
D[B,Z,2]	0
CostoDesabastecimiento[Z]	3
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
Presupuesto	0

**Tabla 10:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 2

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	0
o[A,1]	0
o[A,2]	0
o[B,1]	0
o[B,2]	0
z[Z,1]	1
z[Z,2]	0

**Tabla 11:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 2

Como era de esperarse, el modelo retornó un valor en la función objetivo de 3 unidades que corresponde al costo de desabastecimiento de tener una máquina parada en el periodo 2, lo que implica un nivel de servicio del 50 %.

### Caso de prueba 3: Validación de abastecimiento anticipado sin restricciones

En este caso se evaluó el comportamiento del modelo frente a una demanda más significativa a lo largo de un horizonte de 3 meses. Se consideró una máquina (Z) y dos repuestos (A y B), ambos de origen nacional. El objetivo fue verificar si el modelo podía cubrir toda la demanda sin generar desabastecimiento. No se impusieron restricciones de presupuesto ni de capacidad de almacén. La demanda fue distribuida en los tres meses, con mayor intensidad en el repuesto A.

A continuación, se detallan los valores de entrada del modelo, los parámetros utilizados y los valores de salida obtenidos:

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B
Repuestos Nacionales	A, B

**Tabla 12:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 3

Parámetros	Valor
Meses	3
Lead time repuestos Nacionales	1
D[A,Z,1]	0
D[A,Z,2]	1
D[A,Z,3]	2
D[B,Z,1]	0
D[B,Z,2]	1
D[B,Z,3]	0
CostoDesabastecimiento[A]	3
CostoCompra[B]	1
CostoCompra[C]	1

**Tabla 13:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 3

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	0
x[A,3]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	0
x[B,3]	0
o[A,1]	1
o[A,2]	2
o[A,3]	0
o[B,1]	1
o[B,2]	0
o[B,3]	0
z[Z,1]	1
z[Z,2]	1
z[Z,3]	1

**Tabla 14:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 3

El modelo respondió correctamente. El valor de la función objetivo dio 4 unidades, siendo igual a la demanda de ambos repuestos en los 3 meses. A su vez, se anticipó a las necesidades de demanda, abasteciendo los repuestos en los periodos previos. No se generaron situaciones de desabastecimiento (nivel de servicio 100%), cumpliendo con el objetivo del caso de prueba.

**Caso de prueba 4: Validación del modelo ante consolidación logística anticipada**

En este caso se buscó evaluar si el modelo optimiza la planificación de compras al considerar el costo de envío para repuestos del Mercosur. Se planteó una situación con un horizonte temporal de 2 meses, 1 máquina (Z) y 2 repuestos (A y B), con origen Mercosur con lead time igual a 1.

Se asignó demanda de una unidad en los tres meses para el repuesto A, mientras que el repuesto B presenta demanda en los meses 2 y 3. El objetivo del caso es verificar si el modelo aprovecha la consolidación de compras del Mercosur para minimizar el costo de envío, sin restricciones de costo ni de almacenamiento.

Dado que todos los repuestos tienen un lead time de 1, y que la demanda comienza ya en el mes 1, no es posible disponer de repuestos al inicio del horizonte. Por tanto, se espera que la máquina esté parada en el mes 1, y que las compras necesarias para cubrir la demanda de los meses 2 y 3 se realicen todas en el mes 1, llegando a tiempo para su utilización.

A continuación, se detallan los valores de entrada, parámetros y salidas del modelo:

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B
Repuestos Mercosur	A, B

**Tabla 15:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 4

Parámetros	Valor
Meses	3
Lead time Mercosur	1
D[A,Z,1]	1
D[A,Z,2]	1
D[A,Z,3]	1
D[B,Z,1]	0
D[B,Z,2]	1
D[B,Z,3]	1
CostoDesabastecimiento[A]	3000
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
Presupuesto	1000
CostoEnvioMercosur	60

**Tabla 16:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 4

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	1
x[A,3]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	1
x[B,3]	0
o[A,1]	2
o[A,2]	0
o[A,3]	0
o[B,1]	2
o[B,2]	0
o[B,3]	0
z[Z,1]	0
z[Z,2]	1
z[Z,3]	1
pedidoMercosur[1]	1
pedidoMercosur[2]	0
pedidoMercosur[3]	0

**Tabla 17:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 4

El costo total obtenido por el modelo es de 3064, valor que coincide con el esperado según la decisión anticipada. Este monto se compone del costo por desabastecimiento (3000), un único costo de envío (60) y la adquisición de cuatro repuestos, cada uno con un costo unitario de 1.

El modelo respondió correctamente. Detectó que, debido al lead time de 1 periodo, no era posible cubrir la demanda del mes 1, por lo que activó la variable de desabastecimiento correspondiente a ese mes. En este caso, como la máquina estuvo operativa durante 2 de los 3 períodos analizados, por lo que el nivel de servicio alcanzado es del 66,67 %. Luego, realizó un único pedido en el mes 1 para abastecer la demanda de los meses 2 y 3, evitando así incurrir en múltiples costos de envío.

#### **Caso de prueba 5: Validación de decisiones con ambas máquinas y capacidad de almacenamiento limitada**

Este caso fue diseñado para verificar el comportamiento del modelo ante un escenario con dos máquinas y dos repuestos, en un horizonte temporal de tres meses. Los repuestos A y B se asignan a las máquinas Z y W respectivamente. Ambos repuestos son de origen Mercosur, con un lead time de un mes. El repuesto A presenta una demanda constante de una unidad en cada uno de los tres meses, mientras que el repuesto B tiene demanda únicamente en los meses 2 y 3. Ambos repuestos son de tamaño mediano, y se define una capacidad total de almacenamiento tal que no permite comprar ni almacenar todas las unidades requeridas en simultáneo.

El objetivo de este caso es comprobar si el modelo es capaz de decidir compras limitadas para abastecer a ambas máquinas, sin superar el límite de capacidad del almacén, aun cuando podría ser conveniente desde el punto de vista económico consolidar compras anticipadas para reducir los costos de envío. Se busca validar si el modelo prioriza el cumplimiento de demanda frente a la restricción de espacio, incluso cuando eso implique asumir más costos de envío por enviar en distintos meses.

A continuación, se presentan los valores de entrada y salida del modelo:

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z, W
Repuestos	A, B
Repuestos Mercosur	A, B

**Tabla 18:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 5

Parámetros	Valor
Meses	3
Lead time repuestos Mercosur	1
D[A,Z,1]	1
D[A,Z,2]	1
D[A,Z,3]	1
D[B,W,1]	0
D[B,W,2]	1
D[B,W,3]	1
CostoDesabastecimiento[Z]	3000
CostoDesabastecimiento[W]	3000
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
S	3
sRepuesto[B]	2
sRepuesto[C]	2
Presupuesto	1000
CostoEnvioMercosur	60

**Tabla 19:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 5

Variables	Valor
x[A,1]	0
x[A,2]	1
x[A,3]	0
x[B,1]	0
x[B,2]	0
x[B,3]	0
o[A,1]	2
o[A,2]	0
o[A,3]	0
o[B,1]	1
o[B,2]	1
o[B,3]	0
pedidoMercosur[1]	1
pedidoMercosur[2]	1
pedidoMercosur[3]	0
CapacidadAlmacen[1]	0
CapacidadAlmacen[2]	2
CapacidadAlmacen[3]	0

**Tabla 20:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 5

El modelo obtuvo un costo total de 3124, resultado de una estrategia que prioriza evitar el desabastecimiento aun a costa de incurrir en mayores gastos de envío. En el mes 1 se compraron 2 unidades del repuesto A y 1 unidad del repuesto B, consolidando parte de la demanda futura. En el mes 2 se realizó una compra adicional de B. Esto implicó pagar el costo de envío de Mercosur en los meses 1 y 2 ( $60 + 60$ ), más 4 unidades compradas a un costo unitario de 1, totalizando 124 en costos. Sin embargo, no se logró abastecer la demanda del repuesto A en el mes 1, por lo que la máquina Z estuvo parada en ese período, generando una penalización por desabastecimiento de 3000. Así, el costo total resulta en un total de 3124.

El modelo respondió de forma coherente con lo esperado. En el primer mes compra dos unidades del repuesto A, una es utilizada en el momento en que llega y la otra es almacenada. En los meses siguientes realiza las compras restantes en función de la disponibilidad de espacio, alternando entre compra y uso inmediato. De esta forma, el modelo prefiere pagar mayores costos de envío a tener que detener una máquina por falta de repuestos, lo cual refleja un comportamiento lógico frente a la penalización por desabastecimiento.

En un segundo paso, para la validación del modelo, se llevaron a cabo casos de prueba de dificultad intermedia, con el objetivo de analizar su desempeño en escenarios más complejos. En esta fase se ejecutaron tres pruebas que permitieron una evaluación más rigurosa del comportamiento del modelo.

#### **Caso de prueba 6: Validación de la restricción de dependencia entre máquinas**

En el caso 6 se consideró un escenario compuesto por dos máquinas (Z y W), cinco meses y cuatro tipos de repuestos: A, B, C y D. Los repuestos A y B corresponden a origen Nacional, mientras que C y D provienen del Mercosur. En cuanto a la asignación, los repuestos A y C fueron destinados a la máquina Z, y los repuestos B y D a la máquina W.

Se espera que en este caso de prueba se verifique que la función objetivo se ajuste a lo esperado según los costos definidos, reflejando adecuadamente el impacto de las decisiones de compra y desabastecimiento. Asimismo, se verificará el cumplimiento de la restricción de relación entre máquinas, que establece que si la máquina Z se detiene, la máquina W también debe forzosamente detenerse en ese período.

<b>Conjuntos</b>	<b>Valor</b>
Máquinas	Z, W
Repuestos	A, B, C, D
Repuestos Nacionales	A, B
Repuestos Mercosur	C, D

**Tabla 21:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 6

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Meses	5
Lead time repuestos Nacionales	1
Lead time Mercosur	3
D[A,Z,1]	1
D[A,Z,2]	1
D[A,Z,3]	0
D[A,Z,4]	0
D[A,Z,5]	0
D[B,W,1]	0
D[B,W,2]	1
D[B,W,3]	0
D[B,W,4]	0
D[B,W,5]	0
D[C,Z,1]	0
D[C,Z,2]	1
D[C,Z,3]	1
D[C,Z,4]	0
D[C,Z,5]	0
D[D,W,1]	0
D[D,W,2]	0
D[D,W,3]	0
D[D,W,4]	2
D[D,W,5]	0
CostoDesabastecimiento[Z]	3000
CostoDesabastecimiento[W]	3000
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
CostoCompra[C]	1
CostoCompra[D]	1
Presupuesto	10000
CostoEnvioMercosur	60

**Tabla 22:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 6

Variables	Valor
o[A,1]	0
o[A,2]	0
o[A,3]	0
o[A,4]	0
o[A,5]	0
o[B,1]	0
o[B,2]	0
o[B,3]	1
o[B,4]	0
o[B,5]	0
o[C,1]	0
o[C,2]	0
o[C,3]	0
o[C,4]	0
o[C,5]	0
o[D,1]	2
o[D,2]	0
o[D,3]	0
o[D,4]	0
o[D,5]	0
z[Z,1]	0
z[Z,2]	0
z[Z,3]	0
z[Z,4]	1
z[Z,5]	1
z[W,1]	0
z[W,2]	0
z[W,3]	0
z[W,4]	1
z[W,5]	1
pedidoM[1]	1
pedidoM[2]	0
pedidoM[3]	0
pedidoM[4]	0
pedidoM[5]	0

**Tabla 23:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 6

Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo se comporta de acuerdo a lo esperado. En este caso, se verificó que tanto la máquina Z como la máquina W se encuentran detenidas durante los meses 1, 2 y 3, cumpliéndose así la restricción de dependencia entre ambas, donde una detención de Z implica forzosamente la detención de W. Un ejemplo claro de esto se observa en el mes 1, donde la máquina W permanece inactiva a pesar de no presentar demanda de ninguno de los repuestos que tiene asignados; dicha parada se explica por el hecho de que la máquina Z sí posee demanda no cubierta en ese período, lo cual activa la dependencia y obliga a detener ambas máquinas.

El valor total de la función objetivo fue de 18063, lo cual se descompone en seis costos de desabastecimiento por parada de máquina (3 meses por 2 máquinas, a un costo de 3000 cada uno), más la compra de tres repuestos y un único costo de envío. Esto demuestra que el modelo prioriza las decisiones óptimas bajo las restricciones impuestas y refleja correctamente

los costos asociados a la operación.

### Caso de prueba 7: Validación del comportamiento del modelo en un escenario extendido

En este caso de prueba se presenta un horizonte de planificación de 10 meses, considerando una única máquina y un total de 10 repuestos asociados. Este caso permite observar de forma más integral el comportamiento del modelo frente a un escenario extendido en el tiempo, con mayor variedad de artículos y múltiples situaciones posibles de cobertura y compra. El objetivo es verificar que el modelo mantenga su coherencia operativa en un contexto más complejo, validando especialmente la asignación eficiente de compras, el cumplimiento del lead time, y la correcta aplicación de penalizaciones por desabastecimiento.

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J
Repuestos Nacionales	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J

**Tabla 24:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 7

Parámetros	Valor
Meses	10
Lead time repuestos Nacionales	1
CostoDesabastecimiento[Z]	3000
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
CostoCompra[C]	1
CostoCompra[D]	1
CostoCompra[E]	1
CostoCompra[F]	1
CostoCompra[G]	1
CostoCompra[H]	1
CostoCompra[I]	1
CostoCompra[J]	1
Presupuesto	10000

**Tabla 25:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 7

Repuesto	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
A	1	1	0	0	0	2	0	0	0	1
B	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
C	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
D	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
E	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0
F	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
G	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
J	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

**Tabla 26:** Demandas mensuales por repuesto - Caso de prueba 7

Los resultados de las variables se encuentran en la Tabla 40 en el Anexo 7.4. Se puede ver que los resultados obtenidos muestran un comportamiento coherente con lo esperado. Se observa que se realizaron compras por un total de 31 repuestos, lo que coincide exactamente con la suma de las demandas que el modelo logró atender dentro del horizonte de planificación. En el mes 1, debido a la restricción impuesta por el lead time, no fue posible abastecer los repuestos requeridos, lo que generó un desabastecimiento y, por tanto, un costo por parada de máquina de 3000. Sumado al costo de adquisición de los repuestos, el valor total de la función objetivo ascendió a 3031, lo cual coincide con lo esperado. No se registraron costos de envío, ya que no se realizaron compras correspondientes a repuestos del Mercosur ni de otros orígenes.

### Caso de prueba 8: Validación del comportamiento ante repuestos faltantes

En este caso de prueba se considera un escenario compuesto por una única máquina, diez repuestos clasificados según su origen (Nacionales, Mercosur y Otros), y un horizonte de planificación de diez meses. El objetivo principal es verificar que el valor obtenido en la función objetivo coincida con el cálculo manual realizado a partir de los parámetros definidos y las decisiones tomadas por el modelo. Además, este caso permite validar el comportamiento de las variables asociadas a los faltantes de repuestos, en particular la variable  $y$  (faltantes operativos por mes) y la variable faltante inicial (faltantes en meses donde el lead time impide la cobertura). Se busca confirmar que estas variables reflejan adecuadamente la lógica de cobertura de demanda frente a restricciones de aprovisionamiento y disponibilidad de stock.

Conjuntos	Valor
Máquinas	Z
Repuestos	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J
Repuestos Nacionales	A, B, C, D, E
Repuestos Otros	F, G, H
Repuestos Mercosur	I, J

**Tabla 27:** Valores de los conjuntos del modelo - caso prueba 8

Parámetros	Valor
Meses	10
Lead time repuestos Nacionales	1
CostoDesabastecimiento[Z]	3000
CostoCompra[A]	1
CostoCompra[B]	1
CostoCompra[C]	1
CostoCompra[D]	1
CostoCompra[E]	1
CostoCompra[F]	1
CostoCompra[G]	1
CostoCompra[H]	1
CostoCompra[I]	1
CostoCompra[J]	1
Presupuesto	10000

**Tabla 28:** Valores de los parámetros del modelo - caso prueba 8

Repuesto	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
A	1	1	0	0	0	2	0	0	0	1
B	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
C	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
D	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
E	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0
F	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
G	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
J	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

**Tabla 29:** Demandas mensuales por repuesto - Caso de prueba 8

Los resultados obtenidos de las variables se encuentran en la Tabla 41 en el Anexo 7.4. A partir de ellos, se verificó nuevamente el correcto funcionamiento del modelo, el cual arrojó un valor de función objetivo de 12.135. Este valor corresponde a cuatro meses de máquina detenida ( $3000 \times 4$ ), dos costos de envío y la adquisición de 15 repuestos para cubrir la demanda factible.

A través de la validación de este caso se observó un comportamiento coherente con el planteo lógico de restricciones. En particular, se verificó que cuando existe demanda de un repuesto en un período anterior o igual a su respectivo lead time, el modelo no realiza la compra correspondiente, ya que no es posible que ese repuesto llegue a tiempo para abastecer dicha demanda. En estos casos, el faltante no se refleja en la variable  $y$ , sino que se acumula en la variable auxiliar faltante inicial, la cual fue diseñada exclusivamente para identificar los repuestos cuya demanda no podrá ser cubierta por motivos logísticos.

Esto permite que el modelo continúe siendo factible y no penalice esos casos de forma automática, pero al mismo tiempo proporciona una herramienta para que el analista pueda, posterior a la ejecución del modelo, identificar qué repuestos presentaron faltantes tempranos por limitaciones de lead time, y evaluar si conviene realizar una compra de urgencia o excepcional fuera del marco optimizado.

Por otro lado, también se comprobó que si la máquina ya está detenida por falta de otro repuesto en ese mismo período, el modelo no incentiva la compra de repuestos adicionales cuya ausencia no impacta directamente en el funcionamiento. Esto es resultado directo de la lógica de la variable binaria  $z$ , que representa la disponibilidad operativa de la máquina. Una vez que la máquina se encuentra inactiva ( $z = 0$ ), el modelo no considera prioritario cubrir la demanda de otros repuestos para esa máquina en dicho mes, incluso si hay lead time suficiente para comprarlos.

Esta lógica es fundamental para optimizar los recursos y evitar compras innecesarias. Sin embargo, exige del usuario una lectura atenta de la salida del modelo, ya que en algunos casos podrían existir repuestos que no se adquirieron simplemente porque la máquina ya estaba parada, y no porque no fueran estrictamente necesarios.

Esto refuerza la importancia de interpretar los resultados del modelo no solo desde la solución óptima, sino también como una herramienta de soporte para la toma de decisiones más amplias.

A partir de los casos de prueba desarrollados, que contemplaron distintas combinaciones

de parámetros y escenarios operativos, se verificó que el modelo responde de forma coherente con la lógica esperada en cada situación. Esto permite afirmar que la formulación actual es adecuada para representar el sistema bajo estudio y puede ser utilizada como base para apoyar decisiones relacionadas con la planificación del stock de repuestos.

Una vez validado el funcionamiento del modelo mediante casos de prueba controlados, se procede a su aplicación utilizando datos reales del sistema. Esta etapa tiene como objetivo analizar el comportamiento del modelo frente a situaciones reales de demanda, costos, restricciones logísticas y presupuestarias.

#### **5.2.4. Ejecución del modelo con datos reales**

##### **Determinación de parámetros**

Para alimentar el modelo de optimización con datos reales, se partió de un universo inicial de 120 repuestos utilizados en el sistema productivo de la empresa. Sin embargo, como ya se explicó anteriormente, se realizó una selección de únicamente 30 repuestos, distribuidos equitativamente entre las dos máquinas consideradas: el Laminador y la Soldadora. Este recorte implicó la necesidad de ajustar diversos parámetros, procurando mantener relaciones proporcionales entre ellos para que los resultados del modelo continuaran siendo representativos del comportamiento observado en la realidad.

El horizonte de planificación se fijó en 12 meses, permitiendo capturar la dinámica completa de decisiones de compra, consumo y eventuales faltantes dentro de un ciclo anual.

Uno de los parámetros más sensibles fue el costo de desabastecimiento. En el sistema real, el impacto económico de una parada de máquina es elevado; sin embargo, al reducir la cantidad de repuestos modelados, fue necesario ajustar este valor para evitar una distorsión en la función objetivo. Aun así, se procuró que el costo de desabastecimiento mantuviera su rol prioritario dentro del modelo, asignándole un valor superior al del repuesto más costoso entre los 30 considerados, lo cual refuerza su peso relativo en la toma de decisiones.

Los costos unitarios de compra de repuestos se tomaron directamente del sistema SAP, utilizando como referencia los valores registrados durante el año 2024. Esto aseguró la incorporación de datos actualizados y coherentes con el contexto operativo. Dado que la variabilidad de precios a lo largo del tiempo ha sido históricamente baja en este tipo de artículos, se asumió razonablemente que dichos valores son representativos, sin contemplar ajustes por inflación.

En cuanto a los costos logísticos, se incorporaron costos fijos diferenciados por origen del proveedor: para repuestos provenientes del Mercosur y para aquellos del resto del mundo. Ambos fueron estimados a partir de promedios históricos correspondientes al mismo año, manteniendo así la relación de costos logísticos observada en la práctica.

Respecto a la capacidad de almacenamiento, se consideró que en la planta existen espacios físicos disponibles que evitan que el stock de repuestos se convierta en un recurso crítico. Por esta razón, se asignó un valor suficientemente alto al parámetro de capacidad, garantizando que no actúe como una restricción en el modelo y permitiendo que las decisiones se guíen principalmente por criterios económicos y de cobertura.

De manera similar, el presupuesto máximo anual se determinó con base en el presupuesto real, pero adaptado a la escala del modelo. Al igual que con la capacidad de almacenamiento,

se buscó evitar que este parámetro impusiera restricciones artificiales, ya que en la operación real el presupuesto no representa una limitación estricta para la reposición de repuestos críticos.

Para representar adecuadamente los tiempos de entrega, se diferenciaron los lead times en función del origen del repuesto: nacional, Mercosur u otros. Se utilizaron los promedios históricos para cada categoría, reflejando así la mayor demora asociada a la logística internacional. Finalmente, se asignó a cada repuesto una clasificación simbólica según su volumen: chico, mediano o grande, correspondiente a 1, 2 o 3 unidades de espacio respectivamente. Esta clasificación permitió introducir restricciones de almacenamiento de manera simplificada, manteniendo su influencia relativa sin requerir mediciones físicas exactas.

En conjunto, estos criterios permitieron construir un conjunto de datos de entrada que, si bien simplificado, conserva las relaciones esenciales del sistema real, asegurando así que el modelo mantenga su validez analítica y su utilidad como herramienta de apoyo a la planificación operativa.

## **Resultados obtenidos**

### **Resolución computacional del modelo**

El modelo de optimización fue resuelto satisfactoriamente mediante el solver GLPK. Los datos de entrada usados se pueden observar en el Anexo [7.5](#).

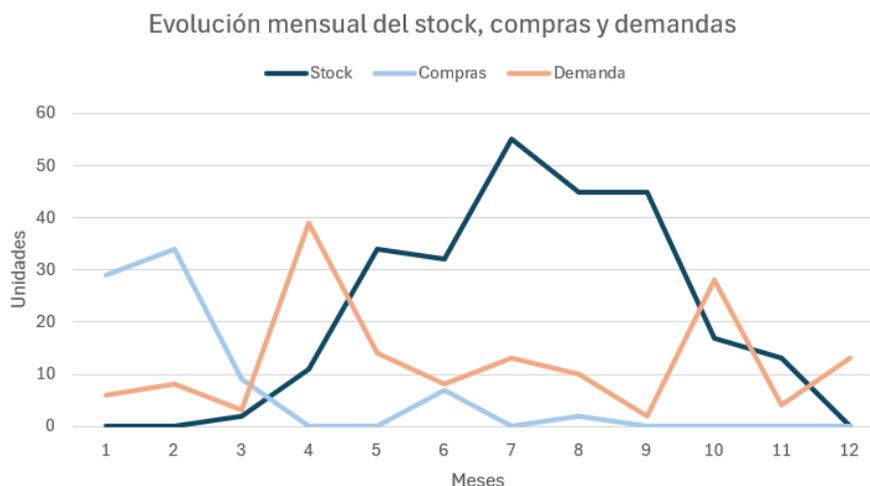
El proceso de resolución del modelo concluyó exitosamente con la obtención de una solución óptima para un problema de programación lineal entera mixta (MILP). La formulación incluye principalmente variables continuas como las asociadas a niveles de stock, cantidades adquiridas y demandas no cubiertas, pero también incorpora variables binarias para modelar decisiones estratégicas, como la activación de máquinas y la generación de pedidos internacionales. Debido a esta estructura, el solver GLPK aplicó su algoritmo de ramificación y acotamiento (branch & bound), que consiste en resolver primero la relajación lineal del modelo y luego explorar sistemáticamente un árbol de decisiones para garantizar la integralidad de las variables discretas. El proceso finalizó con éxito, alcanzando un valor de función objetivo de 4.960.716, que representa el costo total acumulado de compras, faltantes y envíos de repuestos durante los doce meses del horizonte de planificación. La resolución se completó en menos de un segundo, utilizando aproximadamente 2 MB de memoria, y con una brecha de optimalidad nula (0,0%), lo que confirma la solidez y precisión de la solución obtenida.

### **Costos y presupuesto**

El costo total surge de la combinación de tres componentes principales: las compras de repuestos, los costos asociados al desabastecimiento y los costos logísticos por envíos. En primer lugar, las adquisiciones de repuestos representan un total de 1,32 M (26,6% del total), reflejando las decisiones de compra óptimas sugeridas por el modelo para cubrir la demanda planificada. En segundo lugar, el desabastecimiento, entendido como la imposibilidad de mantener operativas las máquinas por falta de repuestos disponibles, implica un costo de 3,6 M (72,6%), lo cual evidencia la magnitud del impacto económico de las paradas productivas. Por último, los costos de envío vinculados a los pedidos consolidados alcanzan un valor marginal de 0,04 M (0,8%).

### **Plan de compras**

En términos de estrategia de compras, el modelo concentró las órdenes casi exclusivamente en los primeros meses del año, como se muestra en la Figura 28. Los meses 1 y 2 concentraron la mayoría de las adquisiciones, coincidiendo con la activación de pedidos consolidados a proveedores del Mercosur y de otros orígenes. Esta anticipación busca minimizar riesgos de desabastecimiento, asegurando la llegada oportuna de los repuestos según los plazos de entrega definidos (1 mes para nacionales, 3 meses para Mercosur y 6 meses para Otros).



**Figura 28:** Evolución mensual del stock, compras y demandas - elaboración propia.

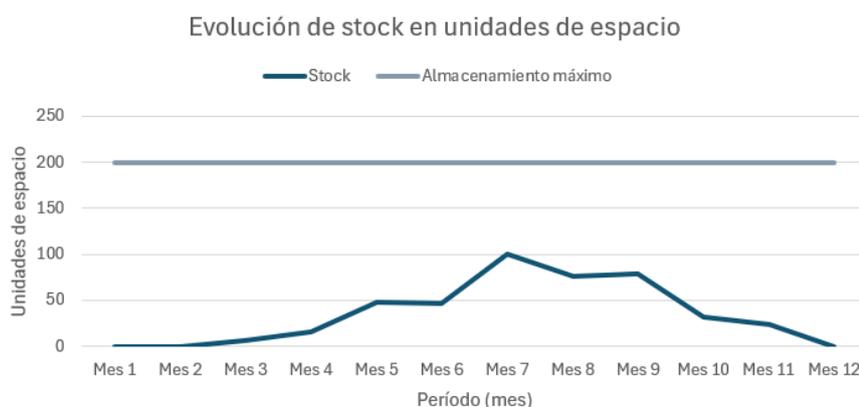
Durante este período inicial, el stock disponible se mantiene prácticamente en cero, ya que el modelo parte sin inventario inicial y los repuestos aún están en tránsito debido a los tiempos de entrega. A partir del mes 4 se produce un cambio significativo ya que comienzan a recibirse los repuestos comprados en los primeros meses y el stock se incrementa rápidamente, anticipándose a un fuerte pico de demanda registrado en ese mismo mes. Esta sincronización entre el incremento de stock y la demanda sugiere que el modelo logró establecer una respuesta coordinada, utilizando las compras tempranas para abastecer un consumo futuro previsible.

Entre los meses 4 y 7, el stock continúa en aumento hasta alcanzar su punto máximo, mientras la demanda se mantiene activa pero en niveles más bajos. Este comportamiento evidencia una política de acumulación planificada, pensada para cubrir eventuales altos niveles de demanda sin necesidad de nuevas compras. Luego del mes 3 las compras se reducen drásticamente y solo se observa un leve aumento en el mes 6. A partir del mes 7, el modelo deja de comprar y comienza a consumir el inventario acumulado, acompañando un nuevo ciclo de demanda creciente.

La comparación entre las curvas muestra que, si bien al inicio del horizonte el stock y la demanda no guardan relación directa debido al desfase generado por los tiempos de entrega; en el correr de los meses se observa un acoplamiento progresivo entre ambos, los niveles de stock aumentan o se mantienen estables en los períodos que preceden a altos niveles de demanda, y luego disminuyen cuando esta se activa. Este alineamiento indica que el modelo no solo anticipa correctamente la demanda, sino que también administra adecuadamente los recursos sin generar excesos ni faltantes. Finalmente, el modelo concluye el horizonte sin inventario remanente, lo que reafirma su capacidad para optimizar tanto las compras como el uso del espacio de almacenamiento disponible.

## Capacidad de almacén

El uso del espacio de almacenamiento también evidencia una política anticipada de aprovisionamiento, como se puede observar en la Figura 29. Durante los primeros seis meses, el stock en unidades de espacio crece gradualmente, reflejando la llegada progresiva de pedidos realizados al inicio del horizonte. Se registra un salto relevante en el mes 5 y un pico en el mes 7, momento en el cual ambas máquinas están operativas simultáneamente. El volumen de stock en ese mes supera las 90 unidades de espacio. A partir del mes 8, el inventario desciende de forma sostenida, sin evidencia de nuevas compras. Además, cabe destacar que en ningún momento se alcanza el límite físico del almacén, lo cual respalda que la restricción de capacidad no condiciona la solución óptima del modelo.



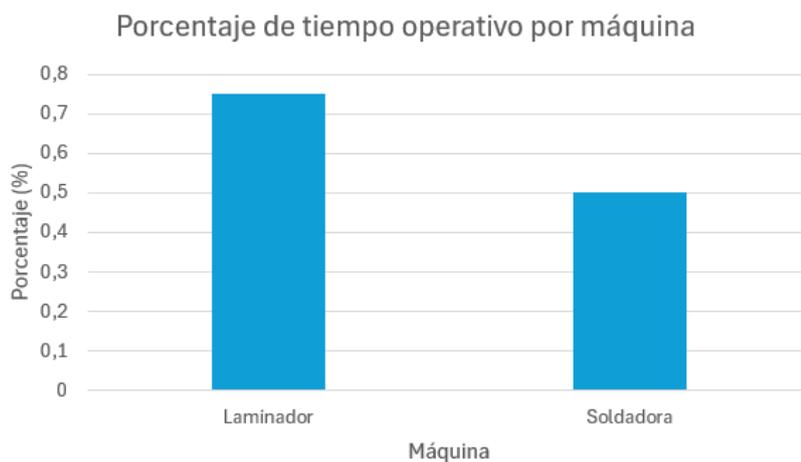
**Figura 29:** Evolución de stock en unidades de espacio - elaboración propia.

Asimismo, se observa que en el mes 12, correspondiente al final del período analizado, el modelo no mantiene stock remanente ni realiza nuevas compras. Esta decisión es consistente con el objetivo del modelo, que busca minimizar costos y no dejar inventario sobrante al cierre del horizonte temporal. En este contexto, cerrar con inventario cero es una solución eficiente desde el punto de vista del modelo.

No obstante, es importante destacar que esta situación responde a una condición artificial del modelo, que asume un horizonte de planificación finito y no considera de forma explícita la continuidad operativa del sistema más allá del mes 12. En la práctica, se espera que el proceso de planificación sea dinámico y continuo, actualizándose de forma periódica conforme avanza el tiempo. Por tanto, si bien el modelo cierra el stock en cero de forma óptima, en una implementación real esta política debería adaptarse a un enfoque de planificación rodante que mantenga la cobertura futura de la demanda más allá del horizonte actual.

## Operatividad de las máquinas

En cuanto al desempeño operativo, la Figura 30 muestra el porcentaje de tiempo en que cada máquina estuvo operativa. El Laminador funcionó durante 9 de los 12 meses, con interrupciones en los meses 1, 2 y 4. Desde el mes 5, mantuvo una operación continua hasta el final del año. Esta indisponibilidad inicial se explica por la falta de repuestos en los primeros meses, consecuencia de un inventario inicial nulo y de los tiempos de entrega asociados.



**Figura 30:** Porcentaje de tiempo operativo por máquina - elaboración propia.

Por su parte, la Soldadora sólo logró operar durante 6 meses del año, comenzando en el mes 7. Su retraso operativo se vincula con su mayor dependencia de repuestos del grupo Otros, los cuales poseen lead times más extensos. Esto evidencia cómo las decisiones de compra condicionadas por los tiempos de entrega impactan directamente en la disponibilidad de las máquinas, resultando comprensible que el desabastecimiento constituya el componente de mayor peso dentro de la función objetivo,

## Compras por repuestos

Además de permitir un análisis general sobre la estrategia óptima de compras, los resultados del modelo facilitan una evaluación desagregada por repuesto. Esto permite identificar el comportamiento individual de cada ítem y analizar su contribución específica a las decisiones de adquisición. Por ejemplo, como se muestra en la Tabla 30, es posible realizar un análisis detallado sobre las cantidades efectivamente adquiridas.

<b>Repuesto</b>	<b>Unidades adquiridas</b>
Bobina	0
Brazo de la horquilla	0
Cabezal	0
Deckplatte	8
Disc Scheibe aussen	0
Disc Scheibe innen	2
Elektrodhenal	3
Embrague	2
Emisor	0
Emisor optico	0
Fotocelula	7
Fuelle metalico	2
Holder	2
Kanal	1
Klappe	8
Micro interruptor	1
Modulo salida digital	11
Planchuelas	9
Receptor	2
Reductor	0
Reflector LED	1
Rodamiento 2Z	2
Rodamiento 32008X	8
Rodamiento SR21	1
Rodillo de enderezar	0
Sensor inductivo	7
Solapa 150 izquierda	0
Thermistor proteccion motor	1
Valvula direccional	1
Variador de Frecuencia	2

**Tabla 30:** Unidades adquiridas por repuesto

De esta, se desprende que 13 de los 30 repuestos evaluados no registraron adquisiciones a lo largo del horizonte de planificación. Esta ausencia de compras puede atribuirse, en algunos casos, a que dichos repuestos no presentaron demanda durante el año. En otros, aunque sí hubo demanda, esta ocurrió en los primeros meses y no pudo ser cubierta a tiempo debido a los plazos de entrega estipulados en el modelo (lead times), que impiden que los repuestos lleguen antes de que la necesidad ocurra.

Por otro lado, los 17 repuestos restantes sí fueron objeto de compras, acumulando un total de 81 unidades adquiridas a lo largo del año. Todas estas unidades fueron efectivamente utilizadas, lo que se constata al comprobar que el modelo culmina el mes 12 sin stock remanente. Esta eficiencia en el uso del inventario respalda la idea de que el modelo está diseñado para minimizar sobrantes innecesarios y ajustar las decisiones de compra de forma alineada con la demanda proyectada.

### **Faltante inicial**

En línea con este análisis, otro aspecto relevante que permiten identificar resultados del modelo son los faltante inicial, es decir, aquellas demandas tempranas que no pueden ser

cubiertas debido a los tiempos de entrega requeridos. Un ejemplo representativo es el caso del “Módulo salida digital”, un repuesto de origen Mercosur con un lead time de tres períodos. Presenta una demanda de 3 unidades en el mes 1 y de 1 unidad en el mes 2, pero como las órdenes emitidas en el mes inicial recién pueden recibirse en el mes 4, la cobertura de esa demanda resulta inviable. Esta situación se refleja correctamente en la variable faltante inicial, que toma el valor 4 para este repuesto.

### **Aplicabilidad práctica del modelo**

Finalmente, es importante resaltar que el modelo desarrollado no constituye un plan de compras definitivo, sino una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Su principal valor radica en la capacidad de anticipar necesidades, evitar faltantes, optimizar el uso del presupuesto y del espacio de almacenamiento. Las decisiones obtenidas deben ser interpretadas y complementadas con el conocimiento técnico y el contexto operativo específico de la planta. Además, en caso de ser necesario, el modelo puede volver a ejecutarse en cualquier momento del horizonte de planificación, utilizando datos actualizados de demanda, consumo o disponibilidad presupuestaria. Esto permite replanificar las decisiones iniciales de forma continua, ajustándolas a la realidad operativa.

#### **5.2.5. Análisis de sensibilidad**

A continuación se describe el análisis de sensibilidad realizado, el cual permitió evaluar cómo varían los resultados del modelo frente a cambios en sus parámetros clave. Esta herramienta resulta esencial para identificar cuáles variables tienen un mayor impacto sobre las decisiones óptimas, así como para explorar la estabilidad de las soluciones ante fluctuaciones en los datos. A partir de este análisis es posible proponer recomendaciones más robustas y confiables para la toma de decisiones.

#### **Análisis de sensibilidad frente a la demanda**

En primer lugar se realiza el análisis de sensibilidad frente a la demanda. Dado que la demanda futura de repuestos no puede preverse con certeza, se planteó un análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar la robustez del modelo ante distintos escenarios posibles. Para ello, se consideraron tres escenarios de demanda generados a partir del ajuste a la distribución de Stuttering Poisson, (ver en el Anexo 7.6, las Figuras 53, 54 y 55). El escenario bajo contempla valores aleatorios en el rango  $(0, 0,8]$  de la función de distribución acumulada, lo que resulta predominantemente en demandas nulas o bajas, que son las más frecuentes según los datos históricos. El escenario medio utiliza valores entre  $(0,8 \text{ y } 0,9]$ , capturando situaciones de demanda moderada. Finalmente, el escenario alto se genera con valores entre  $(0,9 \text{ y } 0,95]$ , representando contextos menos frecuentes pero más exigentes en términos de consumo. La elección de estos rangos se basa en un análisis exploratorio de la demanda histórica de múltiples repuestos, donde se observó que esta segmentación permite construir escenarios que reflejan de mejor manera las condiciones operativas.

El modelo de optimización fue resuelto de forma independiente para cada uno de estos escenarios, manteniendo constantes el resto de los parámetros. En cada ejecución se registraron los valores obtenidos para la función objetivo, las cantidades compradas, el comportamiento del stock, la ocurrencia de desabastecimientos y la cantidad de períodos en los que las máquinas quedaron inoperativas.

En primer lugar, se observa un incremento progresivo en el valor de la función objetivo

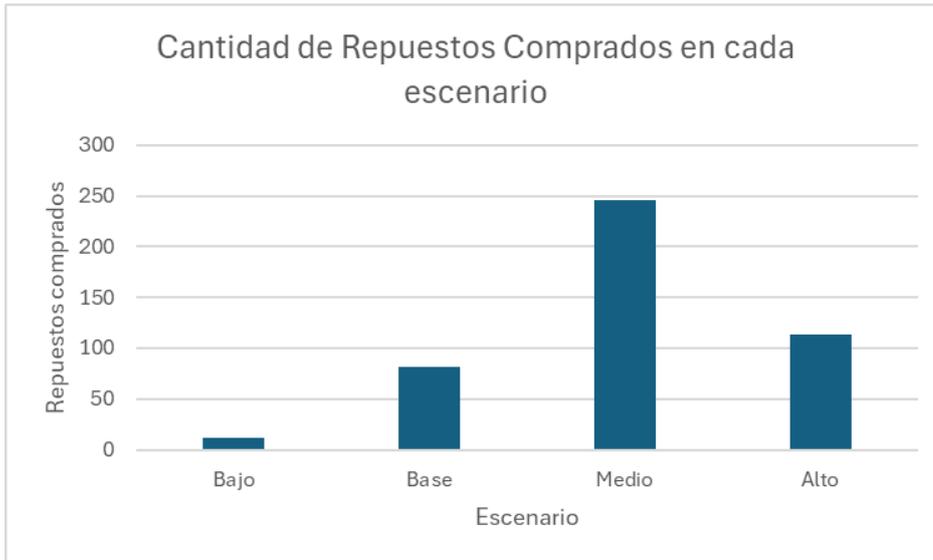
a medida que se transita de un escenario de baja a alta demanda. El modelo devuelve un costo total de aproximadamente 1,1 millones en el escenario bajo; 6,5 millones en el escenario medio, y 9,1 millones en el escenario alto. Estos resultados se comparan con el escenario base, cuyo valor es de 4,96 millones. En la Tabla 31, se presentan los valores de cada escenario junto con su variación porcentual respecto al caso base.

Escenario	Función Objetivo	Variación vs Base
Bajo	\$1.120.000	-77,4 %
Base	\$4.960.716	-
Medio	\$6.540.000	+31,9 %
Alto	\$9.144.144	+84,3 %

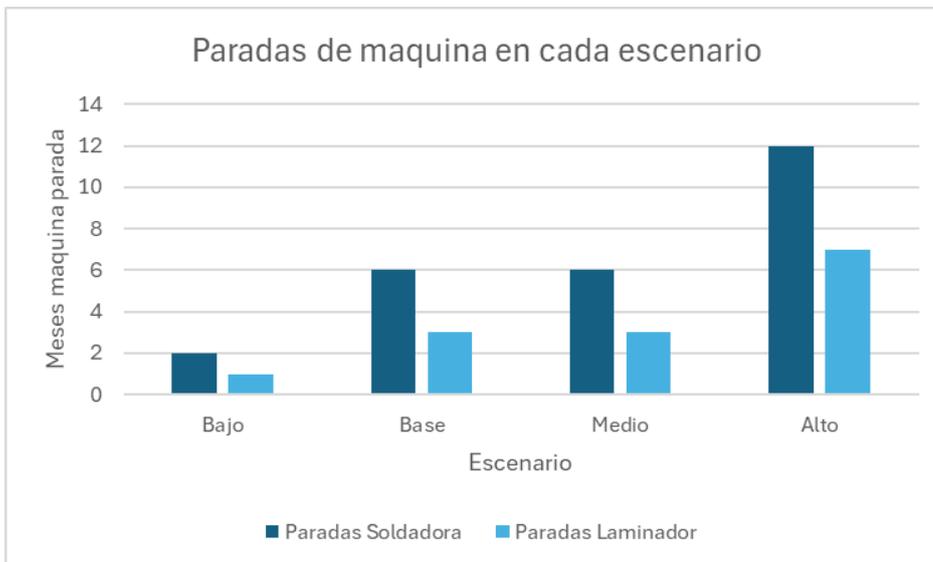
**Tabla 31:** Comparación de la función objetivo por escenario

Un comportamiento llamativo se observa al comparar las decisiones de compra entre los distintos escenarios de demanda. En el escenario base, se adquieren 81 unidades de repuestos. En el escenario bajo, el modelo reduce las compras a tan solo 12 unidades, lo cual es coherente con una demanda mínima. En el escenario medio, se alcanza el mayor volumen de adquisiciones, con 246 unidades compradas, evidenciando una política preventiva por parte del modelo para evitar faltantes y asegurar operatividad. Sin embargo, en el escenario alto, a pesar de que la demanda es mayor, el modelo adquiere únicamente 113 repuestos. Esta aparente contradicción se explica al analizar el costo de compra para abastecer todos los repuestos frente al costo de desabastecimiento. Dado que el costo de desabastecimiento por máquina detenida es de 400.000 por mes, en el escenario alto el modelo evalúa que cubrir completamente la demanda implicaría un costo de adquisición mayor. Por lo tanto, opta por permitir mayores niveles de desabastecimiento, reduciendo las compras y aceptando más paradas como estrategia óptima.

Este comportamiento no solo se justifica al observar la función objetivo, que incorpora ambos costos, sino también al revisar el número de meses en que cada máquina permanece detenida. En el escenario alto, la Soldadora se encuentra inactiva durante los 12 meses del año, mientras que el Laminador solo logra operar en 5 de ellos. En cambio, en el escenario medio, ambas máquinas mantienen una inoperatividad significativamente menor (4 y 6 meses respectivamente), lo cual refuerza la idea de que el modelo adapta sus decisiones estratégicamente, priorizando la alternativa menos costosa según las condiciones del escenario. Este análisis, complementado con las Figuras 31 y 32, permite validar el funcionamiento coherente del modelo bajo distintos niveles de presión de demanda.



**Figura 31:** Repuestos comprados por escenario - elaboración propia.



**Figura 32:** Cantidad de meses de maquina parada por escenario - elaboración propia.

Este conjunto de decisiones refleja que el modelo es capaz de adaptarse a las condiciones operativas y económicas impuestas en cada escenario. Demuestra robustez al evitar soluciones erráticas o discontinuas, y sensibilidad al ajustar su estrategia de compra y cobertura según el nivel de exigencia. El modelo constituye una herramienta sólida para apoyar la toma de decisiones bajo incertidumbre, ya que permite simular distintos entornos de presión de demanda y anticipar cómo se verían afectadas tanto las compras como la disponibilidad de las máquinas.

### **Análisis de sensibilidad frente al costo de desabastecimiento**

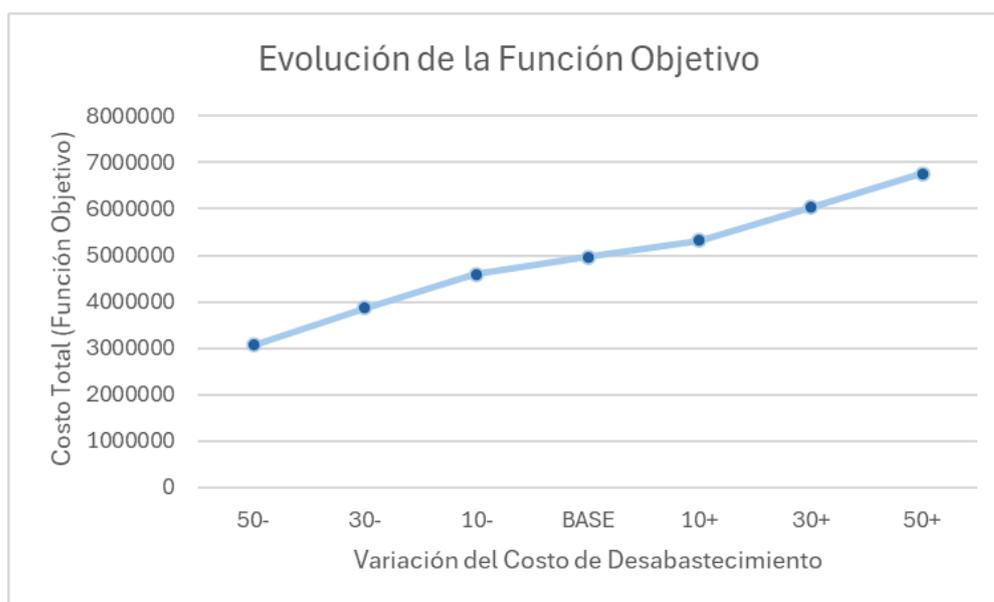
En primer lugar, se analizó cómo afectan las decisiones óptimas las modificaciones en el parámetro de costo de desabastecimiento. Para ello, se consideraron variaciones del 50%, 30% y 10% por debajo y por encima del valor base, manteniendo constante el resto de los parámetros. Esta sensibilidad permite evaluar en qué medida el modelo responde ante cambios en la penalización asociada a la falta de repuestos y cómo se ajustan las compras en

función de ello. Los resultados obtenidos luego de correr los 6 escenarios se pueden observar en la Tabla 32.

Variación	Función Objetivo	Variación (%)	# Paradas Soldadora	# Paradas Laminador
-50 %	3.063.417	-38,2 %	8	4
-30 %	3.873.684	-21,9 %	7	3
-10 %	4.600.716	-7,3 %	6	3
Base	4.960.716	0,0 %	6	3
+10 %	5.320.716	+7,3 %	6	3
+30 %	6.040.716	+21,8 %	6	3
+50 %	6.760.716	+36,3 %	6	3

**Tabla 32:** Sensibilidad de la función objetivo y paradas de máquina ante variaciones en el costo de desabastecimiento.

Por otro lado, se puede observar en la Figura 33, que la función objetivo crece de forma monótona con el aumento del costo de desabastecimiento, lo cual refleja un comportamiento coherente por parte del modelo. La variación en el valor del parámetro de desabastecimiento impacta directamente en la función objetivo, ya que dicho valor se multiplica por la cantidad de períodos en los que una máquina está inoperativa. Por lo tanto, incluso si el número de paradas se mantiene constante, un mayor/menor costo unitario por desabastecimiento genera automáticamente un incremento/disminución en el valor total de la función objetivo.

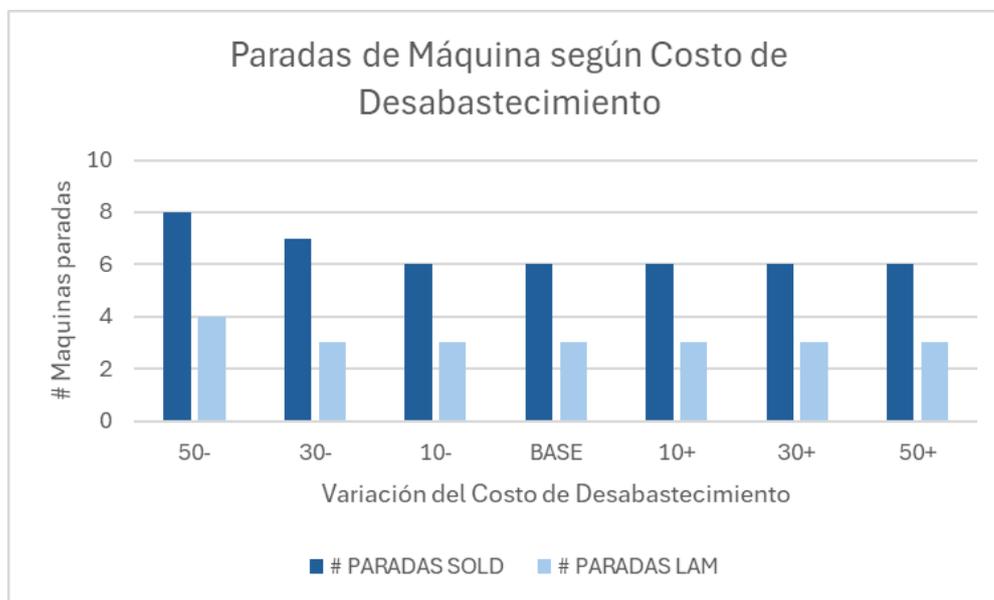


**Figura 33:** Variación de la función objetivo según la variación de costo de desabastecimiento - elaboración propia.

Respecto a las paradas de máquina, se observa una clara sensibilidad de la Soldadora ante las variaciones en el costo de desabastecimiento. En el escenario base, la soldadora presenta 6 meses de inactividad, y este valor se mantiene constante incluso cuando el costo de desabastecimiento se incrementa hasta un 50%. Esto indica que, independientemente de la penalización económica impuesta, existen limitaciones estructurales, asociadas a los extensos plazos de entrega, que impiden una mayor reducción de las paradas. De hecho, en escenarios con costos de desabastecimiento más bajos (50%-), el modelo permite hasta 8 meses sin operación, priorizando minimizar los costos totales. Por tanto, no resulta útil seguir incrementando este parámetro en nuevos escenarios, ya que 6 meses de parada constituye, en la

práctica, el mejor resultado alcanzable.

Por el contrario, el laminador muestra un comportamiento mucho más estable: se detiene entre 3 y 4 veces al año, sin cambios significativos a pesar de las variaciones en los costos, lo que evidencia una menor dependencia de repuestos críticos con plazos de entrega largos. Este comportamiento puede visualizarse en la Figura 34.



**Figura 34:** Cantidad de paradas anuales por máquina en función del costo de desabastecimiento - elaboración propia.

El modelo demuestra ser tanto robusto como sensible frente a las variaciones del parámetro de costo por desabastecimiento. La robustez se manifiesta en el hecho de que, al modificar dicho parámetro, el modelo sigue generando soluciones factibles y coherentes, sin presentar comportamientos erráticos, interrupciones abruptas en las decisiones, ni resultados contradictorios. Por su parte, la sensibilidad se refleja en que el modelo ajusta adecuadamente sus decisiones.

### Análisis de sensibilidad frente al presupuesto

A continuación, se presenta un análisis de sensibilidad enfocado en el presupuesto disponible para la adquisición de repuestos. Partiendo de un presupuesto original de 4.000.000, se construyeron dos escenarios alternativos con recortes significativos: uno con una reducción del 70%, lo que limita el presupuesto a 1.200.000, y otro con una reducción del 80%, fijándolo en 800.000. El objetivo es evaluar cómo estas restricciones afectan el comportamiento del modelo en términos de costos totales, decisiones de compra y operatividad de las máquinas.

En primer lugar, se observa que el valor de la función objetivo en el escenario base es de 4.960.716, mientras que en el primer escenario con presupuesto reducido, asciende a 5.073.684, lo que representa un incremento del 2,28%. Este leve aumento se explica porque el presupuesto inicial estaba ampliamente sobredimensionado. De hecho, el modelo utilizó efectivamente sólo 1.320.720 en el escenario base, muy por debajo del tope presupuestal disponible. Por esta razón, se construyó un nuevo escenario restringido con un presupuesto ajustado a 1.200.000, lo que equivale a una reducción del 9,15% respecto al gasto real del modelo base, y no del presupuesto total original.

En cuanto al comportamiento operativo de las máquinas, la diferencia clave se presenta en el mes 10, cuando el modelo con presupuesto limitado decide detener la Soldadora, mientras que el Laminador se mantiene operativo, igual que en el caso base. Esta decisión responde a que el modelo reconoce que apagar el Laminador implica forzosamente detener ambas máquinas, lo cual genera una penalización más alta. Por lo tanto, frente a una restricción presupuestaria, el modelo prefiere priorizar el funcionamiento del Laminador, aun si eso implica apagar la Soldadora de manera puntual, ya que permite seguir cubriendo parte de la demanda y minimizar la penalización asociada al desabastecimiento.

Luego, se analizó un escenario aún más restrictivo, con una reducción del 80% del presupuesto total original, lo que implicó limitar el presupuesto a 800.000. El modelo obtuvo una solución óptima con un valor de función objetivo de 5.463.417, lo que representa un aumento del 10,13% respecto al escenario base. Este crecimiento más pronunciado refleja la dificultad adicional para cubrir la demanda manteniendo la operatividad de las máquinas, lo que evidencia que recortes presupuestales más severos intensifican de manera significativa el incremento de los costos totales.

El comportamiento de las máquinas muestra nuevamente que el modelo respeta la lógica de encendido estructural: prefiere sacrificar a la Soldadora antes que al Laminador, dado que detener este último implica necesariamente apagar ambas máquinas por la restricción impuesta. Sin embargo, en este escenario, el modelo llega incluso a apagar ambas máquinas en el mes 8, lo que evidencia una tensión mayor en la planificación. En total, la Soldadora se encuentra apagada en ocho meses (meses 1 al 6, mes 8 y 10), mientras que el Laminador sólo se apaga en cuatro meses puntuales (1, 2, 4 y 8).

Mes	Laminador (Base)	Laminador (-70 %)	Laminador (-80 %)	Soldadora (Base)	Soldadora (-70 %)	Soldadora (-80 %)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	0	0	0
6	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	0	0
11	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1

**Tabla 33:** Activación mensual por máquina en los tres escenarios

Un aspecto que resulta central para interpretar por qué la función objetivo no se incrementa drásticamente frente a una reducción tan severa del presupuesto es el comportamiento combinado de las compras y las paradas de máquina. El modelo con presupuesto base adquiere 81 unidades de repuestos, mientras que aún con una reducción del 80% el modelo logra concretar más de la mitad de las compras, lo cual permite mantener buena parte de la operatividad planificada. Esto ocurre porque el modelo, ante la imposibilidad de adquirir todos los repuestos, opta por apagar las máquinas, absorbiendo el costo de desabastecimiento y evitando el costo de compra de los ítems asociados a esas máquinas.

Además, es importante notar que las decisiones de parada no varían de forma tan significativa. En el escenario base, la Soldadora está apagada durante seis meses, mientras que en el escenario con 80 % de recorte solo se apaga dos meses más. En el caso del Laminador, se apaga tres meses en el escenario base y cuatro en el escenario más restringido. Esta diferencia marginal en la operatividad, frente a una diferencia muy significativa en el presupuesto disponible, explica por qué el valor de la función objetivo no se incrementa de forma abrupta, el modelo sacrifica pocas semanas adicionales de funcionamiento, lo que permite absorber buena parte del recorte mediante ahorro en compras, sin incurrir en penalizaciones excesivas por desabastecimiento.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo presenta un comportamiento estable y robusto ante reducciones moderadas del presupuesto. A pesar de aplicar recortes sobre el presupuesto total disponible, el modelo sigue encontrando soluciones factibles y prioriza de forma coherente la operatividad del sistema. Los valores obtenidos en la función objetivo reflejan una buena capacidad de adaptación del modelo a diferentes niveles de restricción financiera. Además, en todos los escenarios analizados, el modelo toma decisiones consistentes con la lógica operativa impuesta por las restricciones estructurales, manteniendo encendido el Laminador siempre que sea posible. Estos resultados evidencian que el modelo no solo es matemáticamente robusto, sino también operativo y confiable para apoyar decisiones de planificación en contextos industriales con recursos limitados.

## 6. Conclusiones

El presente trabajo abordó de forma integral dos problemáticas críticas dentro del entorno industrial, la falta de organización en las áreas de trabajo y la ausencia de una estrategia sistematizada para la planificación de compras de repuestos. Para ello, se diseñaron dos líneas de acción complementarias: la implementación de la metodología 5S y el desarrollo de un modelo de optimización matemática.

La revisión sistemática de literatura permitió establecer un marco teórico robusto que fortaleció la validez del trabajo. Este sustento aseguró que las soluciones propuestas estuvieran respaldadas en evidencia científica y no solo en criterios empíricos, lo que incrementa la confiabilidad y aplicabilidad de los resultados alcanzados. Dicho marco, además, sirvió como punto de partida para ambas líneas de acción planteadas.

El análisis de la literatura sobre la metodología 5S confirmó su eficacia en la mejora de la eficiencia, seguridad y organización en entornos industriales, al tiempo que advirtió sobre las barreras para su sostenibilidad. Este conocimiento permitió adaptar la herramienta al contexto específico de la planta, enfocándose en sus tres primeras etapas como paso inicial hacia una transformación más profunda.

En el ámbito de la gestión de inventarios, la revisión de múltiples enfoques, desde modelos determinísticos hasta estocásticos y desde métodos paramétricos tradicionales hasta aproximaciones más complejas, permitió reconocer sus principales alcances y limitaciones. Este análisis concluye que la selección de un conjunto reducido pero relevante de trabajos resultó determinante para sustentar conceptualmente el modelo de optimización planteado, asegurando que respondiera de manera coherente a las necesidades específicas del caso estudiado.

En síntesis, el marco teórico logrado a partir de la revisión sistemática construyó los cimientos conceptuales del proyecto. No solo guió la formulación del modelo y la planificación de las intervenciones, sino que otorgó respaldo académico a cada decisión tomada, asegurando que las soluciones propuestas no respondieran exclusivamente a criterios empíricos o intuitivos, sino que se sustentaran en evidencia científica y buenas prácticas.

En relación con la metodología 5S, la intervención focalizada en sus tres primeros sentidos permitió dar inicio a un proceso sostenido de mejora en el entorno de trabajo. La aplicación inicial evidenció la existencia de importantes oportunidades de orden y disciplina, lo que confirmó la pertinencia de implementar un plan de acción específico. De esta forma, el proyecto no sólo impulsó mejoras inmediatas en el entorno de trabajo, sino que también consolidó la práctica de evaluación continua como base para sostener la transformación cultural.

El desarrollo de herramientas digitales, como el formulario para relevar el inventario de repuestos a nivel de planta y el archivo automatizado en Excel para gestionar ingresos y egresos de stock, consolidó la trazabilidad y el control de los repuestos. Estas iniciativas, complementadas con planillas de auditoría, flujogramas y cronogramas de tareas, confirmaron que es posible conformar un sistema robusto de gestión capaz de dar seguimiento a las prácticas implementadas, detectar desvíos en tiempo real y facilitar la estandarización. En conjunto, estas acciones aseguraron que las mejoras alcanzadas no quedaran en intervenciones puntuales, sino que se transformaran en mecanismos sostenibles de control y disciplina operativa.

La clasificación y señalización de los tachos de residuos, junto con la planificación sistemática de la limpieza periódica, confirmaron la efectividad de incorporar rutinas visuales y responsabilidades compartidas. Estas medidas fortalecieron la gestión ambiental y contribuyeron a consolidar un entorno de trabajo más ordenado, seguro y disciplinado, complementando así las mejoras digitales previamente implementadas.

La determinación de la capacidad máxima de almacenamiento y la propuesta de reorganización del layout evidenciaron la posibilidad de optimizar el uso del espacio físico y mejorar la eficiencia operativa. Este avance permitió definir criterios claros para anticipar limitaciones y garantizar la continuidad productiva aun en escenarios de alta ocupación, reforzando los logros de organización alcanzados en el resto de la planta.

Estas acciones no solo representaron mejoras puntuales, sino que dejaron conocimientos incorporados en la empresa. Las herramientas desarrolladas permiten a la organización sostener el orden alcanzado, monitorear avances, detectar desvíos y facilitar auditorías futuras. Asimismo, sientan las bases para extender la implementación a otras áreas, promoviendo una cultura de mejora continua basada en datos y disciplina operativa. De este modo, se asegura la proyección del impacto más allá de los resultados inmediatos.

Entre los aspectos positivos, cabe destacar que el personal ya contaba con nociones previas sobre la metodología 5S, lo que redujo la resistencia al cambio e incluso generó colaboración activa. No obstante, se reconoce que las prácticas de orden y limpieza aún no se incorporan de forma completamente natural. Requieren estímulo constante, supervisión y asignación explícita de tiempos, lo cual representa un desafío en un entorno donde los operarios deben compatibilizar esta tarea con sus funciones productivas y otras prioridades impuestas por la operación diaria. Este balance de fortalezas y desafíos refleja la necesidad de mantener el enfoque en la sostenibilidad de las prácticas implementadas.

De manera complementaria, el diseño del modelo de optimización de compras de repuestos, basado en datos reales de 2024 y en la selección de 30 ítems críticos, permitió transformar un proceso tradicionalmente empírico en un sistema estructurado y respaldado estadísticamente. La estimación de la demanda mediante la distribución de Stuttering Poisson aseguró una representación más fiel de los patrones erráticos e intermitentes observados en el consumo histórico. Este enfoque concluye que la clasificación y modelado de la demanda aportaron un marco confiable para anticipar necesidades, reducir riesgos de desabastecimiento y fortalecer la planificación estratégica de los repuestos en la planta.

El modelo resultante fue formulado como un problema de programación lineal entera mixta, considerando restricciones de presupuesto y capacidad de almacenamiento, tiempos de entrega diferenciados, costos de adquisición y penalización por desabastecimiento, entre otras. La incorporación de variables binarias para reflejar la operatividad de las máquinas y penalizar paradas productivas permitió representar de manera realista las condiciones del sistema, garantizando que la propuesta respondiera directamente a las necesidades operativas de la planta.

La validación del modelo mediante distintos casos de prueba con configuraciones específicas permitió comprobar la coherencia lógica de las decisiones, la correcta propagación de restricciones y la respuesta ante condiciones límite. Posteriormente, el análisis de sensibilidad, que incluyó escenarios de alta, media y baja demanda, recortes presupuestarios severos (hasta 80 %) y variaciones en el costo de desabastecimiento, demostró que el modelo mantiene estabilidad y capacidad de adaptación. Con ello se confirma que constituye una herramienta confiable para ajustar la estrategia de compras de acuerdo con la disponibilidad de recursos.

Una de las principales conclusiones del análisis es la importancia estratégica de anticipar las decisiones de compra en los primeros meses del horizonte de planificación, especialmente para repuestos con altos tiempos de entrega. Esta estrategia reduce significativamente los riesgos de desabastecimiento, lo que es especialmente crítico para equipos como la máquina de mallas. Mejorar la disponibilidad de repuestos en este punto del proceso implica una mejora directa del margen operativo, al reducir los costos fijos por unidad producida y aumentar la capacidad de respuesta ante la demanda. En línea con esto, se comprobó que el costo de desabastecimiento es el factor con mayor peso en la función objetivo, lo que refuerza la necesidad de priorizar decisiones que aseguren la operatividad continua del sistema.

## 6.1. Trabajo a Futuro

Si bien el presente trabajo logró ejecutar acciones concretas y diseñar herramientas asociadas a las tres primeras etapas de la metodología 5S, uno de los principales desafíos a futuro es implementar las dos etapas restantes: Estandarización y Disciplina. Estas fases son esenciales para consolidar los logros, asegurar la sostenibilidad y generar una transformación cultural en el entorno productivo.

La etapa de Estandarización implica la formalización de rutinas, procedimientos y criterios visuales que aseguren la repetición correcta y constante de las prácticas ya instauradas. Se recomienda documentar formalmente los instructivos de trabajo y asegurar su visibilidad en los puestos operativos, así como aplicar una señalización uniforme en las zonas de almacenamiento y áreas comunes.

La etapa de Disciplina, por su parte, representa el compromiso sostenido de toda la organización con el cumplimiento voluntario de estas rutinas. Para fortalecer esta dimensión en la empresa, se propone la conformación de un equipo fijo de auditores internos, con participación rotativa de operarios y supervisores, que permita generar sentido de pertenencia. Además, se recomienda establecer una política clara de reconocimiento para los sectores que mantengan altos estándares de orden y limpieza, reforzada por acciones de formación continua y seguimiento. Esto asegura que 5S se integre a la cultura organizacional.

Consolidar estas dos etapas permitiría sostener los avances logrados hasta ahora, incorporarlos de forma natural al flujo operativo y maximizar beneficios como la reducción sistemática de desperdicios, mayor seguridad, aumento de la eficiencia, mejoras en el ambiente laboral y mayor trazabilidad en la gestión de recursos. Sin embargo, se reconoce que este proceso requiere compromiso a largo plazo, liderazgo interno y planificación estratégica por parte de la empresa.

Durante el desarrollo del modelo de optimización se identificaron diversas oportunidades de mejora. Una de las principales líneas a desarrollar consiste en incorporar lead times diferenciados por proveedor, para planificar con mayor precisión la llegada de repuestos y anticiparse a faltantes de manera más efectiva.

Asimismo, el modelo actual no contempla los costos de almacenamiento. No obstante, en futuras versiones del modelo se recomienda incorporar esta penalización para obtener soluciones más balanceadas desde el punto de vista financiero y logístico.

Otra dirección de avance relevante consiste en incorporar la incertidumbre de la demanda de forma explícita mediante modelos estocásticos. Esto puede abordarse a través de formula-

ciones basadas en escenarios o mediante modelos multietapa. En el primer caso, las decisiones iniciales de compra se evalúan frente a un conjunto de posibles escenarios futuros de demanda, lo que permite diseñar estrategias más robustas frente a la variabilidad. Por su parte, los modelos multietapa permiten una toma de decisiones secuencial, en la que las decisiones futuras se ajustan dinámicamente a medida que se dispone de nueva información. Este tipo de enfoque resulta particularmente valioso cuando se trabaja con demandas inciertas. Esto mejora la planificación bajo demanda incierta.

Una limitación importante del modelo actual es que no acumula demanda no satisfecha. Se considera que si una máquina no dispone del repuesto en el mes en que lo necesita, entra en parada, pero no se simula que la máquina permanezca detenida hasta recibir el repuesto. Esta lógica simplificada, centrada en un análisis mensual, no permite modelar situaciones donde la falta de stock genera impactos prolongados. Incluir esta dinámica permitiría mejorar la precisión del modelo, reflejando cómo se propagan las consecuencias de las decisiones de compra a lo largo del tiempo.

También se plantea como mejora la posibilidad de ampliar la cantidad de repuestos modelados, incorporando ítems actualmente excluidos pero que tienen impacto en la operativa. Esto permitiría simular efectos agregados sobre la operación, como la competencia por espacio físico o la necesidad de balancear compras entre múltiples ítems críticos.

Desde el punto de vista técnico, otra mejora clave consiste en migrar el modelo a plataformas de mayor potencia computacional. Adoptar herramientas más robustas permitiría abordar instancias más grandes, explorar formulaciones estocásticas y reducir considerablemente los tiempos de resolución.

Todas estas oportunidades de mejora identificadas permiten avanzar hacia un modelo cada vez más ajustado a la realidad operativa de la planta, aumentando su precisión y fortaleciendo su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

## 6.2. Lecciones aprendidas

Trabajar en este proyecto significó mucho más que aplicar conocimientos académicos, fue un proceso de aprendizaje profundo sobre cómo se enfrentan los desafíos reales dentro de una planta industrial. Una de las principales enseñanzas fue comprender que cualquier herramienta o propuesta, por más técnicamente robusta que sea, sólo adquiere valor si logra adaptarse al ritmo de trabajo, a las condiciones operativas y a la cultura organizacional del entorno en el que se inserta. La realidad de la empresa es cambiante, dinámica y muchas veces impredecible, lo cual contrasta con la lógica más estructurada y determinista que suele plantearse en los modelos teóricos.

Uno de los mayores desafíos fue intentar modelar de forma simple una realidad que es, en esencia, compleja. La construcción del modelo de optimización implicó traducir una lógica operativa cargada de detalles, matices y excepciones en una estructura matemática rigurosa pero necesariamente simplificada. En ese camino, fue necesario tomar decisiones difíciles como qué aspectos modelar y cuáles dejar por fuera, cómo representar adecuadamente la incertidumbre y hasta qué punto los resultados podían considerarse representativos de la situación real.

Además, trabajar en dos enfoques completamente distintos representó un desafío adicional. A lo largo del proyecto, aprendimos a coordinarnos, a dividir responsabilidades y a

conectar las dos partes en un objetivo común. Si bien por momentos parecían iniciativas paralelas, con el tiempo entendimos que se trataba de intervenciones complementarias que fortalecían el sistema productivo desde ángulos totalmente distintos.

También fue clave el aprendizaje que implicó estar en contacto con personas de planta, entender su rutina, sus tiempos y sus prioridades permitió dimensionar el verdadero desafío que representa implementar mejoras sostenibles. Poner en práctica herramientas como 5S, por ejemplo, requiere más que capacitación y planillas, demanda compromiso, acompañamiento y una estrategia de implementación realista. Por eso, aunque los resultados fueron valiosos, también tomamos conciencia de que estos procesos requieren tiempo, constancia y liderazgo interno para consolidarse.

Con respecto al modelo matemático, es importante reconocer que las expectativas iniciales eran muy altas, queríamos generar una herramienta que pudiera ser usada inmediatamente por la empresa e integrada a su operativa. Con el avance del proyecto entendimos que eso no era viable en los plazos disponibles, y que la implementación real exige mucho más tiempo, trabajo adicional y ajustes sobre la marcha. Aun así, consideramos que lo desarrollado representa un avance significativo. El modelo formulado, las herramientas diseñadas y las acciones implementadas constituyen una base concreta sobre la cual la empresa puede seguir construyendo.

Por otro lado, este trabajo fue la primera experiencia en la que realizamos una búsqueda bibliográfica sistemática de gran magnitud, lo que significó un hito en nuestra formación académica. El proceso fue exigente, ya que llevó mucho tiempo, análisis riguroso y toma de decisiones metodológicas sobre qué incluir y qué descartar. Sin embargo, resultó enormemente enriquecedor y nos marcó un precedente claro para futuros trabajos a desarrollar. Poder construir un marco teórico robusto y bien fundamentado fue esencial para dar solidez a nuestras decisiones técnicas, y también nos permitió conectar nuestro proyecto con debates y desarrollos actuales en el ámbito académico.

A su vez, no podemos dejar de mencionar el crecimiento personal que implicó haber sostenido este proyecto durante tantos meses. Fue el trabajo más extenso y desafiante que enfrentamos hasta el momento, y nos enseñó a organizarnos, complementarnos y resolver problemas en conjunto. Aprendimos a trabajar en equipo, a apoyarnos en nuestras fortalezas y a mantenernos firmes en los momentos más exigentes del proceso. Más allá de los resultados, creemos que este recorrido nos deja herramientas valiosas para nuestra vida profesional futura.

Esta experiencia dejó una enseñanza clara, mejorar un sistema productivo es un proceso gradual, que combina técnica, estrategia y personas. Haber aportado en esa dirección, aunque solo sea el primer paso, es motivo de satisfacción y orgullo profesional.



## 7. Anexo

### 7.1. Revisión exhaustiva de la literatura

Se realizó una revisión sistemática de la literatura centrada en la metodología 5S y la gestión de inventarios de repuestos.

La búsqueda de literatura se llevó a cabo de manera sistemática, con el objetivo de asegurar que los resultados fueran verificables y replicables en futuras investigaciones. Este enfoque permite reproducir los mismos pasos y obtener conclusiones comparables, fortaleciendo así la solidez y la transparencia del proceso de revisión.

#### 7.1.1. Procedimiento metodológico

Siguiendo la metodología propuesta en [Halty et al. \[2023\]](#) “Scheduling in Cloud Manufacturing Systems: Recent Systematic Literature Review”, se estableció un proceso de revisión estructurado y verificable. Para cumplir con los criterios de una revisión sistemática se ejecutaron los siguientes pasos:

- Definición de criterios claros y específicos para la clasificación de los estudios revisados.
- Consolidación de resultados obtenidos de acuerdo con los criterios de clasificación definidos previamente.
- Detección y eliminación de duplicados.
- Clasificación de las publicaciones a partir de los títulos y abstracts de cada uno de los estudios seleccionados.
- Clasificación a partir de la lectura detallada de publicaciones donde existían dudas sobre su relevancia.

#### 7.1.2. Metodología aplicada a Gestión de Inventarios

##### ▪ Definición de criterios para la clasificación de la literatura

Para la clasificación de la literatura, se aplicó un proceso clave. En línea con el enfoque del trabajo de referencia utilizado como base metodológica, se han definido las siguientes categorías de procesos fundamentales:

- Inventory Management/Inventory Control/Stock Management.
- Preventive Maintenance.
- Spare Parts.

Estas categorías guiarán la clasificación de las publicaciones seleccionadas. Para identificar estudios relevantes, se estableció un conjunto de reglas específicas que enmarcan la literatura a considerar. Dichas reglas son las siguientes:

- La búsqueda se enfocó en artículos académicos e informes técnicos.
- La búsqueda se enfocó en papers publicado entre los años 2018 - 2024 de libre acceso.
- Las bibliotecas online seleccionadas para las búsquedas fueron Google Scholar, Science Direct y Timbó.

- En cada colección, las búsquedas se realizaron en tres fases distintas, una para cada categoría de clasificación mencionada anteriormente.
- Para todas las búsquedas, se estableció como requisito que en el título de los documentos aparecieran, al menos, una de las siguientes frases clave: “Stochastic Modeling OR Stochastic Processes OR Stochastic demand OR Stochastic Programming OR Stochastic Optimization OR Monte Carlo Simulation OR Stochastic Control”.

Este conjunto de criterios asegura que los papers respondan de manera precisa a los temas de interés y que el análisis posterior mantenga coherencia y relevancia con los objetivos del estudio.

A continuación, en las Tablas 34, 35 y 36, se muestran los resultados obtenidos de las búsquedas realizadas en cada una de las bibliotecas, habiendo eliminando previamente los duplicados.

<b>Categoría</b>	<b>Cantidad</b>
Spare parts	8
Inventory Management/ Inventory Optimization/Stock Management	40
Preventive Maintenance	7
<b>Total</b>	<b>55</b>

**Tabla 34:** Colección Timbó

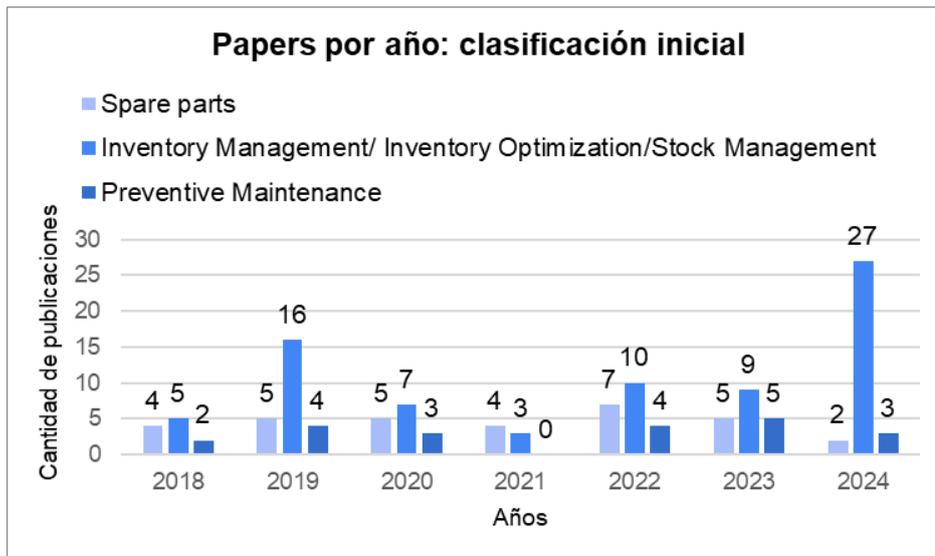
<b>Categoría</b>	<b>Cantidad</b>
Spare parts	6
Inventory Management/ Inventory Optimization/Stock Management	19
Preventive Maintenance	8
<b>Total</b>	<b>33</b>

**Tabla 35:** Colección Google Scholar

<b>Categoría</b>	<b>Cantidad</b>
Spare parts	18
Inventory Management/ Inventory Optimization/Stock Management	18
Preventive Maintenance	6
<b>Total</b>	<b>42</b>

**Tabla 36:** Colección Science Direct

A su vez, en el siguiente gráfico se presenta la cantidad de artículos publicados entre 2018 y 2024, clasificados en las tres categorías de procesos fundamentales:



**Figura 35:** Número de publicaciones por año según categoría - elaboración propia.

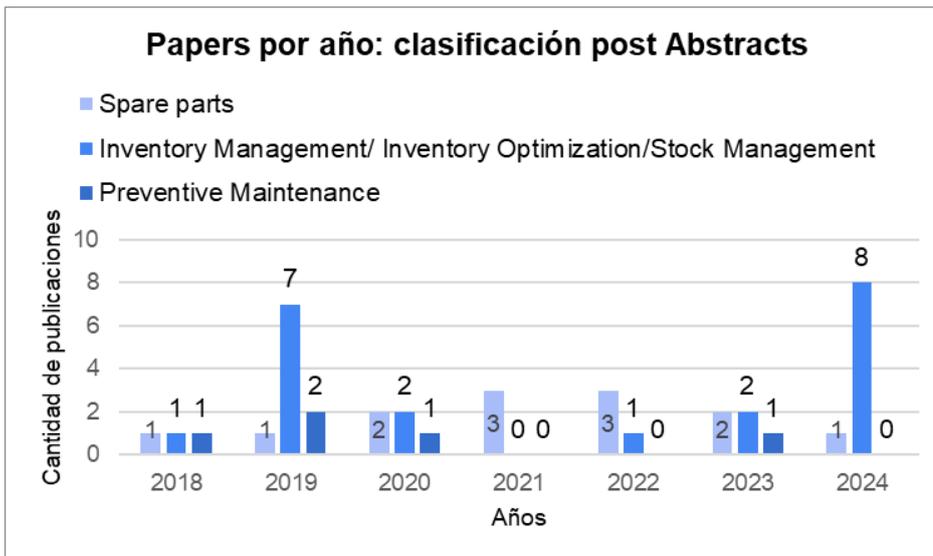
#### ▪ Selección preliminar basada en Títulos y Abstracts

Se realizó una primera fase de clasificación de las publicaciones mediante la lectura cuidadosa de los títulos y el abstract de cada uno de los estudios seleccionados. Este proceso inicial fue fundamental para evaluar rápidamente la relevancia de cada publicación en relación con el tema central de la investigación.

Tras esta revisión, cada paper fue clasificado en una de dos categorías: “Seleccionado” o “Descartado”. Los estudios categorizados como “Seleccionado” mostraron una conexión directa y significativa con los objetivos de análisis de gestión de inventarios de repuestos. Por otro lado, aquellos clasificados como “Descartado” incluían publicaciones que, si bien podían tener una relación tangencial o superficial con el tema, no aportaban contribuciones sustanciales a la revisión sistemática.

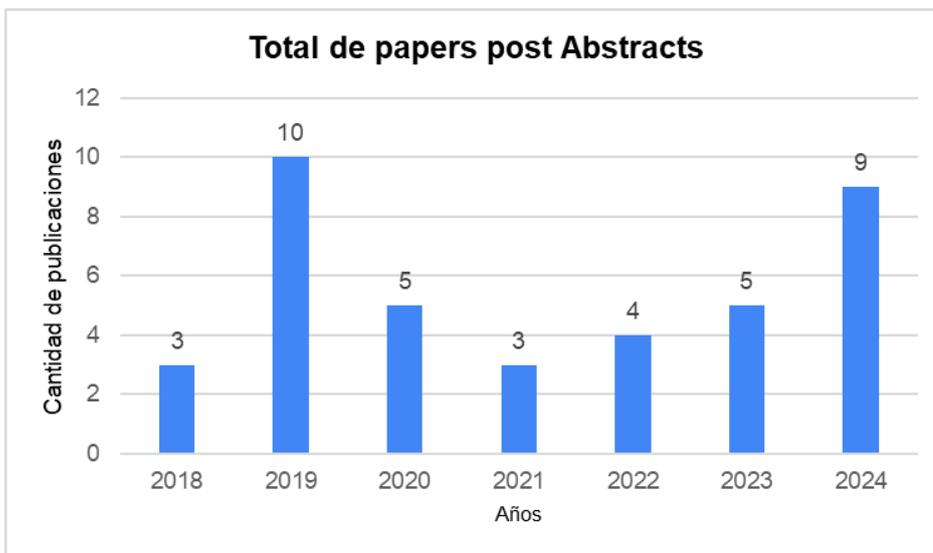
Este filtrado permitió enfocar los esfuerzos en estudios con un contenido relevante y reducir la posibilidad de incluir información marginal o irrelevante. Como resultado, se seleccionaron 39 estudios para ser analizados en mayor profundidad en la siguiente etapa del proceso.

La siguiente figura muestra la clasificación de los artículos por año según las tres categorías de procesos fundamentales luego de la lectura de los títulos y los abstracts



**Figura 36:** Número de publicaciones por año según categoría: post Abstracts - elaboración propia.

A su vez, se introduce la siguiente figura, que representa el total de artículos publicados anualmente sin distinción de categoría.



**Figura 37:** Evolución del número total de publicaciones por año - elaboración propia.

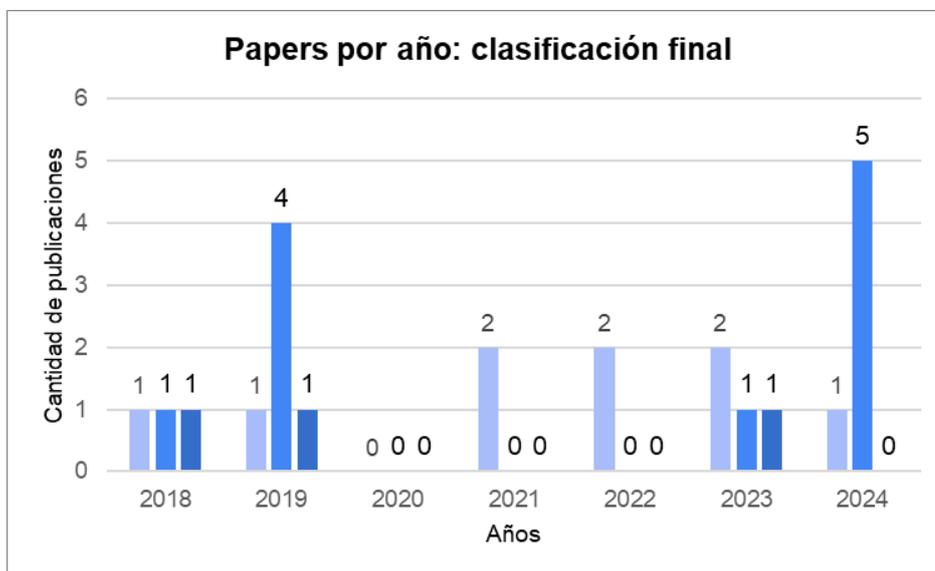
▪ **Selección final**

Luego de la fase de clasificación basada en títulos y abstracts, se procedió a una revisión exhaustiva del texto completo de los estudios previamente seleccionados. En esta etapa, se analizó en mayor profundidad el contenido de cada publicación para determinar su aporte real a la investigación.

El criterio principal para la selección final fue la identificación de estudios que no solo abordaran la gestión de inventarios de repuestos, sino que además presentaran metodologías, modelos o soluciones aplicables a nuestro problema. Se priorizaron aquellos trabajos que incluían enfoques cuantitativos, técnicas de optimización y modelos de predicción para la planificación de inventarios bajo demanda incierta.

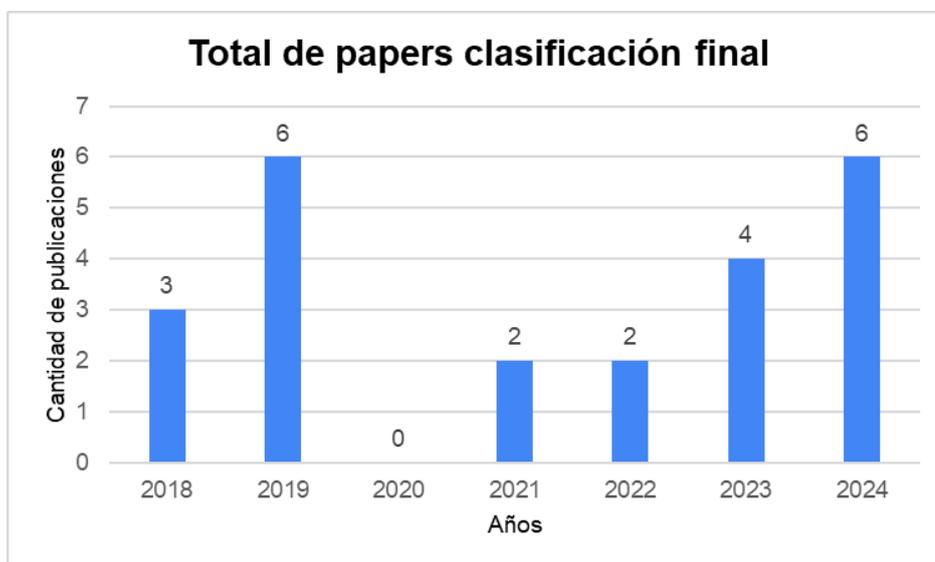
Como resultado de este proceso, se seleccionaron 23 artículos que demostraron ser altamente relevantes y útiles para la revisión sistemática.

La siguiente figura muestra la distribución final de publicaciones por año, clasificadas según las tres categorías:



**Figura 38:** Número de publicaciones por año según categoría: clasificación final - elaboración propia.

Por otro lado, la siguiente figura presenta la evolución del número total de publicaciones anuales, permitiendo observar tendencias generales en la cantidad de estudios analizados:



**Figura 39:** Evolución del número total de publicaciones por año: clasificación final - elaboración propia.

A partir del análisis de estas figuras, se observa que la mayor cantidad de publicaciones seleccionadas corresponde a los años 2019 y 2024, con 6 estudios en cada caso. Sin embargo, la cantidad de trabajos elegidos varió a lo largo del tiempo, con una notable caída en 2020, donde no se seleccionó ninguna publicación. En los años siguientes, la cantidad de publicaciones fue menor pero mostró una recuperación progresiva, destacándose un incremento en 2023 y 2024.

## ■ Clasificación

Luego de completar la lectura de los papers seleccionados, se procedió a clasificarlos utilizando criterios clave que permitieran identificar similitudes y diferencias de manera estructurada. Esta organización facilita el análisis comparativo y asegura que los resultados sean relevantes y coherentes con los objetivos del estudio.

En la primer etapa, los papers fueron agrupados en tres grandes categorías según las estrategias de gestión de inventarios descritas en los estudios:

- Revisión fija: Incluye modelos donde las decisiones de reposición se toman en intervalos de tiempo preestablecidos, independientemente del nivel de inventario.
- Revisión aleatoria: Considera modelos en los que las decisiones de reposición están determinadas por eventos específicos o monitoreos continuos del inventario.
- Modelos basados en puntos de reorden: Estrategias que establecen un nivel crítico de inventario (punto de reorden); cuando se alcanza este nivel, se desencadena automáticamente una orden de reposición.

La elección de esta clasificación inicial resulta favorable porque estas estrategias representan enfoques tradicionales en la gestión de inventarios, lo que facilita la comparación entre estudios, permitiendo incluir la mayoría de los papers revisados.

La segunda etapa se basó en realizar una subdivisión según el enfoque empleado para estimar la demanda. Se identificaron dos grandes grupos:

- Métodos paramétricos: Este grupo incluye estudios que asumen una distribución estadística específica y utilizan parámetros predefinidos para modelar la demanda.
- Métodos no paramétricos: Aquí se agrupan los estudios que no dependen de una distribución estadística fija. En su lugar, utilizan enfoques flexibles como análisis basados en datos históricos, simulaciones o algoritmos de aprendizaje automático.

Esta subdivisión es especialmente relevante porque permite analizar cómo las distintas aproximaciones influyen en la capacidad de prever la demanda, lo que impacta directamente en la eficacia de las estrategias de inventario.

A continuación, en la Tablas 37 y 38, se presentan los papers según la división descrita.

	Revisión Fija	Revisión Aleatoria	Modelo basado en puntos de reorden
<b>Métodos Paramétricos</b>	<p>M. Hamedí et al., 2019. Optimization of preventive maintenance scheduling based on Monte Carlo Simulation in processing plants.</p> <p>L. Turrini et al., 2018. Spare parts inventory management: New evidence from distribution fitting.</p> <p>F. Stranieri et al., 2024. Combining deep reinforcement learning and multi-stage stochastic programming to address the supply chain inventory management problem.</p> <p>I. Dursun et al., 2023. How good must failure predictions be to make local spare parts stock superfluous?</p> <p>Z. A. Afdal and U. Linarti, 2023. Preventive Maintenance Analysis Using Monte Carlo Simulation and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).</p> <p>J. Q. Hwang and H. A. Samat, 2019. A Review on Joint Optimization of Maintenance with Production Planning and Spare Part Inventory Management.</p> <p>F. Abderrahmane, S. Bouslikhane, Z. Hajej et al., 2022. An improved integrated maintenance/spare parts management for wind turbine systems with adopting switching concept.</p> <p>D. Owusu-Mensah, R. Naifei, B. Lydia, P. Boateng, and W. K. Darkwah, 2020. Analysis of Production System Management of Ghana's Food and Beverage Industry: Empirical Evidence from Spare Parts Inventory Control, Production Quality and Maintenance Modeling.</p> <p>Z. A. Afdal and U. Linarti, 2023. Preventive Maintenance Analysis Using Monte Carlo Simulation and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).</p> <p>F. Evazabadian, M. Arvan and R. Ghodsi, 2019. Short-term crude oil scheduling with preventive maintenance operations: a fuzzy stochastic programming approach.</p> <p>Y. Xu, Q. Fu, Y. Zhou, M. Li, Y. Ji and T. Li, 2019. Inventory Theory-Based Stochastic Optimization for Reservoir Water Allocation.</p> <p>P. S. Muttaqin and D. D. Damayanti, 2018. Joint Optimization of Inventory and Preventive Maintenance: Systematic Literature Review and Research Agenda.</p> <p>J. Q. Hwang and H. A. Samat, 2019. A Review on Joint Optimization of Maintenance with Production Planning and Spare Part Inventory Management.</p>	<p>L. M. Johannsmann et al., 2022. Stochastic mixed-integer programming for a spare parts inventory management problem.</p> <p>J. Shia et al., 2022. A stochastic programming model for jointly optimizing maintenance and spare parts inventory.</p> <p>L. Turrini and J. Meissner, 2019. Spare parts inventory management: New evidence from distribution fitting.</p>	<p>R. Campos Lopes et al., 2019. Utilização da simulação de Monte Carlo na gestão de estoques para empresas farmacêuticas.</p> <p>V. Babaveisi et al., 2023. A planning model for repairable spare part supply chain.</p> <p>I. Jackson, 2019. Combining simulation with genetic algorithm for solving stochastic multi-product inventory optimization problem.</p> <p>B. Kaya et al., 2024. Inventory management optimization for intermittent demand.</p> <p>Nguyen et al., 2024. Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm.</p> <p>A. Mansur, F. I. Mar'ah and P. Amalia, 2020. Platelet Inventory Management System Using Monte Carlo Simulation.</p> <p>Y. Tadayonrad and A. B. Ndiaye, 2023. A new key performance indicator model for demand forecasting in inventory management considering supply chain reliability and seasonality.</p> <p>M. H. Selmi, Z. Jemai, L. Gregoire and Y. Dallery, 2019. Literature Review on Shortage Cost Modeling in Inventory Management.</p> <p>A. M. El-Assal, Z. Roubi and T. M. Eldogdog, 2024. A Review of Spare Parts Inventory Management: Different Methods of Spare Parts Classification and Inventory Control Techniques.</p> <p>S. Pal, 2024. Optimizing Just-In-Time Inventory Management: A Deep Dive into AI-Enhanced Demand Forecasting.</p>

**Tabla 37:** Clasificación de papers con demanda incierta que utilizan métodos paramétricos.

**Tabla 38:** Clasificación de papers con demanda incierta que utilizan métodos no paramétricos.

	Revisión Fija	Revisión Aleatoria	Modelo basado en puntos de reorden
Métodos No Paramétricos		<p>M. Baisariyev et al., 2021. Demand forecasting methods for spare parts logistics for aviation.</p> <p>T. B. Affonso et al., 2024. A new hybrid forecasting method for spare part inventory management using heuristics and bootstrapping.</p> <p>U. Praveen et al., 2019. Inventory management and cost reduction using AI-based time-series forecasting.</p>	<p>M. Seyedan et al., 2023. Order-up-to-level inventory optimization model using time-series demand forecasting.</p> <p>N. Sukolkit et al., 2024. An open innovative inventory management based on demand forecasting.</p>

### 7.1.3. Metodología aplicada a 5s

#### ■ Definición de criterios para la clasificación de la literatura

Para realizar la búsqueda bibliográfica de 5S se utilizó la misma metodología general presentada anteriormente para Gestión de Inventarios, pero el enfoque fue ajustado debido a la naturaleza del concepto estudiado. La temática 5S, es un concepto único con menor diversidad de variantes. Esto permitió realizar una búsqueda más centralizada y acotada, sin necesidad de aplicar tantas clasificaciones o subcategorías para encontrar información relevante y completa.

En este caso, el único proceso clave aplicado fue 5S methodology.

Para la revisión de la literatura sobre el tema de 5S, se aplicó un proceso adaptado al contexto del concepto. En este caso, se definió como criterio fundamental que las publicaciones incluyeran de manera explícita la frase “5S methodology” en el título. Esto permitió enfocar la búsqueda en estudios directamente relacionados con el tema, evitando ambigüedades o la necesidad de clasificaciones adicionales.

Para garantizar una cobertura adecuada de la literatura, se establecieron los siguientes criterios y reglas:

- La búsqueda se enfocó exclusivamente en artículos académicos e informes técnicos.
- La biblioteca online utilizada para la búsqueda fue Google Scholar.
- Se realizó una única fase de búsqueda, enfocada exclusivamente en el concepto “5S methodology”, sin subdivisiones adicionales.
- Como requisito obligatorio, se estableció que el término “5S methodology” apareciera en el título de los documentos seleccionados.

Este enfoque centralizado y específico permitió obtener un conjunto de publicaciones relevantes y exhaustivas sobre el tema, cumpliendo con los objetivos del estudio.

A continuación, en la Tabla 39, se muestran los resultados obtenidos de la búsquedas realizada en Google Scholar:

COLECCIÓN GOOGLE SCHOLAR	
Categoría	Cantidad
5S methodology	7

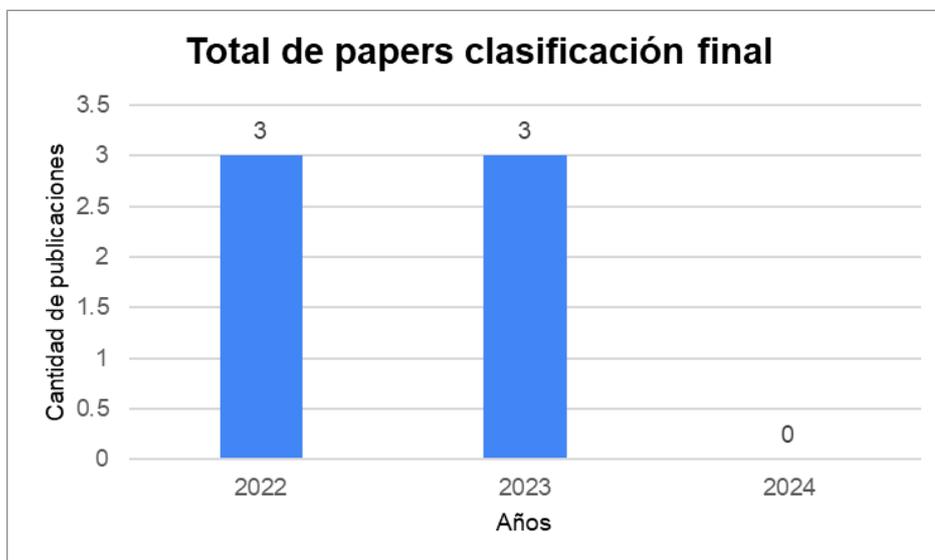
**Tabla 39:** Cantidad de artículos sobre 5S en la colección Google Scholar

- **Selección preliminar basada en Títulos y Abstracts**

Todos los artículos resultaron relevantes mediante la lectura cuidadosa de los títulos y el abstract de cada uno de los estudios seleccionados, por lo que se mantuvieron los mismos 7 documentos seleccionados inicialmente.

- **Selección final**

Luego de leer en detalle los 7 artículos seleccionados preliminarmente, se decidió conservar 6 de ellos para el análisis. En la siguiente figura se muestra la distribución de publicaciones por año según la clasificación final.



**Figura 40:** Número de publicaciones por año: clasificación final - elaboración propia.

## 7.2. Herramientas utilizadas para la aplicación de 5S

A continuación, se presentan las herramientas utilizadas para la implementación de las primeras tres etapas de la metodología 5S en el galpón productivo.

Se incluye, en primer lugar, las planillas correspondientes para realizar las auditorías quincenales y su seguimiento, el plan de acción elaborado en función de los resultados obtenidos, y luego, el flujograma y el diagrama de Gantt que organizan y calendarizan las tareas planificadas. Finalmente, se presenta el formulario de Microsoft Forms utilizado para el relevamiento inicial del inventario de repuestos, herramientas e insumos.

También se incorporan las diapositivas utilizadas para la capacitación de los operarios sobre la metodología 5S y un instructivo detallado que explica paso a paso cómo operar el archivo de Excel diseñado para gestionar el control de stock de repuestos mediante un sistema de ingreso y egreso de materiales. Para cerrar las herramientas, se presenta la planilla para la planificación de la limpieza

## EVALUACIÓN 5S - GALPÓN G6

Número	Sentido	Items a evaluar	Criterio de evaluación					
			1	2	3	4	5	
1	Clasificar	Se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos que se encuentran	No se utiliza ninguno de los equipos, herramientas, repuestos e insumos disponibles					Se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos disponibles.
2	Clasificar	Hay una cantidad de herramientas, repuestos e insumos mínima y máxima definida.	No están las cantidades definidas.					Todas las herramientas, repuestos e insumos tienen las cantidades máxima y mínima
3	Clasificar	Las herramientas, repuestos e insumos están almacenados en su respectivo lugar.	No hay ninguna herramienta, repuestos e insumos almacenados en su respectivo lugar.					Todas las herramientas, repuestos e insumos están almacenados en su respectivo lugar.

Número	Sentido	Items a evaluar	Criterio de evaluación					
			1	2	3	4	5	
4	Ordenar	Los equipos, herramientas, repuestos, insumos y documentos utilizados poseen un lugar específico para su almacenamiento. Este está debidamente ordenado e identificado. Es fácil acceder a ellos	No están definidos los lugares de almacenamiento y no es fácil acceder a ellos					Se poseen un lugar específico para el almacenamiento. Este está debidamente ordenado e identificado. Es fácil acceder a las herramientas.
5	Ordenar	No existen aparatos encendidos sin necesidad tales como estufas y ventiladores.	Todos los aparatos están encendidos sin necesidad.					No hay ningún aparato encendido sin necesidad.
6	Ordenar	En el sector no hay ningún equipo, herramienta o instalaciones eléctricas, tales como: tableros eléctricos, ductos, cableados, tomacorrientes que se encuentre roto, deteriorado o fuera de uso.	Todos los equipos, herramientas e instalaciones eléctricas se encuentran rotas, deterioradas o fuera de uso					Todas las herramientas, equipos e instalaciones eléctricas se encuentran en perfecto estado y en condiciones de operación.
7	Ordenar	Los tachos de basura están correctamente colocados y son vaciados antes de que estén llenos.	No existen botes de basura en el área.					Todos los botes de basura están correctamente colocados y son vaciados antes de que estén llenos.
8	Ordenar	Los residuos se eliminan correctamente en sus respectivas tarrinas selectivas.	No existen tarrinas selectivas					Todos los residuos medioambientales y reciclables se eliminan correctamente en sus respectivas tarrinas selectivas.
9	Ordenar	Al final de cada trabajo, el equipo y las herramientas se devuelven a su ubicación identificada.	Al finalizar el trabajo, todas las herramientas están fuera de su ubicación identificada					Al final de cada trabajo, todas las herramientas se devuelven a su ubicación identificada.
10	Ordenar	Las áreas para material no conforme y stock de material están demarcadas	No existen áreas para material no conforme y stock de material					Existen áreas para material no conforme y stock de material y están demarcadas
11	Ordenar	El espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos está correctamente definido y es suficiente	No existe espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos					Existe un espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos, está correctamente definido y es suficiente

Número	Sentido	Items a evaluar	Criterio de evaluación					
			1	2	3	4	5	
12	Limpiar	Las máquinas productivas no presentan pérdidas de insumos como aceite, agua o aire.	Todas las máquinas productivas presentan pérdidas de insumos					Ninguna máquina productiva presenta pérdidas de insumos como aceite, agua o aire.
13	Limpiar	Los equipos, herramientas, repuestos e insumos de la zona están limpios y en buen estado de conservación.	Todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos están sucios y en mal estado					Todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos están perfectamente limpios y en excelente estado de conservación
14	Limpiar	La zona como un todo está limpia (pisos, equipos, paredes, techo, mesas de trabajo, carteles, etc.).	La zona está completamente sucia en todos sus aspectos					La zona está impecablemente limpia en todos sus aspectos (pisos, equipos, paredes, techo, mesas de trabajo, carteles, etc.)
15	Limpiar	Se encuentran a disposición equipos de limpieza tales como escobas, trapos, aspiradoras.	No hay ningún equipo de limpieza disponible					Todos los equipos de limpieza necesarios están disponibles y en perfecto estado
16	Limpiar	Están definidas las personas responsables de la limpieza.	No hay personas designadas como responsables de la limpieza					Todas las responsabilidades de limpieza están claramente definidas y asignadas
17	Limpiar	Están definidos períodos destinados a la limpieza del galpón	No hay períodos definidos para la limpieza del galpón					Los períodos de limpieza están claramente definidos, programados y se cumplen rigurosamente

Número	Sentido	Items a evaluar	Criterio de evaluación					
			1	2	3	4	5	
18	Estandarizar	La iluminación es adecuada y todas las lámparas están funcionando.	La iluminación es insuficiente y las lámparas no funcionan					La iluminación es la ideal y están todas las lámparas encendidas
19	Estandarizar	Los elementos de seguridad de la zona son adecuados y están en perfectas condiciones de uso. Los extintores de incendio son los adecuados, están cargados, debidamente identificados y es fácil acceder a los mismos.	No existen elementos de seguridad en la zona					Los elementos de seguridad de la zona son adecuados y están en perfectas condiciones de uso (Protecciones de partes móviles, barandas, escaleras, puertas, etc.). Los extintores de incendio son los adecuados, están cargados, debidamente identificados y es fácil acceder a los mismos.
20	Estandarizar	Existen todos los documentos/procedimientos necesarios.	No hay documentos ni procedimientos					Existen todos los documentos/procedimientos necesarios.
21	Estandarizar	Los procedimientos documentados están actualizados.	Ningún procedimiento está actualizado					Todos los procedimientos están actualizados
22	Estandarizar	Los sectores y los placares están correctamente señalizados	No existe señalización					Todos los sectores y placares están correctamente señalizados (carteles en los estantes, etc)
23	Estandarizar	Existe cartelera adecuada para el sector y está visible	No existe cartelera visible					Existe cartelera adecuada (carteles de advertencia, salidas, etc.) para el sector y está visible

Número	Sentido	Items a evaluar	Criterio de evaluación					
			1	2	3	4	5	
24	Autodisciplina	Los trabajadores participan activamente en reuniones de seguimiento y mejora continua relacionadas con las 5S, proponiendo y ejecutando acciones de mejora.	Los trabajadores no participan en absoluto en reuniones de seguimiento ni proponen acciones de mejora					Todos los trabajadores participan activamente en reuniones, proponen y ejecutan acciones de mejora regularmente.
25	Autodisciplina	Se reporta cualquier incidencia o desviación con respecto a la limpieza a sus superiores.	Nunca se reportan incidencias o desviaciones respecto a la limpieza.					Todas las incidencias o desviaciones se reportan inmediatamente a los superiores.
26	Autodisciplina	Se devuelven y mantienen todas las herramientas, equipos e insumos en su lugar designado después de su uso, asegurando que el área de trabajo permanezca ordenada y limpia en todo momento.	Nunca se devuelven las herramientas, equipos e insumos a su lugar después de usarlos.					Siempre se devuelven y mantienen todas las herramientas, equipos e insumos en su lugar designado, manteniendo el área impecable.
27	Autodisciplina	Los colaboradores realizan autoevaluaciones periódicas sobre el cumplimiento de las 5S y toman acciones correctivas de manera autónoma cuando sea necesario.	Los colaboradores nunca realizan autoevaluaciones ni toman acciones correctivas.					Todos los colaboradores realizan autoevaluaciones regularmente y toman acciones correctivas de forma autónoma y proactiva.
28	Autodisciplina	Los trabajadores fomentan y mantienen una cultura de mejora continua en relación con las 5S, incentivando a sus compañeros a seguir los estándares establecidos y a buscar constantemente formas de mejorar.	No existe cultura de mejora continua ni incentivo entre compañeros para seguir los estándares de 5S.					Todos los trabajadores fomentan activamente la cultura de mejora continua y motivan constantemente a sus compañeros a mejorar y seguir los estándares de 5S.
29	Autodisciplina	El responsable del sector realiza este check cada 15 días y comparte el resultado con los operadores.	El responsable nunca realiza el check ni comparte resultados.					El responsable realiza el check puntualmente cada 15 días y siempre comparte los resultados detalladamente con todos los operadores.
30	Autodisciplina	Los trabajadores reciben capacitaciones regulares sobre qué son las 5S, su importancia y cómo implementarlas efectivamente en su trabajo diario.	Los trabajadores nunca reciben capacitaciones sobre las 5S ni entienden su importancia.					Todos los trabajadores reciben capacitaciones frecuentes y completas sobre las 5S, comprenden plenamente su importancia y las aplican constantemente en su trabajo diario.

Figura 41: Evaluaciones 5S galpón - elaboración propia

EVALUACIÓN 5S - TALLER							
Número	Sentido	Ítems a evaluar	Criterio de evaluación				
			1	2	3	4	5
1	Clasificar	Se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos disponibles.	No se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos				Se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos disponibles.
2	Clasificar	Hay una cantidad de herramientas, repuestos e insumos mínima y máxima definida.	No estan las cantidades definidas.				Todas las herramientas, repuestos e insumos tienen las cantidades maxima y minima definidas.
3	Clasificar	Las herramientas, repuestos e insumos están almacenados en su respectivo lugar.	No hay ninguna herramienta, repuestos e insumos almacenados en su respectivo lugar.				Todas las herramientas, repuestos e insumos están almacenados en su respectivo lugar. Los repuestos estan clasificados correctamente según la máquina.

Número	Sentido	Ítems a evaluar	Criterio de evaluación				
			1	2	3	4	5
4	Ordenar	Los equipos, herramientas, repuestos, insumos y documentos utilizados poseen un lugar específico para su almacenamiento. Este está debidamente ordenado e identificado. Es fácil acceder a ellos.	No estan definidos los lugares de almacenamiento y no es facil acceder a ellos.				Se poseen un lugar específico para el almacenamiento. Este está debidamente ordenado e identificado. Es fácil acceder a las herramientas.
5	Ordenar	No existen aparatos encendidos sin necesidad tales como estufas y ventiladores.	Todos los aparatos estan encendidos sin necesidad.				No hay ningun aparto encendido sin necesidad.
6	Ordenar	En el sector no hay ningún equipo, herramienta o instalaciones eléctricas, tales como: tableros eléctricos, ductos, cableados, tomacorrientes que se encuentre roto, deteriorado o fuera de uso.	Todas los equipos, herramientas e instalaciones electricas se encuentran rotas, deterioradas o fuera de uso.				Todas las herramientas, equipos e instalaciones eléctricas se encuentran en perfecto estado y en condiciones de operación.
7	Ordenar	Los botes de basura están correctamente colocados y son vaciados antes de que estén llenos.	No existen botes de basura en el área.				Todos los botes de basura están correctamente colocados y son vaciados antes de que estén llenos.
8	Ordenar	Los residuos medioambientales y reciclables se eliminan correctamente en sus respectivas tarrinas selectivas.	No existen tarrinas selectivas.				Todos los residuos medioambientales y reciclables se eliminan correctamente en sus respectivas tarrinas selectivas.
9	Ordenar	Al final de cada trabajo, el equipo y las herramientas se devuelven a su ubicación identificada. Las mesas de trabajo quedan libres y ordenadas.	Al finalizar el trabajo, todas las herramientas estan fuera de su ubicacion identificada.				Al final de cada trabajo, todas las herramientas se devuelven a su ubicación identificada. Las mesas de trabajo estan ordenadas.
10	Ordenar	El espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos está correctamente definido y es suficiente.	No existe espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos.				Existe un espacio destinado a almacenamiento de herramientas e insumos, está correctamente definido y es suficiente.
11	Ordenar	Al final de la actividad la sala de torno y la sala de cassette estan debidamente	Nunca estan las salas ordenadas al final de cada actividad.				Siempre estan las salas ordenadas al final de cada actividad.

Número	Sentido	Ítems a evaluar	Criterio de evaluación				
			1	2	3	4	5
12	Limpiar	Los equipos, herramientas, repuestos e insumos de la zona están limpios y en buen estado de conservación.	Todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos están sucios y en mal estado.				Todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos están perfectamente limpios y en excelente estado de conservación.
13	Limpiar	La zona como un todo está limpia (pisos, equipos, paredes, techo, mesas de trabajo, carteles, etc.).	La zona está completamente sucia en todos sus aspectos.				La zona está impecablemente limpia en todos sus aspectos (pisos, equipos, paredes, techo, mesas de trabajo, carteles, etc.).
14	Limpiar	Se encuentran a disposición equipos de limpieza tales como escobas y trapos.	No hay ningún equipo de limpieza disponible.				Todos los equipos de limpieza necesarios están disponibles y en perfecto estado.
15	Limpiar	Están definidas las personas responsables de la limpieza.	No hay personas designadas como responsables de la limpieza.				Todas las responsabilidades de limpieza están claramente definidas y asignadas.
16	Limpiar	Están definidos periodos destinados a la limpieza del taller.	No hay periodos definidos para la limpieza del galpón.				Los periodos de limpieza están claramente definidos, programados y se cumplen rigurosamente.
17	Limpiar	Al final del turno, las sala de torno y de cassetese encuentran limpias.	Ninguna de las salas se limpian previo al fin de turno.				Ambas salas se limpian previo a la finalización del turno.

Número	Sentido	Ítems a evaluar	Criterio de evaluación				
			1	2	3	4	5
18	Estandarizar	La iluminación es adecuada y todas las lámparas están funcionando.	La iluminación es insuficiente y las lamparas no funcionan.				La iluminación es la ideal y estan todas las lamparas encendidas.
19	Estandarizar	Los elementos de seguridad de la zona son adecuados y están en perfectas condiciones de uso. Los extintores de incendio son los adecuados, están cargados, debidamente identificados y es fácil acceder a los mismos.	No existen elementos de seguridad en la zona.				Los elementos de seguridad de la zona son adecuados y están en perfectas condiciones de uso (Protecciones de partes móviles, barandas, escaleras, puertas, etc.). Los extintores de incendio son los adecuados, están cargados, debidamente identificados y es fácil acceder a los mismos.
20	Estandarizar	Existen todos los documentos/procedimientos necesarios.	No hay documentos ni procedimientos.				Existen todos los documentos/procedimientos necesarios.
21	Estandarizar	Los procedimientos documentados están actualizados.	Ningun procedimientos esta actualizado.				Todos los procedimientos estan actualizados.
22	Estandarizar	Los sectores y los placares están correctamente señalizados.	No existe señalizacion.				Todos los sectores y placares están correctamente señalizados (carteles en los estantes, etc).
23	Estandarizar	Existe cartelera adecuada para el sector y está visible.	No existe cartelera visible.				Existe cartelera adecuada (carteles de advertencia, salidas, etc.) para el sector y está visible.
24	Estandarizar	Todas las tuberías de gas o agua están correctamente señalizados con cartelera.	No existe señalación de tuberías.				Todas las tuberías están correctamente señalizadas.

Número	Sentido	Ítems a evaluar	Criterio de evaluación				
			1	2	3	4	5
25	Autodisciplina	Los trabajadores participan activamente en reuniones de seguimiento y mejora continua relacionadas con las 5S, proponiendo y ejecutando acciones de mejora.	Los trabajadores no participan en absoluto en reuniones de seguimiento ni proponen acciones de mejora.				Todos los trabajadores participan activamente en reuniones, proponen y ejecutan acciones de mejora regularmente.
26	Autodisciplina	Se reporta cualquier incidencia o desviación con respecto a la limpieza a sus superiores.	Nunca se reportan incidencias o desviaciones respecto a la limpieza.				Todas las incidencias o desviaciones se reportan inmediatamente a los superiores.
27	Autodisciplina	Se devuelven y mantienen todas las herramientas, equipos e insumos en su lugar designado después de su uso, asegurando que el área de trabajo permanezca ordenada y limpia en todo momento.	Nunca se devuelven las herramientas, equipos e insumos a su lugar después de usarlos.				Siempre se devuelven y mantienen todas las herramientas, equipos e insumos en su lugar designado, manteniendo el área impecable.
28	Autodisciplina	Los colaboradores realizan autoevaluaciones periódicas sobre el cumplimiento de las 5S y toman acciones correctivas de manera autónoma cuando sea necesario.	Los colaboradores nunca realizan autoevaluaciones ni toman acciones correctivas.				Todos los colaboradores realizan autoevaluaciones regularmente y toman acciones correctivas de forma autónoma y proactiva.
29	Autodisciplina	Los trabajadores fomentan y mantienen una cultura de mejora continua en relación con las 5S, incentivando a sus compañeros a seguir los estándares establecidos y a buscar constantemente formas de mejorar.	No existe cultura de mejora continua ni incentivo entre compañeros para seguir los estándares de 5S.				Todos los trabajadores fomentan activamente la cultura de mejora continua y motivan constantemente a sus compañeros a mejorar y seguir los estándares de 5S.
30	Autodisciplina	El responsable del sector realiza este check cada 15 días y comparte el resultado con los operadores.	El responsable nunca realiza el check ni comparte resultados.				El responsable realiza el check puntualmente cada 15 días y siempre comparte los resultados detalladamente con todos los operadores.
31	Autodisciplina	Los trabajadores reciben capacitaciones regulares sobre qué son las 5S, su importancia y cómo implementarlas efectivamente en su trabajo diario.	Los trabajadores nunca reciben capacitaciones sobre las 5S ni entienden su importancia.				Todos los trabajadores reciben capacitaciones frecuentes y completas sobre las 5S, comprenden plenamente su importancia y las aplican constantemente en su trabajo diario.

Figura 42: Evaluaciones 5S taller - elaboración propia

SEGUIMIENTO 5S TALLER																										
Fecha última actualización:		28.08.2024																								
Evaluadores:		Agustina Pérez																								
Número	Sentido	Items a evaluar	Nota																							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Clasificar	Se utilizan todos los equipos, herramientas, repuestos e insumos disponibles.	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
2	Clasificar	Hay una cantidad de herramientas, repuestos e insumos mínima y máxima definida.	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	
3	Clasificar	Las herramientas, repuestos e insumos están almacenados en su respectivo lugar.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4	4	5	5	
Total			8	8	9	9	9	8	8	8	10	11	11	11	12	12	13	13	12	12	14	14	14	14	15	
Promedio			2,7	2,7	3,0	3,0	3,0	2,7	3,0	3,0	3,3	3,7	3,7	3,7	4,0	4,0	4,3	4,3	4,0	4,0	4,7	4,7	4,7	5,0	5,0	

Figura 43: Fragmento del seguimiento 5S realizado en el taller mecánico - elaboración propia

La S:	1	2	3	4	5	6	7	8
Clasificar	2,7	2,7	3,0	3,0	3,0	2,7	3,0	3,0
Ordenar								
Limpia								
Estandarizar								
Autodisciplina								
Total	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
% Avance	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%

Figura 44: Fragmento de la Tabla resumen del programa 5S en el taller mecánico - elaboración propia

Estrategia Operativa para la Optimización de las Primeras 3S: Clasificación, Organización y Limpieza					
Qué	Cómo	Detalle	Quién	Cuándo	Dónde
1. Identificar los repuestos, herramientas y equipos disponibles y su ubicación	Realizar un inventario de todos los repuestos disponibles en las distintas áreas de la planta, incluyendo cantidad, descripción, código SAP y ubicación exacta.	- Recorrida física por todas las áreas de almacenamiento. - Elaboración de una lista detallada de todos los ítems. - Uso de un formato estándar para unificar la información.	Analista de producción	Iniciar en la primera semana, completar en tres semanas.	Todas las áreas involucradas
2. Agregar en la lista el estado de los repuestos, equipos o herramientas	Incluir una evaluación visual y operativa del estado de cada herramienta o equipo dentro del inventario para un control efectivo de su funcionalidad.	- Realizar inspecciones visuales y operativas del estado de las herramientas. - Agregar esta información en la lista de equipos y herramientas	Analista de producción	Durante el inventario inicial.	Todas las áreas de almacenamiento.
3. Implementación de un sistema de control de estado de herramientas y equipos	Realizar un seguimiento regular del estado de todas las herramientas y equipos disponibles, asegurando que estén en condiciones óptimas de uso.	- Realizar inspecciones mensuales de todas las herramientas y - Registrar el estado de cada uno en un sistema digital. - Proponer el mantenimiento o reemplazo de aquellos en mal	Analista de producción	Revisión mensual a partir del inicio.	Toda el área de operación
4. Determinar cuáles repuestos se utilizan y cuáles no	Evaluar el uso real de cada repuesto a partir del inventario realizado, identificando cuáles se utilizan regularmente y cuáles no.	- Consultar a los trabajadores con experiencia sobre el uso de cada ítem. - Marcar en la lista aquellos que no se utilizan.	Analista de producción	Inmediatamente después del inventario.	Todas las áreas involucradas
5. Clasificación de repuestos según su frecuencia de uso	Clasificar los repuestos en función de su frecuencia de uso para optimizar su almacenamiento.	- Asignar un grado de utilización: 1: uso diario 2: uso semanal 3: uso menos de una vez por semana	Analista de producción	Inmediatamente después del inventario.	Todas las áreas involucradas
6. Evaluación del destino de los repuestos que no se utilizan	Determinar si los repuestos no utilizados deben ser descartados, almacenados en un lugar diferente o redistribuidos a otras áreas de la planta.	- Consultar con otras áreas sobre la posible utilidad de los repuestos. - En caso negativo, eliminar o reubicar el ítem en áreas de almacenamiento secundario.	Analista de producción	Inmediatamente después de la clasificación.	Todas las áreas involucradas
7. Definición de stock mínimo y máximo de repuestos críticos	Establecer un nivel mínimo y máximo de stock para cada repuesto, asegurando la disponibilidad sin generar exceso de inventario.	- Revisar el historial de uso y consumo de cada repuesto. - Consultar con operarios y técnicos sobre necesidades críticas. - Definir cantidades mínimas y máximas en la lista de inventario.	Analista de producción	Una semana después de la clasificación.	Todas las áreas involucradas
8. Registro de stock de seguridad y consumos en un sistema digital	Crear un sistema de registro y seguimiento de consumos en formato digital para facilitar la reposición y control de stock.	- Elaboración de un archivo Excel con todos los ítems y sus cantidades mínimas y máximas. - Implementación de un sistema de alerta cuando se llegue al stock mínimo.	Analista de producción	Implementación en dos semanas.	Todas las áreas involucradas
9. Determinación del espacio de almacenamiento necesario para cada repuesto	Evaluar el espacio de almacenamiento para la cantidad de repuestos identificados y clasificados.	- Estimar el espacio necesario para almacenar los repuestos. - Comparar con el espacio disponible en la actualidad.	Analista de producción	Dos semanas después de la definición de stock.	Todas las áreas involucradas
10. Organización del almacenamiento según la clasificación de repuestos	Distribuir los repuestos en el espacio de almacenamiento según su frecuencia de uso, peso y tamaño, para facilitar el acceso y minimizar tiempos de búsqueda.	- Designar áreas específicas para cada categoría de repuestos. - Pintar y demarcar los espacios en el suelo y estanterías. - Colocar etiquetas claras para cada ítem.	Analista de producción	Tres semanas después de la evaluación de espacio.	Todas las áreas involucradas
11. Evaluar la adquisición o creación de nuevos espacios de almacenamiento si los actuales son insuficientes	Evaluar la posibilidad de adquirir nuevos espacios o desarrollar soluciones de almacenamiento adicionales.	- Identificar posibles innovaciones en la disposición o construcción de áreas de almacenamiento. - Proponer soluciones según la experiencia.	Analista de producción	Dos semanas después de la evaluación de espacio.	Todas las áreas involucradas.
12. Implementación de procedimientos para la devolución de herramientas y equipos a su lugar de almacenamiento después de su uso	Asegurar que todas las herramientas y equipos sean devueltos a su lugar correspondiente después de su uso, manteniendo el orden y facilitando su localización.	- Pintar el suelo en las áreas designadas. - Colocar cartelera clara indicando el tipo de material almacenado.	Analista de producción	Implementación en la primera semana y seguimiento continuo.	Toda el área de operación
13. Demarcación de áreas para material no conforme stock de material en proceso	Pintar y señalar áreas específicas para el almacenamiento de materiales no conformes y stock en proceso, asegurando que no interfieran con el trabajo diario y que sean fácilmente identificables.	- Pintar y demarcar las áreas destinadas para los tachos. - Colocar etiquetas con el tipo de residuo que se debe depositar en cada tacho. - Capacitar a todo el personal para identificar etiquetas	Analista de producción	Dos semanas después de la organización del almacenamiento.	Todas las áreas de almacenamiento y operación.
14. Identificación y señalización de los lugares de almacenamiento de tachos de basura	Asegurar que los tachos de basura estén claramente identificados y ubicados en zonas específicas, evitando que se acumulen residuos en lugares inapropiados.	- Asignar un responsable por área. - Establecer un cronograma de vaciado semanal. - Supervisar el cumplimiento del cronograma.	Analista de producción	Inmediato y revisión mensual.	Toda el área de operación
15. Determinación de responsables del vaciado de tachos de basura	Designar responsables para el vaciado regular de los tachos de basura, asegurando que no se acumulen residuos innecesarios en las áreas de trabajo.	- Dividir el área de almacenamiento en zonas. - Designar al menos un responsable por zona. - Realizar capacitaciones sobre buenas prácticas de limpieza y organización.	Analista de producción	Inicio inmediato con revisiones semanales.	Toda el área de operación
16. Definir responsables de la limpieza y organización del área	Asignar responsables específicos para cada área de almacenamiento, con la tarea de mantener el orden y la limpieza del espacio.	- Definir horarios específicos de limpieza para cada área. - Establecer un sistema de seguimiento y control de la limpieza. - Verificar el estado de equipos y herramientas utilizados en la limpieza.	Analista de producción	Inicio inmediato, con revisiones mensuales.	Todas las áreas de almacenamiento
17. Implementación de un sistema de limpieza y mantenimiento regular	Establecer un sistema de limpieza regular, con horarios definidos, para asegurar que el área se mantenga en óptimas condiciones.		Analista de producción	Inicio inmediato y seguimiento mensual.	Todas las áreas de almacenamiento y operación

Figura 45: Plan de Acción - elaboración propia.



This content is Public.

**Figura 46:** Flujograma plan de acción - elaboración propia.

Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Nov-24	Dec-24	Jan-25	Feb-25	Mar-25	Apr-25	May-25
1. Identificar los repuestos disponibles y su ubicación	1-Nov	1-Dec	█						
2. Agregar en la lista el estado de los equipos o herramientas	1-Nov	1-Dec	█						
3. Implementación de un sistema de control de estado de herramientas y equipos	1-Nov	1-Dec	█						
4. Determinar cuáles repuestos se utilizan y cuáles no	1-Dec	1-Jan		█					
5. Clasificación de repuestos según su frecuencia de uso	1-Dec	1-Jan		█					
6. Evaluación del destino de los repuestos que no se utilizan	1-Jan	1-Feb			█				
7. Definición de stock mínimo y máximo de repuestos críticos	1-Jan	1-Feb			█				
8. Registro de stock de seguridad y consumos en un sistema digital	1-Jan	1-Feb			█				
9. Determinación del espacio de almacenamiento necesario para cada repuesto	1-Jan	1-Feb			█				
10. Organización del almacenamiento según la clasificación de repuestos	1-Feb	1-Mar				█			
11. Evaluar la adquisición o creación de nuevos espacios de almacenamiento si los actuales son insuficientes	1-Feb	1-Apr				█	█		
12. Implementación de procedimientos para la devolución de herramientas y equipos a su lugar de almacenamiento después de su uso	1-Mar	1-May					█	█	
13. Demarcación de áreas para material no conforme y stock de material en proceso	1-Apr	1-May						█	
14. Identificación y señalización de los lugares de almacenamiento de tachos de basura	1-May	1-Jun							█
15. Determinación de responsables del vaciado de tachos de basura	1-May	1-Jun							█
16. Definir responsables de la limpieza y organización del área	1-May	1-Jun							█
17. Implementación de un sistema de limpieza y mantenimiento regular	1-May	1-Jun							█

Figura 47: Gantt plan de acción - elaboración propia.

### INVENTARIO GALPÓN MALLAS - 5S

Identificar los repuestos, herramientas y equipos disponibles y su ubicación

\* Obligatorio

1. Nombre del elemento \*
2. Categoría \*  
 Herramienta  
 Repuesto  
 Insumo  
 Otro
3. Cantidad \*
4. Código de SAP
5. ¿Si no conoce código de SAP o no tiene, cree que es necesario que tenga? \*  
 Sí  
 No
6. Ubicación \*  
 Mueble móvil - MS4  
 Estante debajo del pupitre - MS4  
 Mueble en Pupitre - MS4  
 Mueble en Pupitre - LF  
 Mueble zona de salida - LF
7. Estado \*  
 Bueno: apto para su uso  
 Medio: se debe reemplazar a mediano plazo  
 Malo: se debe reemplazar de inmediato
8. Frecuencia de uso \*  
 Diario  
 Semanal  
 Mensual  
 Frecuencia mayor a un mes

Figura 48: Microsoft Forms - elaboración propia

### Ingesar artículos al stock

1. Ingresar Nombre, Código de SAP, Cantidad y Nombre de la Máquina, del artículo a ingresar.

2. Hacer click en el botón INGRESO.

3. Hacer click en el botón ACTUALIZAR.

Nombre	Código SAP	Cantidad	Máquina	Fecha
Pistón	2345	1	LF	7/1/2025

CONSULTAS		
Código SAP	Stock	Disponibilidad
Nombre	Código SAP	

### Quitar artículos del stock

1. Ingresar Nombre, Código de SAP, Cantidad y Nombre de la Máquina, del artículo a quitar.

2. Hacer click en el botón EGRESO.

3. Hacer click en el botón ACTUALIZAR.

Nombre	Código SAP	Cantidad	Máquina	Fecha
Pistón	2345	1	LF	7/1/2025

CONSULTAS		
Código SAP	Stock	Disponibilidad
Nombre	Código SAP	

### Realizar consultas de stock

1. Ingresar nombre del artículo a consultar stock. A pretar ENTER.  
En la columna Código SAP, aparece el número correspondiente al artículo.

2. Hacer click en el botón ACTUALIZAR.

Nombre	Código SAP	Cantidad	Máquina	Fecha
Pistón	2345	1	LF	7/1/2025

CONSULTAS		
Código SAP	Stock	Disponibilidad
Nombre	Código SAP	
Reductor motor pinzas	7890	

Figura 49: Paso a paso - elaboración propia.

# CAPACITACIÓN

## 5S

Razones para implementar 5S

- **Crear / fortalecer el sentido crítico colectivo para desarrollar una Cultura de Excelencia:** Promover cambio de actitud y estimular actitud de autodisciplina.
- **Mantener y mejorar las condiciones de trabajo:** Trabajando en un local limpio, los Colaboradores se sienten bien y trabajan satisfechos.
- **Tornar las áreas más seguras:** Áreas limpias, organizadas y señalizadas, todos usando EPP.
- **Reducir Desperdicios, aumentando la productividad:** En locales sucios, si ocurrieran fallas en el producto, ellas se tornan difíciles de ser controladas.
- **Mejorar la moral:** Quién trabaja en una empresa 5S trabaja animado, y la confianza de la comunidad local se torna cada vez mayor.
- **Incentivar la creatividad:** Las mejoras en el área son hechas por los Colaboradores.

### Seiton - Orden




Identifica y organiza todo

### Seiso - Limpieza

Mantener limpio el lugar de trabajo tiene resultados positivos

Más importante que limpiar, es no ensuciar.




### Seiketsu Estandarización

La estandarización ayuda a convertir los procesos en hábitos en lugar de mantenerlos como algo de una sola vez.

La pregunta clave es: cómo mantenemos la clasificación, el orden y la limpieza?





### Shitsuke Disciplina

Beneficios de la autodisciplina

- Cumplimiento natural de los estándares.
- Cultivo de buenos hábitos.
- Mejora de las relaciones humanas.
- Transformar el 5S es un hábito.
- Consolidación del trabajo en equipo.
- Aumentar la posibilidad de resultados de acuerdo con lo planeado.











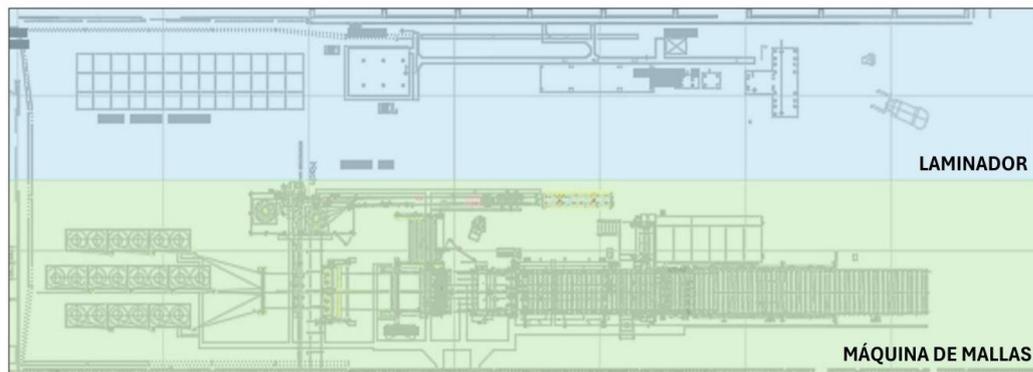




Figura 50: Capacitación 5S - elaboración propia.

### PLANIFICACIÓN DE LIMPIEZA

Semana	Mañana - mallas	Tarde - mallas	Firma mañana - mallas	Firma tarde - mallas	Firma seguimiento
31-Mar	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
7-Abr	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
14-Abr	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
21-Abr	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
28-Abr	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
5-May	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
12-May	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
19-May	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
26-May	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
2-Jun	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
9-Jun	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
16-Jun	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
23-Jun	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
30-Jun	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
7-Jul	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
14-Jul	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
21-Jul	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
28-Jul	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
4-Ago	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
11-Ago	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
18-Ago	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
25-Ago	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
1-set	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
8-set	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
15-set	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			
22-set	Limpieza/orden general	Limpieza tachos residuos y despuntes			
29-set	Limpieza tachos residuos y despuntes	Limpieza/orden general			



**Figura 51:** Planilla de limpieza - elaboración propia.

### 7.3. Clasificación de la demanda en cada repuesto

A continuación, se presentan los valores históricos obtenidos de los 30 repuestos seleccionados y su correspondiente clasificación en demandas de tipo errático e intermitente.

Nombre repuesto	Demanda histórica												Media	Varianza	Desviación estandar	CV2 (Coeficiente de variación)	P (frecuencia de periodos sin demnada)	Meses con demanda 0	Erratica, estable o moderada?	Intermitente o alta frecuencia?
	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12								
Bobina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Brazo de la horquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0,50	3,00	1,73	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Cabezal	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0,42	1,36	1,16	7,81	6	10 Erratica	Intermitente	
Modulo salida digital	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	6	0,67	3,15	1,78	7,09	6	10 Erratica	Intermitente	
Micro interruptor	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,50	2,09	1,45	8,36	6	10 Erratica	Intermitente	
Rodamiento 32008X	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0,42	0,99	1,00	5,72	6	10 Erratica	Intermitente	
Reductor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0,17	0,33	0,58	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Reflector LED	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0,25	0,75	0,87	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Rodamiento SR21	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0,42	0,99	1,00	5,72	6	10 Erratica	Intermitente	
Rodamiento 2Z	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,39	0,62	6,18	6	10 Erratica	Intermitente	
Sensor inductivo	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,75	0,87	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Solapa 150 izquierda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0,17	0,33	0,58	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Thermistor proteccion motor	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0,17	0,33	0,58	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Valvula direccional	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Variador de Frecuencia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Elektrodhenal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0,25	0,75	0,87	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Embrague	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0,25	0,75	0,87	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Emisor optico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Holder	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0,25	0,75	0,87	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Fuelle metalico	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0,42	2,08	1,44	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Rodillo de enderezar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,42	2,08	1,44	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Planchuelas	0	0	0	0	40	60	0	0	0	0	0	0	8,33	396,97	19,92	5,72	6	10 Erratica	Intermitente	
Deckplatte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	18	2,33	32,61	5,71	5,99	6	10 Erratica	Intermitente	
Kanal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0,17	0,33	0,58	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Klappe	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	0,83	3,79	1,95	5,45	6	10 Erratica	Intermitente	
Receptor	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Fotocelula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,33	1,33	1,15	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Emisor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,08	0,08	0,29	12,00	12	11 Erratica	Intermitente	
Disc Scheibe aussen	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,33	0,61	0,78	5,45	6	10 Erratica	Intermitente	
Disc Scheibe innen	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,33	0,61	0,78	5,45	6	10 Erratica	Intermitente	

Figura 52: Clasificación de repuestos - elaboración propia.

### 7.4. Salidas variables casos de prueba

A continuación, se presentan las salidas de las variables obtenidas en determinados casos de prueba.

Repuesto	Mes	$x[r,t]$	$o[r,t]$	$z[Z,t]$
A	1	0	1	0
A	2	0	0	0
A	3	0	0	0
A	4	0	2	0
A	5	2	0	1
A	6	0	0	1
A	7	0	0	1
A	8	0	1	1
A	9	1	0	1
A	10	0	0	1
B	1	0	1	
B	2	0	0	
B	3	0	1	
B	4	1	0	
B	5	0	0	
B	6	0	1	
B	7	1	0	
B	8	0	0	

Repuesto	Mes	$x[r,t]$	$o[r,t]$	$z[Z,t]$
B	9	0	0	
B	10	0	0	
C	1	0	1	
C	2	0	1	
C	3	0	0	
C	4	0	0	
C	5	0	0	
C	6	0	0	
C	7	0	0	
C	8	0	2	
C	9	2	0	
C	10	0	0	
D	1	0	0	
D	2	0	2	
D	3	2	0	
D	4	0	0	
D	5	0	0	
D	6	0	0	
D	7	0	0	
D	8	0	0	
D	9	0	0	
D	10	0	0	
E	1	0	2	
E	2	2	0	
E	3	0	2	
E	4	0	0	
E	5	0	0	
E	6	0	0	
E	7	0	0	
E	8	0	0	
E	9	0	0	
E	10	0	0	
F	1	0	1	
F	2	0	1	
F	3	1	0	
F	4	0	0	
F	5	0	0	
F	6	0	0	
F	7	0	1	
F	8	1	0	
F	9	0	1	
F	10	0	0	
G	1	0	2	
G	2	0	0	
G	3	0	0	
G	4	0	0	
G	5	0	0	
G	6	0	0	
G	7	0	3	
G	8	3	0	
G	9	0	0	

Repuesto	Mes	$x[r,t]$	$o[r,t]$	$z[Z,t]$
G	10	0	0	
H	1	0	0	
H	2	0	0	
H	3	0	0	
H	4	0	0	
H	5	0	0	
H	6	0	0	
H	7	0	0	
H	8	0	0	
H	9	0	0	
H	10	0	0	
I	1	0	1	
I	2	1	0	
I	3	0	1	
I	4	1	0	
I	5	0	1	
I	6	0	0	
I	7	0	0	
I	8	0	0	
I	9	0	0	
I	10	0	0	
J	1	0	0	
J	2	0	1	
J	3	1	0	
J	4	0	1	
J	5	0	0	
J	6	0	0	
J	7	0	0	
J	8	0	0	
J	9	0	0	
J	10	0	0	

**Tabla 40:** Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 7

Repuesto	Mes	$x[r,t]$	$o[r,t]$	$z[Z,t]$
A	1	0	0	0
A	2	0	0	0
A	3	0	0	0
A	4	0	2	0
A	5	2	0	1
A	6	0	0	1
A	7	0	0	1
A	8	0	1	1
A	9	1	0	1
A	10	0	0	1
B	1	0	0	
B	2	0	0	
B	3	0	1	
B	4	1	0	
B	5	0	0	
B	6	0	1	
B	7	1	0	
B	8	0	0	
B	9	0	0	
B	10	0	0	
C	1	0	0	
C	2	0	0	
C	3	0	0	
C	4	0	0	
C	5	0	0	
C	6	0	0	
C	7	0	0	
C	8	0	2	
C	9	2	0	
C	10	0	0	
D	1	0	0	
D	2	0	0	
D	3	0	0	
D	4	0	0	
D	5	0	0	
D	6	0	0	
D	7	0	0	
D	8	0	0	
D	9	0	0	
D	10	0	0	
E	1	0	0	
E	2	0	0	
E	3	0	0	
E	4	0	0	
E	5	0	0	
E	6	0	0	
E	7	0	0	
E	8	0	0	
E	9	0	0	
E	10	0	0	
F	1	0	2	

Repuesto	Mes	$x[r,t]$	$o[r,t]$	$z[Z,t]$
F	2	0	0	
F	3	1	0	
F	4	0	0	
F	5	0	0	
F	6	0	0	
F	7	2	0	
F	8	2	0	
F	9	1	0	
F	10	0	0	
G	1	0	3	
G	2	0	0	
G	3	0	0	
G	4	0	0	
G	5	0	0	
G	6	0	0	
G	7	3	0	
G	8	3	0	
G	9	0	0	
G	10	0	0	
H	1	0	0	
H	2	0	0	
H	3	0	0	
H	4	0	0	
H	5	0	0	
H	6	0	0	
H	7	0	0	
H	8	0	0	
H	9	0	0	
H	10	0	0	
I	1	0	0	
I	2	0	2	
I	3	0	0	
I	4	0	0	
I	5	1	0	
I	6	0	0	
I	7	0	0	
I	8	0	0	
I	9	0	0	
I	10	0	0	
J	1	0	0	
J	2	0	1	
J	3	0	0	
J	4	0	0	
J	5	0	0	
J	6	0	0	
J	7	0	0	
J	8	0	0	
J	9	0	0	
J	10	0	0	

Tabla 41: Valores de actividad de las variables del modelo - caso prueba 8

Repuesto	faltante_inicial <sub>r,m</sub>
A	1
B	0
C	0
D	0
E	0
F	1
G	2
H	0
I	1
J	1

**Tabla 42:** Valores de faltante inicial por repuesto – Caso de prueba 8

### 7.5. Archivo de datos de entrada para el caso real

A continuación, se presenta el contenido completo del archivo de datos `final.dat` utilizado en el modelo de optimización:

```

1 # Datos para la optimizacin del stock de repuestos
2
3 param meses := 12;
4
5 set MAQUINAS := Laminador Soldadora; # Conjunto de mquinas
6
7 set REPUESTOS:=
8   "Rodamiento 32008X"
9   "Rodamiento SR21"
10  "Rodamiento 2Z"
11  "Planchuelas"
12  "Cabezal"
13  "Modulo salida digital"
14  "Micro interruptor"
15  "Reflector LED"
16  "Sensor inductivo"
17  "Solapa 150 izquierda"
18  "Valvula direccional"
19  "Variador de Frecuencia"
20  "Emisor optico"
21  "Receptor"
22  "Fotocelula"
23  "Emisor"
24  "Bobina"
25  "Brazo de la horquilla"
26  "Reductor"
27  "Thermistor proteccion motor"
28  "Elektrodhenal"
29  "Embrague"
30  "Holder"
31  "Fuelle metalico"
32  "Rodillo de enderezar"
33  "Deckplatte"
34  "Kanal"
35  "Klappe"
36  "Disc Scheibe aussen"
37  "Disc Scheibe innen";
38
39
40 set ASIGNACION["Bobina"]:=Laminador;
41 set ASIGNACION["Brazo de la horquilla"]:=Laminador;
42 set ASIGNACION["Cabezal"]:=Laminador;

```

```

43 set ASIGNACION["Modulo salida digital"]:=Laminador;
44 set ASIGNACION["Micro interruptor"]:=Laminador;
45 set ASIGNACION["Rodamiento 32008X"]:=Laminador;
46 set ASIGNACION["Reductor"]:=Laminador;
47 set ASIGNACION["Reflector LED"]:=Laminador;
48 set ASIGNACION["Rodamiento SR21"]:=Laminador;
49 set ASIGNACION["Rodamiento 2Z"]:=Laminador;
50 set ASIGNACION["Sensor inductivo"]:=Laminador;
51 set ASIGNACION["Solapa 150 izquierda"]:=Laminador;
52 set ASIGNACION["Thermistor proteccion motor"]:=Laminador;
53 set ASIGNACION["Valvula direccional"]:=Laminador;
54 set ASIGNACION["Variador de Frecuencia"]:=Laminador;
55 set ASIGNACION["Elektrodhenal"]:=Soldadora;
56 set ASIGNACION["Embrague"]:=Soldadora;
57 set ASIGNACION["Emisor optico"]:=Soldadora;
58 set ASIGNACION["Holder"]:=Soldadora;
59 set ASIGNACION["Fuelle metalico"]:=Soldadora;
60 set ASIGNACION["Rodillo de enderezar"]:=Soldadora;
61 set ASIGNACION["Planchuelas"]:=Soldadora;
62 set ASIGNACION["Deckplatte"]:=Soldadora;
63 set ASIGNACION["Kanal"]:=Soldadora;
64 set ASIGNACION["Klappe"]:=Soldadora;
65 set ASIGNACION["Receptor"]:=Soldadora;
66 set ASIGNACION["Fotocelula"]:=Soldadora;
67 set ASIGNACION["Emisor"]:=Soldadora;
68 set ASIGNACION["Disc Scheibe aussen"]:=Soldadora;
69 set ASIGNACION["Disc Scheibe innen"]:=Soldadora;
70
71
72 set REPUESTOS_NACIONALES:=
73     "Rodamiento 32008X"
74     "Rodamiento SR21"
75     "Rodamiento 2Z"
76     "Planchuelas";
77
78 set REPUESTOS_MERCOSUR:=
79     "Cabezal"
80     "Modulo salida digital"
81     "Micro interruptor"
82     "Reflector LED"
83     "Sensor inductivo"
84     "Solapa 150 izquierda"
85     "Valvula direccional"
86     "Variador de Frecuencia"
87     "Emisor optico"
88     "Receptor"
89     "Fotocelula"
90     "Emisor";
91
92 set REPUESTOS_OTROS:=
93     "Bobina"
94     "Brazo de la horquilla"
95     "Reductor"
96     "Thermistor proteccion motor"
97     "Elektrodhenal"
98     "Embrague"
99     "Holder"
100    "Fuelle metalico"
101    "Rodillo de enderezar"
102    "Deckplatte"
103    "Kanal"
104    "Klappe"
105    "Disc Scheibe aussen"
106    "Disc Scheibe innen";

```

```

107
108
109 # Parmetros generales
110 param L_NACIONAL := 1;
111 param L_MERCOSUR := 3;
112 param L_OTROS := 6;
113
114 param D :=
115 ["Bobina", Laminador, 1] 0
116 ["Bobina", Laminador, 2] 0
117 ["Bobina", Laminador, 3] 0
118 ["Bobina", Laminador, 4] 1
119 ["Bobina", Laminador, 5] 0
120 ["Bobina", Laminador, 6] 0
121 ["Bobina", Laminador, 7] 0
122 ["Bobina", Laminador, 8] 0
123 ["Bobina", Laminador, 9] 0
124 ["Bobina", Laminador, 10] 0
125 ["Bobina", Laminador, 11] 0
126 ["Bobina", Laminador, 12] 0
127 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 1] 0
128 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 2] 4
129 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 3] 0
130 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 4] 0
131 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 5] 0
132 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 6] 0
133 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 7] 0
134 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 8] 0
135 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 9] 0
136 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 10] 0
137 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 11] 0
138 ["Brazo de la horquilla", Laminador, 12] 0
139 ["Cabezal", Laminador, 1] 0
140 ["Cabezal", Laminador, 2] 0
141 ["Cabezal", Laminador, 3] 0
142 ["Cabezal", Laminador, 4] 0
143 ["Cabezal", Laminador, 5] 0
144 ["Cabezal", Laminador, 6] 0
145 ["Cabezal", Laminador, 7] 0
146 ["Cabezal", Laminador, 8] 0
147 ["Cabezal", Laminador, 9] 0
148 ["Cabezal", Laminador, 10] 0
149 ["Cabezal", Laminador, 11] 0
150 ["Cabezal", Laminador, 12] 0
151 ["Modulo salida digital", Laminador, 1] 3
152 ["Modulo salida digital", Laminador, 2] 1
153 ["Modulo salida digital", Laminador, 3] 0
154 ["Modulo salida digital", Laminador, 4] 1
155 ["Modulo salida digital", Laminador, 5] 0
156 ["Modulo salida digital", Laminador, 6] 2
157 ["Modulo salida digital", Laminador, 7] 5
158 ["Modulo salida digital", Laminador, 8] 0
159 ["Modulo salida digital", Laminador, 9] 0
160 ["Modulo salida digital", Laminador, 10] 0
161 ["Modulo salida digital", Laminador, 11] 0
162 ["Modulo salida digital", Laminador, 12] 4
163 ["Micro interruptor", Laminador, 1] 0
164 ["Micro interruptor", Laminador, 2] 0
165 ["Micro interruptor", Laminador, 3] 0
166 ["Micro interruptor", Laminador, 4] 0
167 ["Micro interruptor", Laminador, 5] 0
168 ["Micro interruptor", Laminador, 6] 0
169 ["Micro interruptor", Laminador, 7] 0
170 ["Micro interruptor", Laminador, 8] 0

```

```

171 ["Micro interruptor", Laminador, 9] 1
172 ["Micro interruptor", Laminador, 10] 0
173 ["Micro interruptor", Laminador, 11] 0
174 ["Micro interruptor", Laminador, 12] 0
175 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 1] 0
176 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 2] 0
177 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 3] 0
178 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 4] 0
179 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 5] 0
180 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 6] 0
181 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 7] 1
182 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 8] 5
183 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 9] 0
184 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 10] 1
185 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 11] 0
186 ["Rodamiento 32008X", Laminador, 12] 1
187 ["Reductor", Laminador, 1] 0
188 ["Reductor", Laminador, 2] 0
189 ["Reductor", Laminador, 3] 0
190 ["Reductor", Laminador, 4] 0
191 ["Reductor", Laminador, 5] 0
192 ["Reductor", Laminador, 6] 0
193 ["Reductor", Laminador, 7] 0
194 ["Reductor", Laminador, 8] 0
195 ["Reductor", Laminador, 9] 0
196 ["Reductor", Laminador, 10] 0
197 ["Reductor", Laminador, 11] 0
198 ["Reductor", Laminador, 12] 0
199 ["Reflector LED", Laminador, 1] 0
200 ["Reflector LED", Laminador, 2] 0
201 ["Reflector LED", Laminador, 3] 0
202 ["Reflector LED", Laminador, 4] 0
203 ["Reflector LED", Laminador, 5] 1
204 ["Reflector LED", Laminador, 6] 0
205 ["Reflector LED", Laminador, 7] 0
206 ["Reflector LED", Laminador, 8] 0
207 ["Reflector LED", Laminador, 9] 0
208 ["Reflector LED", Laminador, 10] 0
209 ["Reflector LED", Laminador, 11] 0
210 ["Reflector LED", Laminador, 12] 0
211 ["Rodamiento SR21", Laminador, 1] 0
212 ["Rodamiento SR21", Laminador, 2] 0
213 ["Rodamiento SR21", Laminador, 3] 0
214 ["Rodamiento SR21", Laminador, 4] 0
215 ["Rodamiento SR21", Laminador, 5] 0
216 ["Rodamiento SR21", Laminador, 6] 0
217 ["Rodamiento SR21", Laminador, 7] 0
218 ["Rodamiento SR21", Laminador, 8] 0
219 ["Rodamiento SR21", Laminador, 9] 0
220 ["Rodamiento SR21", Laminador, 10] 1
221 ["Rodamiento SR21", Laminador, 11] 0
222 ["Rodamiento SR21", Laminador, 12] 0
223 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 1] 0
224 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 2] 1
225 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 3] 0
226 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 4] 0
227 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 5] 0
228 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 6] 0
229 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 7] 1
230 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 8] 0
231 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 9] 0
232 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 10] 1
233 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 11] 0
234 ["Rodamiento 2Z", Laminador, 12] 0

```

```

235 ["Sensor inductivo", Laminador, 1] 0
236 ["Sensor inductivo", Laminador, 2] 0
237 ["Sensor inductivo", Laminador, 3] 0
238 ["Sensor inductivo", Laminador, 4] 0
239 ["Sensor inductivo", Laminador, 5] 7
240 ["Sensor inductivo", Laminador, 6] 0
241 ["Sensor inductivo", Laminador, 7] 0
242 ["Sensor inductivo", Laminador, 8] 0
243 ["Sensor inductivo", Laminador, 9] 0
244 ["Sensor inductivo", Laminador, 10] 0
245 ["Sensor inductivo", Laminador, 11] 0
246 ["Sensor inductivo", Laminador, 12] 0
247 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 1] 0
248 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 2] 0
249 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 3] 0
250 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 4] 0
251 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 5] 0
252 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 6] 0
253 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 7] 0
254 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 8] 0
255 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 9] 0
256 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 10] 0
257 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 11] 0
258 ["Solapa 150 izquierda", Laminador, 12] 0
259 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 1] 0
260 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 2] 1
261 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 3] 0
262 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 4] 2
263 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 5] 0
264 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 6] 0
265 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 7] 0
266 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 8] 0
267 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 9] 0
268 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 10] 0
269 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 11] 1
270 ["Thermistor proteccion motor", Laminador, 12] 0
271 ["Valvula direccional", Laminador, 1] 0
272 ["Valvula direccional", Laminador, 2] 0
273 ["Valvula direccional", Laminador, 3] 0
274 ["Valvula direccional", Laminador, 4] 0
275 ["Valvula direccional", Laminador, 5] 0
276 ["Valvula direccional", Laminador, 6] 0
277 ["Valvula direccional", Laminador, 7] 0
278 ["Valvula direccional", Laminador, 8] 0
279 ["Valvula direccional", Laminador, 9] 1
280 ["Valvula direccional", Laminador, 10] 0
281 ["Valvula direccional", Laminador, 11] 0
282 ["Valvula direccional", Laminador, 12] 0
283 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 1] 0
284 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 2] 0
285 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 3] 0
286 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 4] 0
287 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 5] 1
288 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 6] 0
289 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 7] 0
290 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 8] 0
291 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 9] 0
292 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 10] 0
293 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 11] 0
294 ["Variador de Frecuencia", Laminador, 12] 1
295 ["Elektrodhenal", Soldadora, 1] 0
296 ["Elektrodhenal", Soldadora, 2] 0
297 ["Elektrodhenal", Soldadora, 3] 1
298 ["Elektrodhenal", Soldadora, 4] 0

```

299 ["Elektrodhenal", Soldadora, 5] 0  
 300 ["Elektrodhenal", Soldadora, 6] 0  
 301 ["Elektrodhenal", Soldadora, 7] 0  
 302 ["Elektrodhenal", Soldadora, 8] 0  
 303 ["Elektrodhenal", Soldadora, 9] 0  
 304 ["Elektrodhenal", Soldadora, 10] 2  
 305 ["Elektrodhenal", Soldadora, 11] 1  
 306 ["Elektrodhenal", Soldadora, 12] 0  
 307 ["Embrague", Soldadora, 1] 0  
 308 ["Embrague", Soldadora, 2] 0  
 309 ["Embrague", Soldadora, 3] 0  
 310 ["Embrague", Soldadora, 4] 5  
 311 ["Embrague", Soldadora, 5] 0  
 312 ["Embrague", Soldadora, 6] 0  
 313 ["Embrague", Soldadora, 7] 0  
 314 ["Embrague", Soldadora, 8] 0  
 315 ["Embrague", Soldadora, 9] 0  
 316 ["Embrague", Soldadora, 10] 0  
 317 ["Embrague", Soldadora, 11] 1  
 318 ["Embrague", Soldadora, 12] 1  
 319 ["Emisor optico", Soldadora, 1] 0  
 320 ["Emisor optico", Soldadora, 2] 0  
 321 ["Emisor optico", Soldadora, 3] 0  
 322 ["Emisor optico", Soldadora, 4] 0  
 323 ["Emisor optico", Soldadora, 5] 0  
 324 ["Emisor optico", Soldadora, 6] 0  
 325 ["Emisor optico", Soldadora, 7] 0  
 326 ["Emisor optico", Soldadora, 8] 0  
 327 ["Emisor optico", Soldadora, 9] 0  
 328 ["Emisor optico", Soldadora, 10] 0  
 329 ["Emisor optico", Soldadora, 11] 0  
 330 ["Emisor optico", Soldadora, 12] 0  
 331 ["Holder", Soldadora, 1] 0  
 332 ["Holder", Soldadora, 2] 0  
 333 ["Holder", Soldadora, 3] 0  
 334 ["Holder", Soldadora, 4] 0  
 335 ["Holder", Soldadora, 5] 0  
 336 ["Holder", Soldadora, 6] 0  
 337 ["Holder", Soldadora, 7] 0  
 338 ["Holder", Soldadora, 8] 1  
 339 ["Holder", Soldadora, 9] 0  
 340 ["Holder", Soldadora, 10] 0  
 341 ["Holder", Soldadora, 11] 0  
 342 ["Holder", Soldadora, 12] 1  
 343 ["Fuelle metalico", Soldadora, 1] 0  
 344 ["Fuelle metalico", Soldadora, 2] 0  
 345 ["Fuelle metalico", Soldadora, 3] 0  
 346 ["Fuelle metalico", Soldadora, 4] 0  
 347 ["Fuelle metalico", Soldadora, 5] 3  
 348 ["Fuelle metalico", Soldadora, 6] 0  
 349 ["Fuelle metalico", Soldadora, 7] 0  
 350 ["Fuelle metalico", Soldadora, 8] 0  
 351 ["Fuelle metalico", Soldadora, 9] 0  
 352 ["Fuelle metalico", Soldadora, 10] 0  
 353 ["Fuelle metalico", Soldadora, 11] 0  
 354 ["Fuelle metalico", Soldadora, 12] 2  
 355 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 1] 0  
 356 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 2] 0  
 357 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 3] 0  
 358 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 4] 8  
 359 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 5] 0  
 360 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 6] 0  
 361 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 7] 0  
 362 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 8] 0

```

363 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 9] 0
364 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 10] 0
365 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 11] 0
366 ["Rodillo de enderezar", Soldadora, 12] 0
367 ["Planchuelas", Soldadora, 1] 0
368 ["Planchuelas", Soldadora, 2] 0
369 ["Planchuelas", Soldadora, 3] 0
370 ["Planchuelas", Soldadora, 4] 20
371 ["Planchuelas", Soldadora, 5] 0
372 ["Planchuelas", Soldadora, 6] 0
373 ["Planchuelas", Soldadora, 7] 0
374 ["Planchuelas", Soldadora, 8] 0
375 ["Planchuelas", Soldadora, 9] 0
376 ["Planchuelas", Soldadora, 10] 9
377 ["Planchuelas", Soldadora, 11] 0
378 ["Planchuelas", Soldadora, 12] 0
379 ["Deckplatte", Soldadora, 1] 0
380 ["Deckplatte", Soldadora, 2] 0
381 ["Deckplatte", Soldadora, 3] 0
382 ["Deckplatte", Soldadora, 4] 0
383 ["Deckplatte", Soldadora, 5] 2
384 ["Deckplatte", Soldadora, 6] 0
385 ["Deckplatte", Soldadora, 7] 0
386 ["Deckplatte", Soldadora, 8] 0
387 ["Deckplatte", Soldadora, 9] 0
388 ["Deckplatte", Soldadora, 10] 8
389 ["Deckplatte", Soldadora, 11] 0
390 ["Deckplatte", Soldadora, 12] 0
391 ["Kanal", Soldadora, 1] 3
392 ["Kanal", Soldadora, 2] 0
393 ["Kanal", Soldadora, 3] 0
394 ["Kanal", Soldadora, 4] 0
395 ["Kanal", Soldadora, 5] 0
396 ["Kanal", Soldadora, 6] 0
397 ["Kanal", Soldadora, 7] 1
398 ["Kanal", Soldadora, 8] 0
399 ["Kanal", Soldadora, 9] 0
400 ["Kanal", Soldadora, 10] 0
401 ["Kanal", Soldadora, 11] 0
402 ["Kanal", Soldadora, 12] 0
403 ["Klappe", Soldadora, 1] 0
404 ["Klappe", Soldadora, 2] 0
405 ["Klappe", Soldadora, 3] 0
406 ["Klappe", Soldadora, 4] 2
407 ["Klappe", Soldadora, 5] 0
408 ["Klappe", Soldadora, 6] 0
409 ["Klappe", Soldadora, 7] 0
410 ["Klappe", Soldadora, 8] 2
411 ["Klappe", Soldadora, 9] 0
412 ["Klappe", Soldadora, 10] 5
413 ["Klappe", Soldadora, 11] 1
414 ["Klappe", Soldadora, 12] 0
415 ["Receptor", Soldadora, 1] 0
416 ["Receptor", Soldadora, 2] 0
417 ["Receptor", Soldadora, 3] 0
418 ["Receptor", Soldadora, 4] 0
419 ["Receptor", Soldadora, 5] 0
420 ["Receptor", Soldadora, 6] 0
421 ["Receptor", Soldadora, 7] 0
422 ["Receptor", Soldadora, 8] 1
423 ["Receptor", Soldadora, 9] 0
424 ["Receptor", Soldadora, 10] 1
425 ["Receptor", Soldadora, 11] 0
426 ["Receptor", Soldadora, 12] 0

```

```

427 ["Fotocelula", Soldadora, 1] 0
428 ["Fotocelula", Soldadora, 2] 0
429 ["Fotocelula", Soldadora, 3] 0
430 ["Fotocelula", Soldadora, 4] 0
431 ["Fotocelula", Soldadora, 5] 0
432 ["Fotocelula", Soldadora, 6] 5
433 ["Fotocelula", Soldadora, 7] 4
434 ["Fotocelula", Soldadora, 8] 0
435 ["Fotocelula", Soldadora, 9] 0
436 ["Fotocelula", Soldadora, 10] 0
437 ["Fotocelula", Soldadora, 11] 0
438 ["Fotocelula", Soldadora, 12] 3
439 ["Emisor", Soldadora, 1] 0
440 ["Emisor", Soldadora, 2] 0
441 ["Emisor", Soldadora, 3] 0
442 ["Emisor", Soldadora, 4] 0
443 ["Emisor", Soldadora, 5] 0
444 ["Emisor", Soldadora, 6] 0
445 ["Emisor", Soldadora, 7] 0
446 ["Emisor", Soldadora, 8] 0
447 ["Emisor", Soldadora, 9] 0
448 ["Emisor", Soldadora, 10] 0
449 ["Emisor", Soldadora, 11] 0
450 ["Emisor", Soldadora, 12] 0
451 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 1] 0
452 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 2] 1
453 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 3] 2
454 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 4] 0
455 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 5] 0
456 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 6] 0
457 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 7] 0
458 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 8] 0
459 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 9] 0
460 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 10] 0
461 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 11] 0
462 ["Disc Scheibe aussen", Soldadora, 12] 0
463 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 1] 0
464 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 2] 0
465 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 3] 0
466 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 4] 0
467 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 5] 0
468 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 6] 1
469 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 7] 1
470 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 8] 1
471 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 9] 0
472 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 10] 0
473 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 11] 0
474 ["Disc Scheibe innen", Soldadora, 12] 0;
475
476
477
478
479 param C_desabastecimiento :=
480     [Soldadora] 400000
481     [Laminador] 400000 ;
482
483
484 param C_compra:=
485     ["Bobina"] 367835
486     ["Brazo de la horquilla"] 27614
487     ["Cabezal"] 2717
488     ["Modulo salida digital"] 3566
489     ["Micro interruptor"] 2996
490     ["Rodamiento 32008X"] 43744

```

```

491 ["Reductor"] 19596
492 ["Reflector LED"] 11911
493 ["Rodamiento SR21"] 11213
494 ["Rodamiento 2Z"] 2564
495 ["Sensor inductivo"] 12528
496 ["Solapa 150 izquierda"] 14707
497 ["Termistor proteccion motor"] 3785
498 ["Valvula direccional"] 11035
499 ["Variador de Frecuencia"] 27211
500 ["Elektrodhenal"] 8456
501 ["Embrague"] 13696
502 ["Emisor optico"] 129823
503 ["Holder"] 7336
504 ["Fuelle metalico"] 27627
505 ["Rodillo de enderezar"] 4000
506 ["Planchuelas"] 1500
507 ["Deckplatte"] 2647
508 ["Kanal"] 26901
509 ["Klappe"] 35086
510 ["Receptor"] 60014
511 ["Fotocelula"] 7189
512 ["Emisor"] 94159
513 ["Disc Scheibe aussen"] 97267
514 ["Disc Scheibe innen"] 54025;
515
516
517 param S := 400;
518
519
520 set CHICO:=
521     "Micro interruptor"
522     "Rodamiento 3208X"
523     "Rodamiento SR21"
524     "Rodamiento 2Z"
525     "Sensor inductivo"
526     "Emisor optico"
527     "Fuelle metalico"
528     "Planchuelas"
529     "Deckplatte"
530     "Disc Scheibe aussen"
531     "Disc Scheibe innen" ;
532
533 set MEDIANO:=
534     "Cabezal"
535     "Solapa 150 izquierda"
536     "Termistor proteccion motor"
537     "Valvula direccional"
538     "Elektrodhenal"
539     "Embrague"
540     "Holder"
541     "Rodillo de enderezar"
542     "Kanal"
543     "Klappe"
544     "Fotocelula"
545     "Emisor";
546
547 set GRANDE:=
548     "Bobina"
549     "Brazo de la horquilla"
550     "Modulo salida digital"
551     "Reductor"
552     "Reflector LED"
553     "Variador de Frecuencia"
554     "Receptor" ;

```

```

555
556
557 param s_chico := 1;
558 param s_mediano := 2;
559 param s_grande := 3;
560
561 param P:= 4000000;
562
563 param C_envio_MERCOSUR := 20000;
564 param C_envio_OTROS := 20000;
565
566
567 param M := 100;
568
569 end;

```

Listing 1: Archivo de datos completo: final.dat

## 7.6. Demanda en los escenarios

A continuación, se presentan los valores obtenidos para la distribución de Stuttering Poisson en cada escenario considerado: bajo, medio y alto.

Repuesto	Demanda Mes 1	Demanda Mes 2	Demanda Mes 3	Demanda Mes 4	Demanda Mes 5	Demanda Mes 6	Demanda Mes 7	Demanda Mes 8	Demanda Mes 9	Demanda Mes 10	Demanda Mes 11	Demanda Mes 12
Bobina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brazo de la horquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cabezal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Modulo salida digital	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Micro interruptor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rodamiento 32008X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reductor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reflector LED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rodamiento SR21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rodamiento 2Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sensor inductivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solapa 150 izquierda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Thermistor proteccion motor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valvula direccional	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variador de Frecuencia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektrodhenal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Embrague	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisor optico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Holder	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuelle metalico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rodillo de enderezar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planchuelas	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0
Deckplatte	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Kanal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Klappe	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Receptor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fotocelula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emisor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Disc Scheibe aussen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Disc.Scheibe innen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 53: Demanda escenario bajo - elaboración propia.

Repuesto	Demanda Mes 1	Demanda Mes 2	Demanda Mes 3	Demanda Mes 4	Demanda Mes 5	Demanda Mes 6	Demanda Mes 7	Demanda Mes 8	Demanda Mes 9	Demanda Mes 10	Demanda Mes 11	Demanda Mes 12
Bobina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brazo de la horquilla	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Cabezal	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Modulo salida digital	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2
Micro interruptor	1	1	2	1	0	1	1	1	2	1	1	0
Rodamiento 32008X	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Reductor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reflector LED	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
Rodamiento SR21	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rodamiento 2Z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor inductivo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Solapa 150 izquierda	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Thermistor proteccion motor	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Valvula direccional	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variador de Frecuencia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektrodhenal	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
Embrague	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
Emisor optico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Holder	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
Fuelle metalico	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0
Rodillo de enderezar	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Planchuelas	20	20	20	19	15	20	20	20	18	20	20	20
Deckplatte	3	6	8	5	4	5	7	5	5	7	5	7
Kanal	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Klappe	2	1	2	2	2	1	2	1	2	3	2	3
Receptor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fotocelula	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Emisor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Disc Scheibe aussen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Disc Scheibe innen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 54: Demanda escenario medio - elaboración propia.

Repuesto	Demanda Mes 1	Demanda Mes 2	Demanda Mes 3	Demanda Mes 4	Demanda Mes 5	Demanda Mes 6	Demanda Mes 7	Demanda Mes 8	Demanda Mes 9	Demanda Mes 10	Demanda Mes 11	Demanda Mes 12
Bobina	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
Brazo de la horquilla	2	3	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3
Cabezal	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2
Modulo salida digital	3	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3	4
Micro interruptor	2	3	2	3	3	2	3	3	3	2	3	2
Rodamiento 32008X	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Reductor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Reflector LED	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1
Rodamiento SR21	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Rodamiento 2Z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor inductivo	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Solapa 150 izquierda	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Thermistor proteccion motor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Valvula direccional	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
Variador de Frecuencia	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
Elektrodhenal	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1
Embrague	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Emisor optico	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1
Holder	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1
Fuelle metalico	2	2	3	2	3	3	2	2	2	2	1	1
Rodillo de enderezar	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2
Planchuelas	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Deckplatte	13	12	13	9	12	12	13	13	12	12	11	12
Kanal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Klappe	3	3	4	4	4	4	4	5	3	4	3	3
Receptor	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
Fotocelula	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2
Emisor	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
Disc Scheibe aussen	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1
Disc Scheibe innen	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2

Figura 55: Demanda escenario alto - elaboración propia.

## Bibliografia

- Afdal, Z. A. and Linarti, U. (2023). Preventive maintenance analysis using monte carlo simulation and failure mode and effect analysis (fmea). *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 22(2). Available online 24 December 2023.
- Affonso, T. B., Conceição, S. V., Muniz, L. R., Almeida, J. F. F., and Lima, J. C. (2024). A new hybrid forecasting method for spare part inventory management using heuristics and bootstrapping. *Journal of Data Analytics*. Available online 7 February 2024.
- Andrade, A. L., Álvaro Paz Graziani, de Freitas, D. S., Perini, S. J. B., and de Oliveira Junior, P. (2023). Application of the 5s program in inventory management in the supplies warehouse: A case study in a dental products industry. *Centro Universitário SENAI Santa Catarina - UniSENAI Campus Joinville, Santa Catarina, N/A(N/A):N/A*. Received: 01/09/2023, Approved: 26/11/2023, Published: 26/12/2023.
- Babaveisi, V., Teimoury, E., and Gholamian, M. R. (2023). A planning model for repairable spare part supply chain considering stochastic demand and backorder: An empirical investigation. *Journal of Industrial Engineering*.
- Baisariyev, M., Bakytzhanuly, A., Serik, Y., Mukhanova, B., Babai, M., Tsakalerou, M., and Papadopoulos, C. (2021). Demand forecasting methods for spare parts logistics for aviation: a real-world implementation of the bootstrap method. *Procedia Manufacturing*, 55:500–506.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación, México, quinta edición edition. Área: Universitarios, Formato: 18.5 x 23.5 cm, Páginas: 816.
- Campos Lopes, R., Argolo Mendes, A. C., João Lunkes, R., and Donadio Costa, G. (2019). Utilização da simulação de monte carlo na gestão de estoques para empresas farmacêuticas. *Revista Ambiente Contábil*, 11(2):1–18.
- Cervantes, C., Kikushima, A., and Flores-Perez, A. (2023). Improvement proposal applying slp and 5s in the confectionery industry: Case of a sme in peru. *Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima*.
- Chen, J., Jackson, P. L., and Muckstadt, J. A. (2010). Stock optimization in emergency resupply networks under stuttering poisson demand. Technical report, School of Operations Research and Information Engineering, Cornell University.
- Dursun, , Akcay, A., and van Houtum, G.-J. (2023). How good must failure predictions be to make local spare parts stock superfluous? Available online 11 October 2023.
- El-Assal, A. M., Roubi, Z., and Eldogdog, T. M. (2024). A review of spare parts inventory management: Different methods of spare parts classification and inventory control techniques. *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Benha University*.
- Gordon, C. K. and Mannan, M. S. (2018). Multi-objective stochastic optimization for preventive maintenance planning. In *21st Annual International Symposium*, College Station, Texas.
- Hafidz, A. and Soediantono, D. (2022). Benefits of 5s implementation and recommendation in the defense industry: A literature review. *International Journal of Social and Management Studies (IJOSMAS)*, 3(3).

- Halty, A., Sanchez, R., Vazquez, V., Viana, V., Pineyro, P., and Rossit, D. A. (2023). Scheduling in cloud manufacturing systems: Recent systematic literature review. *Review*. Correspondence: daniel.rossit@uns.edu.ar, Tel: +54-0291-4595156.
- Hamedi, M., Sharafi, S., and Tagheh Delshad, M. (2019). Optimization of preventive maintenance scheduling based on monte carlo simulation in processing plants. *IEEE*.
- Hwang, J. Q. and Samat, H. A. (2019). A review on joint optimization of maintenance with production planning and spare part inventory management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 530:012048.
- Jackson, I. (2019). Combining simulation with genetic algorithm for solving stochastic multi-product inventory optimization problem. . , 130(4):96–102.
- Johannsmann, L. M., Craparo, E. M., Dieken, T. L., Fügenschuh, A. R., and Seitner, B. O. (2022). Stochastic mixed-integer programming for a spare parts inventory management problem. *Computers & Operations Research*, 138:105568.
- Kaya, B., Karabağ, O., Çekiç, F. R., Torun, B. C., Ömrüm Başay, A., Işıklı, Z. E., and Çağlar Çakır (2024). Inventory management optimization for intermittent demand. In Durakbasa, N. M. and Gençyılmaz, M. G., editors, *ISPR 2023*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pages 768–782. Springer Nature Switzerland AG.
- Mrabti, A., Bouajaja, S., Hachicha, H. K., and Nouri, K. (2023). Digital 5s: A case study of an automotive wiring industry. *Advanced System Laboratory (LSA), Carthage University LR11ES27, Tunis; OASIS-ENIT, El Manar University BP 37 Le Belvédère, Tunis, Tunisia*.
- Muttaqin, P. S. and Damayanti, D. D. (2018). Joint optimization of inventory and preventive maintenance: Systematic literature review and research agenda. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 6(2):45–49.
- Pan, G., You, M., Luo, Q., Li, X., and Wang, Y. (2019). Optimization method of equipment spare parts based on monte carlo simulation.
- Pinçe, , Turrini, L., and Meissner, J. (2021). Intermittent demand forecasting for spare parts: A critical review. Available online 3 July 2021.
- Rashindra, A. D., Zulkarnaen, G. S., Pahala, Y., and Saidah, D. (2023). Application and design of production room layout with 5s 2013 arc method to reduce waste: Case study on rubber industry production. *Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia*.
- Seyedan, M., Mafakheri, F., and Wang, C. (2023). Order-up-to-level inventory optimization model using time-series demand forecasting with ensemble deep learning. *Journal of Supply Chain Management*, 28(2):102–118.
- Shahriar, M., Parvez, M., Islam, M., and Talapatra, S. (2023). Implementation of 5s in a plastic bag manufacturing industry: A case study. *Department of Industrial Engineering and Management, Khulna University of Engineering Technology, Khulna, Bangladesh*.
- Shia, J., Rozas, H., Yildirim, M., and Gebraeel, N. (2022). A stochastic programming model for jointly optimizing maintenance and spare parts inventory for iot applications. Technical report, H. Milton Stewart School of Industrial Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA; Industrial and Systems Engineering, Wayne State University, Detroit, MI, USA.

- Stranieri, F., Fadda, E., and Stella, F. (2024). Combining deep reinforcement learning and multi-stage stochastic programming to address the supply chain inventory management problem. *International Journal of Production Economics*, 268:109099.
- Sukolkit, N., Arunyanart, S., and Apichottanakul, A. (2024). An open innovative inventory management based demand forecasting approach for the steel industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*.
- Tan, N. D., Kim, H.-S., Long, L. N. B., Nguyen, D. A., and You, S.-S. (2024). Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm. *PLOS ONE*, 19(1).
- Turrini, L. and Meissner, J. (2018). Spare parts inventory management: New evidence from distribution fitting. Technical report, European Business School, Kuehne Logistics University.
- Zhang, H., Chu, L., and Diao, Y. (2012). Some properties of the generalized stuttering poisson distribution and its applications.