

Escuela de Negocios

Tipo de documento: Tesis de maestría



Master in Management + Analytics

Modelo de optimización de la producción de placas de celulosa

Autoría: Rattero, Antonella

Año: 2025

¿Cómo citar este trabajo?

Rattero, A. (2025) "*Modelo de optimización de la producción de placas de celulosa*". [Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella.

<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/13753>

El presente documento se encuentra alojado en el **Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella** bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Dirección: <https://repositorio.utdt.edu>



Master in Management + Analytics

“Modelo de optimización de la producción de
placas de celulosa”

Autora: Antonella Rattero

Tutor: Javier Marengo

Mayo 2025

Resumen

Esta tesis tiene como objetivo principal desarrollar un modelo de optimización para una empresa familiar que produce placas de celulosa, un componente esencial en sistemas de enfriamiento evaporativo. El modelo mejora la eficiencia y aborda problemas como la falta de planificación de inventario y la digitalización de datos.

El análisis de datos históricos de ventas y producción revela una demanda estacional, con picos en la segunda mitad de cada año, y costos variables asociados a insumos, mano de obra y energía eléctrica. Para optimizar su producción, se construye un modelo de programación lineal entera minimizando los costos, satisfaciendo la demanda y considerando restricciones como la capacidad de producción y el almacenamiento limitado.

Se evalúan cuatro escenarios: un escenario inicial basado en la demanda de 2024, un primer escenario alternativo con mayor demanda debido a una alianza con un revendedor, un segundo escenario alternativo con aumento de costos y un tercer escenario alternativo con mayor capacidad de almacenamiento. Los resultados muestran que la empresa puede satisfacer la demanda en todos los escenarios, pero enfrenta desafíos como la gestión eficiente del inventario y la necesidad de contratar personal adicional o ampliar la capacidad de producción.

El modelo proporciona información valiosa para la toma de decisiones estratégicas, como la planificación de la producción, la gestión del inventario y la contratación de personal. También destaca la importancia de la digitalización de datos y la planificación financiera en la gestión empresarial. Las recomendaciones incluyen la contratación de personal a largo plazo, la evaluación de la rentabilidad de las inversiones y la mejora continua de los procesos productivos para mantener la competitividad y la rentabilidad en un mercado cambiante.

Abstract

This thesis aims to develop an optimization model for a family business that produces cellulose plates, an essential component in evaporative cooling systems. The model improves efficiency and addresses problems such as lack of inventory planning and data digitization.

Analysis of historical sales and production data reveals seasonal demand, with peaks in spring and summer, and variable costs associated with inputs, staff and electricity. To optimize production, an integer linear programming model is built by minimizing costs, satisfying demand, and considering restrictions such as production capacity and limited storage.

Four scenarios are evaluated: an initial scenario based on the 2024 demand, a first alternative scenario with higher demand due to an alliance with a reseller, a second alternative scenario with increased costs, and a third alternative scenario with increased storage capacity. The results show that the company can meet demand in all scenarios, but faces challenges such as efficient inventory management and the need to hire additional staff or expand production capacity.

The model provides valuable information for strategic decision-making, such as production planning, inventory management, and staffing. It also highlights the importance of data digitization and financial planning in business management. Recommendations include long-term hiring of personnel, evaluation of the profitability of investments, and continuous improvement of production processes to maintain competitiveness and profitability in a changing market.

Índice

Resumen	2
Abstract	3
Índice	4
1. Capítulo 1: Introducción	5
1.1. Contexto empresarial	5
1.2. Problemas y limitaciones	6
1.3. Objetivo del trabajo	7
1.4. Contenido de la tesis	8
2. Capítulo 2: Análisis descriptivo de los datos	9
2.1. Disponibilidad de datos	9
2.1.1. Descripción de los datasets	10
2.2. Productos más vendidos	11
2.2.1. Selección de modelos de placas	11
2.2.2. Estandarización de modelos de placas	15
2.3. Insumos para la producción	15
2.4. Producción y ventas	16
2.4.1. Selección de rangos de fechas	16
2.4.2. Análisis de estacionalidad	17
2.5. Costos de producción	19
2.5.1. Insumos	19
2.5.2. Mano de obra	19
2.5.3. Energía eléctrica	20
2.5.4. Costos totales	24
3. Capítulo 3: Modelo de optimización	25
4. Capítulo 4: Implementación y resultados	29
4.1. Escenario inicial	29
4.1.1. Implementación del modelo	29
4.1.2. Resultados preliminares	30
4.1.3. Análisis de resultados	31
4.2. Escenarios alternativos	34
4.2.1. Escenario alternativo 1	34
4.2.1.1. Análisis de rentabilidad	39
4.2.2. Escenario alternativo 2	40
4.2.3. Escenario alternativo 3	43
4.2.3.1. Análisis de rentabilidad	46
4.2.4. Conclusión al análisis de rentabilidad	47
5. Capítulo 5: Recomendaciones	49
5.1. Contratación de personal	49
5.2. Limitaciones del modelo predictivo	50
6. Capítulo 6: Conclusiones	52
Bibliografía	54
Apéndices	55

1. Capítulo 1: Introducción

1.1. Contexto empresarial

La empresa familiar se dedica a la producción de placas de celulosa, un componente esencial en el armado de paneles evaporativos. Estos paneles se utilizan para el enfriamiento de grandes espacios, siendo su aplicación más común en el sector agropecuario. Sin embargo, existe un amplio potencial para su uso en diversos entornos que requieran un sistema de enfriamiento eficiente y amigable con el medio ambiente, como ser, centros comerciales, museos, talleres, invernaderos, etc.

Las placas de celulosa se pueden personalizar según las necesidades del cliente. Sin embargo, generalmente, los paneles evaporativos tienen medidas estándares de 180 cm x 60 cm x 15 cm y 200 cm x 60 cm x 15 cm. También pueden ser pintadas o sin pintar, siendo la primera opción la más solicitada debido a su mayor protección y durabilidad.

La empresa actualmente opera bajo un sistema de fabricación por demanda. Para pedidos pequeños de hasta 20 placas estándares, la entrega es inmediata gracias a la disponibilidad de stock. Sin embargo, para pedidos mayores a 20 placas, o aquellos que requieren medidas especiales, la entrega puede demorar entre 3 y 7 días hábiles. La planificación del stock se basa en datos de los últimos 2 años, que a priori, muestran un aumento de la demanda durante los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, que es la temporada primavera-verano en Argentina, y una disminución en los meses restantes, que coinciden con el periodo invernal en este país.

El proceso de producción de la empresa dura dos días y medio, y da como resultado un batch de 90 hojas de celulosa. Este batch se corta luego en hasta cuatro placas, dependiendo de las medidas solicitadas; el material sobrante se desecha. Como paso final, y solo si el cliente lo solicita, las placas pueden pintarse con una resina protectora.

Las Figuras 1 y 2 muestran ejemplos de placas, mientras que la Figura 3 muestra cómo funciona el enfriamiento de ambientes.

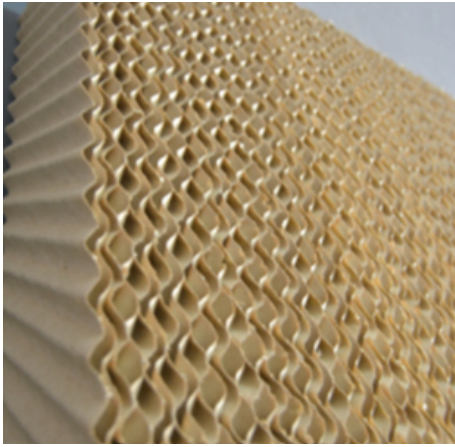


Figura 1: placa sin pintar

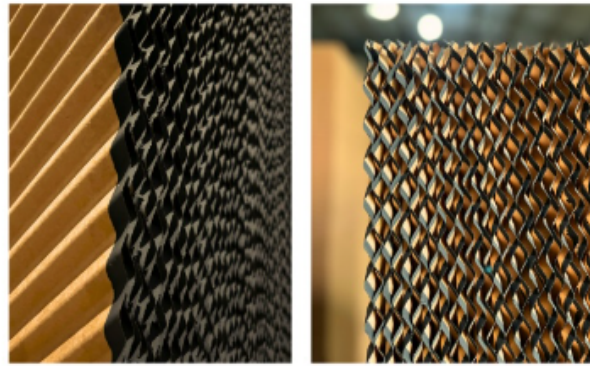


Figura 2: placa pintada

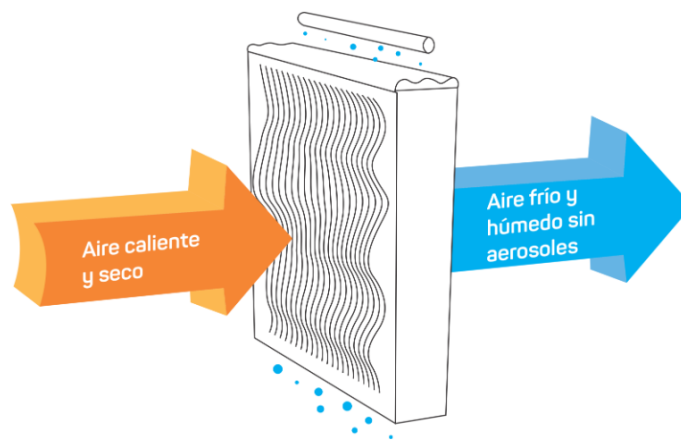


Figura 3: sistema de enfriamiento con paneles

1.2. Problemas y limitaciones

Tras analizar la situación actual de la empresa y la solicitud de información, se identificaron ciertos factores que impactan directamente en el desarrollo del negocio.

Contexto interno:

- Modelo de fabricación por demanda: La empresa opera bajo un modelo reactivo, fabricando productos solo cuando se realizan pedidos, lo que puede generar demoras y afectar la satisfacción del cliente.
- No planificación del stock: La falta de un sistema de gestión de inventario adecuado provoca desabastecimiento de materias primas y productos terminados, lo que resulta en pérdidas de ventas y clientes insatisfechos.
- Falta de digitalización de datos: La ausencia de un sistema de registro y análisis de datos impide la toma de decisiones informadas y la optimización de los procesos productivos.

- Datos discontinuos en el tiempo: La información incompleta o inconsistente dificulta la identificación de tendencias y la previsión de la demanda.
- No planificación de costos y pérdidas de ganancia: La falta de un control financiero riguroso y la ausencia de un análisis de costos detallado generan pérdidas económicas y dificultan la rentabilidad del negocio.
- Modelo de ventas precario: El actual modelo de ventas, basado en llamadas telefónicas esporádicas a contactos existentes en la industria, limita el alcance y la capacidad de crecimiento de la empresa.

Contexto externo:

- Contexto socioeconómico cambiante: La inestabilidad económica, las variaciones en las tarifas de servicios públicos, las fluctuaciones en el tipo de cambio, los cambios de gobierno y los aumentos salariales impactan en los costos de producción y en la demanda de los productos.
- Problemas con importaciones de insumos: Las restricciones a las importaciones, los retrasos en la entrega y los aumentos en los precios de las materias primas importadas afectan la producción y aumentan los costos.
- Tardanza en la producción de resina (insumo nacional): La dependencia de un insumo clave de producción nacional con retrasos en la entrega genera incertidumbre y afecta la capacidad de producción.
- Única fábrica en el país: al ser la única fábrica de este tipo de paneles en Argentina y la región, la competencia se vuelve internacional.

Limitaciones:

- Personal: El equipo de trabajo actual está compuesto por solo dos empleados y el propietario, que además de gestionar el negocio, también participa en la ejecución de tareas manuales.
- Suministro eléctrico: La disponibilidad de energía eléctrica depende de la cooperativa local y puede ser inestable.
- Espacio: La capacidad de almacenamiento es limitada.

1.3. Objetivo del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo de optimización de la producción por lotes (batch sizing) que permita una gestión más eficiente y eficaz de los recursos disponibles. A través de este modelo, se busca minimizar el tiempo de inactividad

de los recursos, eliminar los cuellos de botella que puedan surgir en el proceso productivo y, en general, aumentar la eficiencia de la producción. Como resultado de estas mejoras, se espera lograr una reducción significativa en los costos operativos, impactando positivamente en la rentabilidad de la empresa.

Además de lo anterior, este trabajo también tiene como objetivo abordar algunas de las problemáticas y limitaciones que fueron identificadas en la Sección 1.2 del documento. A partir de este análisis, se busca formular recomendaciones prácticas y aplicables que puedan ser implementadas en la gestión empresarial, contribuyendo así a la mejora continua de los procesos productivos.

1.4. Contenido de la tesis

A lo largo de este trabajo, se realizará un análisis exhaustivo de los datos históricos de ventas y producción para identificar patrones de demanda y costos asociados. A partir de este análisis, se diseñará e implementará un modelo de programación lineal entera de la producción con el fin de satisfacer la demanda, minimizando los costos, y siempre considerando las restricciones actuales de capacidad y almacenamiento. El modelo será evaluado en diferentes escenarios, incluyendo un escenario inicial basado en la demanda actual y varios escenarios alternativos que contemplan cambios en la demanda, en los costos y en la capacidad de almacenamiento. Finalmente, se presentarán recomendaciones estratégicas para la toma de decisiones empresariales, basadas en los resultados obtenidos.

2. Capítulo 2: Análisis descriptivo de los datos

2.1. Disponibilidad de datos

Al hacer un entendimiento del negocio, se encontraron los siguientes conjuntos de datos: producción, ventas, compras de insumos y detalle de insumos por producto final/semifinal. Refiérase al Apéndice A para ver los tipos de datos disponibles en cada dataset, y al Apéndice B para un entendimiento de la relación entre ellos. Posteriormente también se obtuvieron el registro de boletas de energía eléctrica y el registro de sueldos de empleados, a fin de complementar los costos involucrados en el desenvolvimiento del negocio. Todos los datos fueron obtenidos directamente del propietario de la fábrica. Se venían registrando de forma manual en papel, por lo que uno de los primeros pasos para la estructuración del presente trabajo, consistió en ordenar, clasificar y finalmente digitalizar la información brindada. Cabe destacar que este paso inicial resulta ser de gran aporte para la empresa, ya que colabora con el desarrollo de una gestión más eficiente y una toma de decisiones mejor informada.

La serie de datos obtenida va desde julio de 2022 hasta diciembre de 2024, pero debido a la estacionalidad propia de esta industria, hay datos solo para algunos meses. Como se verá más adelante, hay meses en que la fábrica permanece parada debido a la baja demanda.

Durante el análisis preliminar de los datos obtenidos, se observaron faltantes de datos para ciertos rangos de fechas. Ante esta duda, la empresa informó que al tratarse de un emprendimiento y teniendo en cuenta que el dueño tiene una fuerte formación técnica específica del rubro pero no así respecto de la administración de un negocio, la registración de datos fue relegada y por momentos inexistente. Con el pasar del tiempo y el afianzamiento de las tareas, se comenzaron a registrar de forma manual algunos de los procesos, aunque todavía con faltas de exactitud. Algunos de los faltantes tienen que ver con el tipo de tarea productiva realizada, la cantidad de productos finales obtenidos, la fecha en que se concretaron las ventas y los modelos de placas vendidos. Estos registros incompletos se concentran en fechas que van desde julio de 2022 hasta diciembre de 2023.

Si bien para este trabajo se observaron la totalidad de los datos entregados por la empresa, para el modelo predictivo se tuvieron en cuenta los datos del último año, es decir de enero de 2024 a diciembre de 2024, que resultan ser los más exactos y completos. En una sección posterior, se explican en mayor profundidad los rangos de fechas contemplados en el modelo.

Con respecto al proceso productivo, este consta de cuatro pasos. El primero es la impregnación: el papel se impregna en resina, para luego ser secado y cortado automáticamente en hojas según la longitud necesaria. El segundo es el armado: las hojas se hacen pasar por un rolo corrugador calefaccionado obteniéndose un batch de 90 hojas corrugadas. El mismo, pasa luego al rolo aplicador de pegamento, y posteriormente es introducido dentro de un horno prensa para su cocción. El tercer paso es el cortado: los batches ya cocidos se cortan con una sierra para lograr las placas previstas. El cuarto y último paso opcional es el pintado: las placas son sumergidas aproximadamente en 1 centímetro en una bandeja con pintura, lo que logra una capa protectora; luego las placas se dejan secar hasta el día siguiente para pasar a expedición o envasado.

2.1.1. Descripción de los datasets

- Producción: contiene un detalle de los diferentes productos finales y semifinales fabricados desde diciembre de 2023 hasta diciembre de 2024. Incluye fecha, tarea, largo de hojas, hojas por batch, y cantidad de batches. Tiene aproximadamente 258 registros.
- Ventas: contiene un listado de todos los productos vendidos desde julio de 2022 hasta diciembre de 2024. Incluye fecha, cliente, cantidad, modelo, precio en dólares, y descuento. Tiene aproximadamente 165 registros.
- Compras: historial de compras de insumos. Incluye fecha, producto, cantidad, proveedor, precio total.
- Detalle de insumos por producto: detalle de las cantidades de insumos que se requieren para fabricar cada placa en su formato estándar.
- Registro de boletas de energía eléctrica: boletas de energía de diciembre 2023 hasta diciembre 2024 que incluyen periodos facturados, consumos, cargos fijos, cargos variables, valor total en pesos, entre otros.
- Registro de sueldos de empleados: sueldos brutos en pesos pagados a empleados, cargas sociales y SAC desde enero 2024 hasta diciembre 2024.

Es importante destacar que, aunque la empresa opera en Argentina, los precios de los insumos y de los productos de la competencia están dolarizados debido a que son importados. Dada la situación inflacionaria argentina y para facilitar el análisis de datos y proyecciones, todos los precios fueron convertidos de pesos a dólares estadounidenses utilizando la cotización histórica del Banco Nación.

2.2. Productos más vendidos

En base al registro histórico de ventas, se observa que hay una variedad de 26 modelos de placas. Esta variedad tiene que ver con diferentes medidas y opción de ser pintadas o sin pintar. Haciendo un recuento, es posible identificar los modelos más vendidos. En primer lugar se posicionan las placas de medida 180 cm x 60 cm x 15 cm pintadas y 200 cm x 60 cm x 15 cm pintadas. De aquí en adelante, las placas pintadas se referencian con “P” y las placas sin pintar se referencian con “SP”. La Tabla 1 contiene los diferentes modelos ordenados en forma descendente según cantidad vendida para todo el periodo informado por la empresa (desde julio de 2022 hasta diciembre de 2024).

Modelo	SUM de Cantidad
180/60/15 P	3,419
200/60/15 P	1,960
180/60/15 SP	611
200/60/15 SP	555
200/60/10 SP	285
200/60/10 P	278
75/60/10 P	248
100/60/15 P	135
90/60/15 P	130
120/60/10 SP	116
180/60/10 SP	100
150/60/15 SP	81
150/60/15 P	50
75/55/7.4 SP	40
180/55/15 P	34
1000/55/7.4 SP	30
140/60/10 SP	30
100/60/15 SP	15
100/55/7.4 SP	12
160/60/15 SP	10
750/55/7.4 SP	10
120/60/15 SP	6
164/30/15 SP	4
164/60/15 SP	4
120/30/15 SP	3
60/60/20 SP	3
Suma total	8,169

Tabla 1: modelos de placas

2.2.1. Selección de modelos de placas

En primera instancia, se evaluó la posibilidad de agrupar los diferentes modelos en un modelo principal y tres modelos alternativos, captando así los primeros nueve modelos más vendidos. La escasa cantidad que resta quedaría contemplada en el modelo predictivo

haciendo una pequeña reducción de la capacidad productiva actual, de forma que se guarde capacidad para estos modelos que se fabrican esporádicamente.

La Tabla 2 refleja la selección de modelos principal y alternativos.

Modelo	SUM de Cantidad	
180/60/15 P	3,419	modelo principal
200/60/15 P	1,960	modelo principal
180/60/15 SP	611	modelo alternativo 1
200/60/15 SP	555	modelo alternativo 1
200/60/10 SP	285	modelo alternativo 2
200/60/10 P	278	modelo alternativo 2
75/60/10 P	248	modelo alternativo 3
100/60/15 P	135	modelo alternativo 3
90/60/15 P	130	modelo alternativo 3
120/60/10 SP	116	
180/60/10 SP	100	
150/60/15 SP	81	
150/60/15 P	50	
75/55/7.4 SP	40	
180/55/15 P	34	
1000/55/7.4 SP	30	
140/60/10 SP	30	
100/60/15 SP	15	
100/55/7.4 SP	12	
160/60/15 SP	10	
750/55/7.4 SP	10	
120/60/15 SP	6	
164/30/15 SP	4	
164/60/15 SP	4	
120/30/15 SP	3	
60/60/20 SP	3	
Suma total	8,169	

Tabla 2: modelos principales y alternativos

El modelo principal incluye las medidas estándares de “180 cm x 60 cm x 15 cm P” y “200 cm x 60 cm x 15 cm P”. El modelo alternativo 1 incluye los modelos de “180 cm x 60 cm x 15 cm SP” y “200 cm x 60 cm x 15 cm SP”. El modelo alternativo 2 incluye los modelos “200 cm x 60 cm x 10 cm SP” y “200 cm x 60 cm x 10 cm P”. Finalmente, el modelo alternativo 3 incluye los modelos “75 cm x 60 cm x 10 cm P”, “100 cm x 60 cm x 15 cm P” y “90 cm x 60 cm x 15 cm P”.

Al evaluar la distribución temporal en las ventas de cada modelo, se observa un comportamiento bastante similar entre ellos. Por un lado, las ventas agregadas de todos los modelos muestran un aumento en la segunda mitad del año, con un fuerte aumento en el mes 9. Por su parte, el modelo principal también presenta un aumento en las ventas en la segunda mitad del año, con dos picos en los meses 7 y 9. Con respecto al modelo alternativo 1, se observa un aumento pronunciado en los meses 8 y 9. El modelo alternativo

2, si bien muestra un leve aumento en el mes 8, también presenta un pico extremadamente grande en el mes 1, lo que sugiere la existencia de un pedido grande de un cliente en particular que requería una medida especial. Por el contrario, el modelo alternativo 3 tiene su pico más bajo de ventas en el mes 8, mientras que los meses restantes del año son los que tienen mayor cantidad de ventas. Finalmente, vale la pena repetir que los volúmenes de ventas para cada modelo son muy diferentes, pero un análisis individualizado de cada uno permite hallar patrones y similitudes. Los Gráficos 1 a 5 exponen la variación mensual en las ventas de los modelos mencionados.

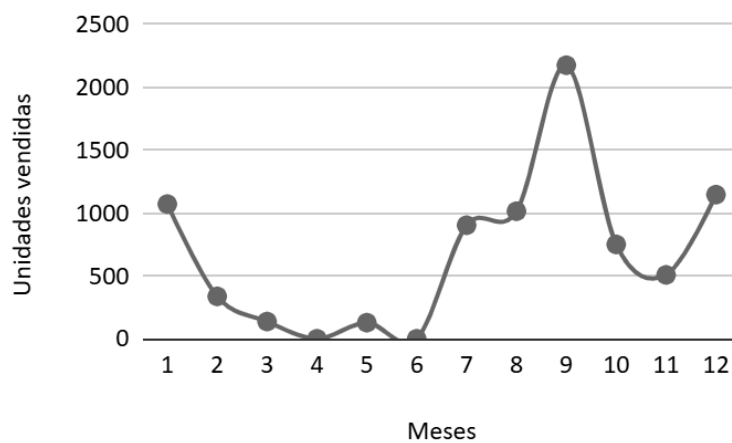


Gráfico 1: distribución en el tiempo de las ventas agregadas de todos los modelos

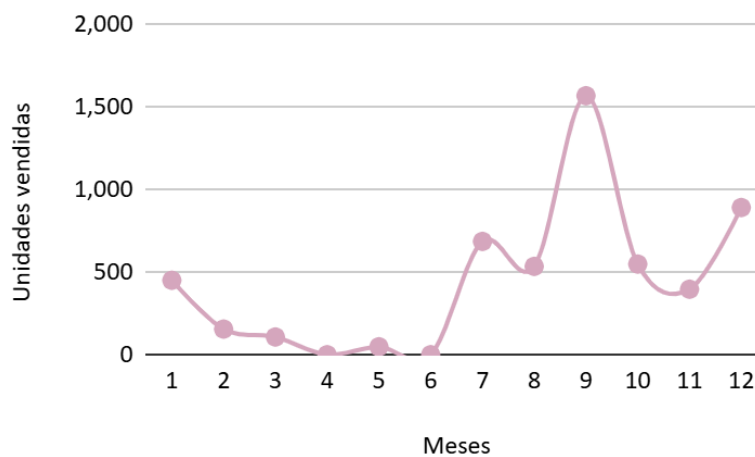


Gráfico 2: distribución en el tiempo de las ventas del modelo principal

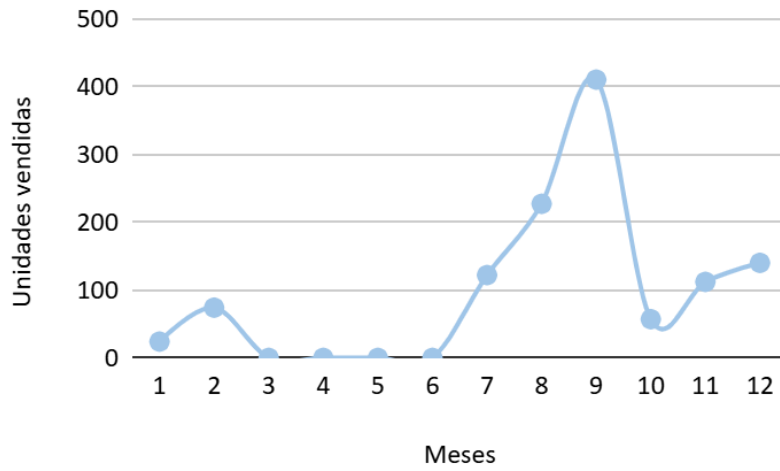


Gráfico 3: distribución en el tiempo de las ventas del modelo alternativo 1

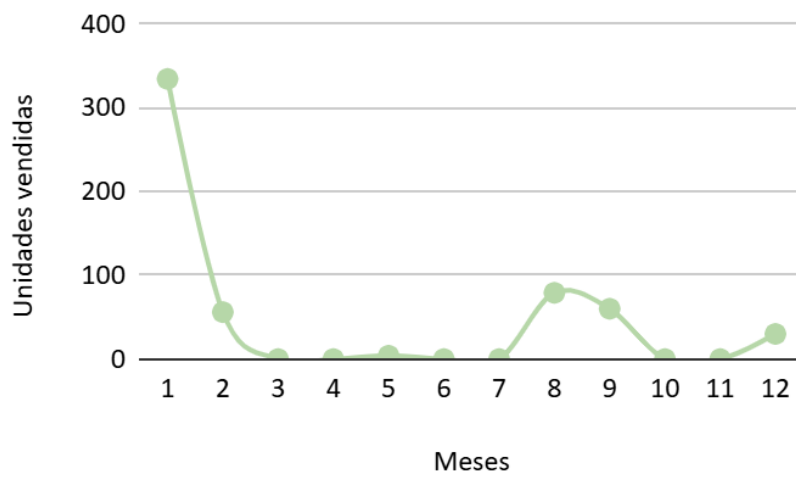


Gráfico 4: distribución en el tiempo de las ventas del modelo alternativo 2

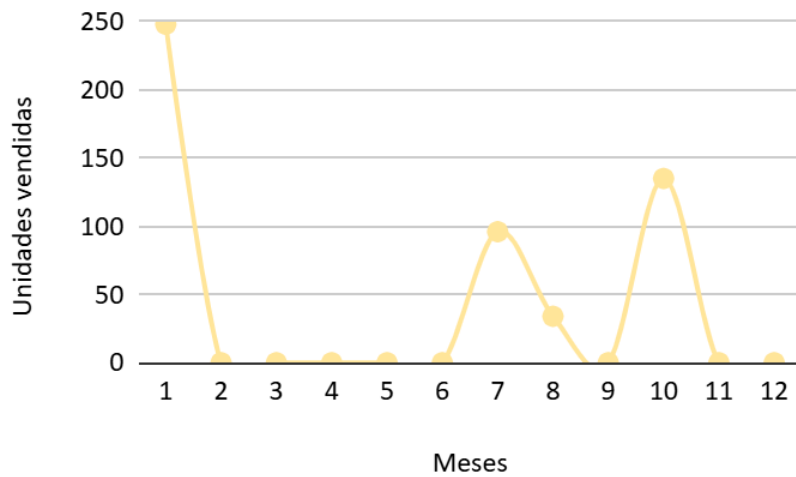


Gráfico 5: distribución en el tiempo de las ventas del modelo alternativo 3

Los datos muestran que la variabilidad en la demanda a lo largo del año para cada modelo individual es comparable a la variabilidad observada cuando todos los modelos se combinan y analizan como un único grupo, en los modelos principal y alternativo 1 y 2. Esta observación implica que estos modelos comparten un patrón similar de estacionalidad, lo que sugiere que la demanda de cada modelo, y por lo tanto la demanda agregada de todos los modelos, está influenciada por factores estacionales comunes. Algunos ejemplos potenciales de tales factores podrían incluir las condiciones climáticas, los ciclos propios de la industria agropecuaria y las tendencias económicas generales.

2.2.2. Estandarización de modelos de placas

De un batch fabricado, se pueden sacar cuatro placas con las medidas estándares (modelo principal). En caso de que el cliente requiera otra medida, se recorta la cantidad específica, mientras que el sobrante se descarta. El sobrante no es reutilizado ni se recupera una cantidad significativa de dinero por su ventana. Con respecto a las placas del modelo alternativo 3, cuyas medidas son excepcionalmente menores a las demás, vale aclarar que las ventas históricas de estos modelos representan apenas el 6% de la totalidad de las ventas. En conclusión, es posible generalizar que la cantidad utilizada de materia prima para todos los modelos es la misma.

Por otro lado, el propietario también aclara que en algunos registros de ventas, se detalló la medida en milímetros en vez de centímetros, por lo que esos casos fueron reescalados en centímetros a fin de utilizar la misma unidad de medida del modelo principal.

Dada la similitud en la variabilidad de demanda, la igualdad en materia prima utilizada y la unidad en la escala de medición, es viable tomar como referencia el modelo principal en representación de todos los demás modelos, para los fines de considerar cantidad de insumos y costos relacionados. De esta forma, de aquí en adelante cuando se hable del “modelo de placas” se estará haciendo referencia al “modelo principal” que tiene las medidas estándares.

Sin embargo, vale aclarar que las cantidades de demanda, producción y venta a considerar en este trabajo corresponden a la totalidad de los modelos y medidas, sin excluir ninguno de ellos. Es decir que, cuando se tomen decisiones referentes a cuánto producir o vender, se considerará la cantidad total producida de todos los modelos.

2.3. Insumos para la producción

Como se mencionó anteriormente, el proceso productivo tiene la finalidad de fabricar placas de celulosa. Una placa estándar, es decir de 180 cm x 60 cm x 15 cm pintada o de 200 cm x 60 cm x 15 cm pintada, requiere 1.27 kg de pegamento, 2.1 kg de resina, 4 kg de papel y

0.45 litros de pintura. En la Tabla 3 se detallan los insumos utilizados para la fabricación de una placa con medidas estándares.

Insumo	Cantidad	Unidad de medida	Producto final
Pegamento	1.27	kg	placa
Resina	2.1	kg	placa
Papel	4	kg	placa
Pintura	0.45	lt	placa

Tabla 3: insumos utilizados en la fabricación de una placa estándar

2.4. Producción y ventas

2.4.1. Selección de rangos de fechas

Un análisis exhaustivo de los datos disponibles reveló que la empresa solo registró información para ciertos meses de 2022 y 2023, mientras que para todos los meses de 2024 se dispone de información completa, lo que sugiere que el hábito de registro se ha afianzado con el tiempo. En los dos primeros años, los criterios de registro no estaban claramente definidos. Sumado a esto, los datos indican una falta de experiencia y eficiencia en la gestión empresarial. Esto se deduce de las cantidades enormemente mayores de stock acumulado en comparación con las ventas, así como demoras en las entregas y compras inoportunas en el tiempo. Estos meses reflejan los desafíos iniciales de un negocio emergente que buscaba un modelo sostenible.

Sin embargo, a partir de 2024, los datos muestran una mejora significativa en los procesos, resultado de una práctica más afianzada y experimentada. La toma de decisiones en este último año se basó en experiencias previas, y los resultados (tanto económicos como de eficiencia productiva y logística) reflejan una mejora notable.

Por estas razones, se considera que es más apropiado utilizar los datos de los últimos 12 meses como base para implementar el modelo y realizar análisis predictivos más precisos. Refiérase al Apéndice C para ver el dataset de producción 2024 y al Apéndice D para ver el dataset de ventas 2024.

A continuación, se expone la tabla 4 que resume las ventas del periodo enero del 2024 a diciembre de 2024. Estas son las ventas que se usarán a lo largo de este trabajo como base para realizar proyecciones futuras. De esta forma, se excluirán del estudio las ventas históricas reflejadas en las tablas 1 y 2, que fueron utilizadas solo para el análisis preliminar de los datos.

Mes	Cantidad
1	200
2	178
3	127
4	0
5	128
6	0
7	303
8	307
9	258
10	396
11	208
12	469
Total	2574

Tabla 4: ventas del 2024 de todos los modelos

2.4.2. Análisis de estacionalidad

Al profundizar en el rango de datos seleccionado, se observa un incremento significativo en las ventas durante la segunda mitad del año. Esto sugiere una fuerte correlación entre la demanda de placas de celulosa y las necesidades de climatización en ambientes durante los meses más calurosos en Argentina. Los meses de octubre y diciembre presentan los picos más altos en ventas, indicando una demanda máxima durante este período. Las ventas se mantienen relativamente estables durante los meses de julio, agosto y septiembre, aunque a un nivel menor que en los picos de octubre y diciembre. En cuanto a noviembre, hubo una leve caída en las ventas.

Por el contrario, la demanda disminuye considerablemente en los primeros meses del año, llegando incluso a cero en abril y junio, donde no se registraron ventas. El Gráfico 6 refleja los movimientos mencionados.

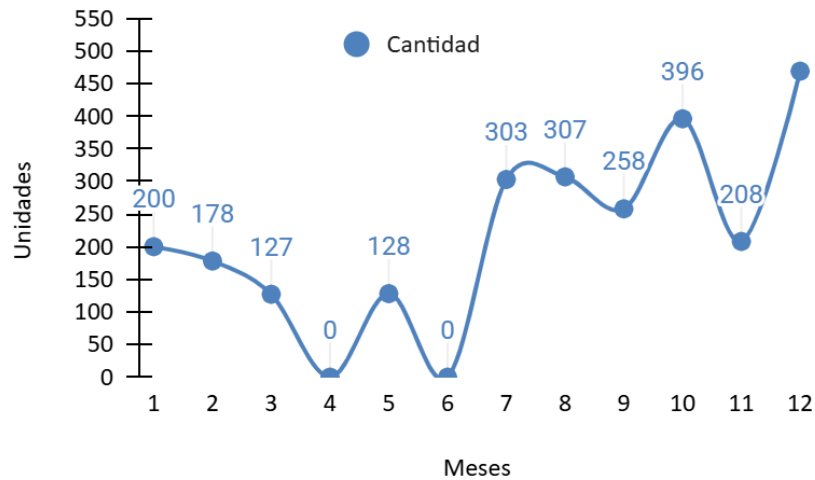


Gráfico 6: estacionalidad en las ventas

Este gráfico muestra un patrón claro con una alta demanda en la segunda mitad del año, especialmente en octubre y diciembre, y una baja demanda en los primeros meses del año. Esto refleja la naturaleza estacional del negocio, influenciada por las necesidades de climatización durante los meses más cálidos.

Por su parte, la producción se mantuvo en niveles similares a las ventas entre junio y noviembre, lo que podría indicar que la producción se adelantó levemente a las ventas esperadas. Sorprendentemente, la producción fue muy alta en los primeros tres meses del año, lo que indica que quedó una cantidad significativa de stock almacenado. Como era de esperar, la producción disminuyó en abril y cayó a cero en mayo. El Gráfico 7 refleja esta situación.

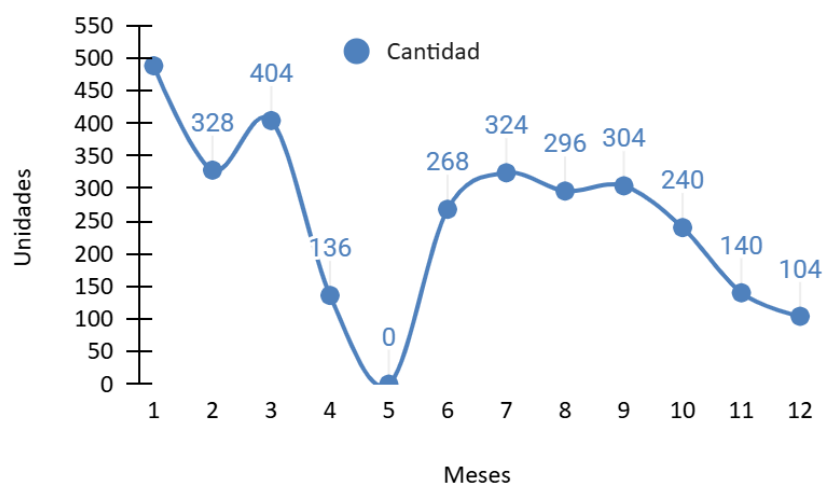


Gráfico 7: estacionalidad en la producción

En conclusión, la producción parece adelantarse levemente a las ventas esperadas en algunos meses, pero también muestra una producción excesiva al inicio del año.

2.5. Costos de producción

2.5.1. Insumos

Con respecto a la compra de insumos, fue necesario recurrir al registro histórico de compras para comprender los patrones que siguió la empresa para abastecerse y deducir la evolución de los precios a lo largo del tiempo. A tal fin, se desconsidera tomar solo los datos del 2024.

De tal relevamiento, surge que los insumos necesarios para la fabricación incluyen: pegamento y resina (comprados mensualmente desde los inicios del negocio a precio fijo en dólares), papel importado (dos compras grandes en 2023 y 2024 al mismo precio en dólares) y pintura (compras esporádicas en 2024 a precio fijo en dólares, fabricada según requerimientos específicos).

Considerando las cantidades necesarias de materia prima expuestas en la sección 2.2, se obtienen los costos insumidos para la fabricación de una placa.

La Tabla 5 expone el detalle en dólares.

Costo unitario de insumos:			
Insumo	q por placa	\$ por kg o lt	\$ por placa
Pegamento	1.27	\$ 2.73	\$ 3.47
Resina	2.1	\$ 1.18	\$ 2.48
Papel	4	\$ 0.50	\$ 2.00
Pintura	0.45	\$ 10.67	\$ 4.80
costo unitario			\$ 12.75

Tabla 5: costo unitario en dólares correspondiente a insumos

Finalmente, el costo unitario de materia prima por placa pintada, lista para entregar, es de \$12.75 dólares.

2.5.2. Mano de obra

Los costos de mano de obra incluyen los sueldos brutos, cargas sociales y SAC de los dos empleados de planta. Estos costos se consideran fijos, ya que se deben pagar independientemente del nivel de producción. Aunque el propietario también participa en el proceso productivo, no recibe un sueldo que deba ser incluido en los costos de mano de obra. Todos los costos se convirtieron a dólares estadounidenses según la cotización mensual, para obtener el costo total anual.

La Tabla 6 muestra este detalle.

Mano de obra:								
Mes	\$/hora	\$/mes 170	cargas sociales 63%	cotización usd	costo en usd/mes/emple ado	SAC prorateado	costo en usd/mes/emple ado c/SAC	costo en usd/mes/2 empl
ene-24	\$ 1,855	\$ 315,350	\$ 198,671	\$ 846	\$ 608	72	\$ 680	\$ 1,359
feb-24	\$ 2,139	\$ 363,630	\$ 229,087	\$ 861	\$ 688	72	\$ 760	\$ 1,520
mar-24	\$ 2,410	\$ 409,700	\$ 258,111	\$ 876	\$ 762	72	\$ 834	\$ 1,668
abr-24	\$ 2,628	\$ 446,760	\$ 281,459	\$ 896	\$ 813	72	\$ 884	\$ 1,769
may-24	\$ 2,628	\$ 446,760	\$ 281,459	\$ 914	\$ 797	72	\$ 868	\$ 1,737
jun-24	\$ 2,890	\$ 491,300	\$ 309,519	\$ 931	\$ 861	72	\$ 932	\$ 1,865
jul-24	\$ 3,136	\$ 533,120	\$ 335,866	\$ 952	\$ 913	84	\$ 998	\$ 1,995
ago-24	\$ 3,136	\$ 533,120	\$ 335,866	\$ 972	\$ 894	84	\$ 978	\$ 1,957
sep-24	\$ 3,444	\$ 585,480	\$ 368,852	\$ 990	\$ 964	84	\$ 1,048	\$ 2,097
oct-24	\$ 3,850	\$ 654,500	\$ 412,335	\$ 1,012	\$ 1,055	84	\$ 1,139	\$ 2,278
nov-24	\$ 3,850	\$ 654,500	\$ 412,335	\$ 1,031	\$ 1,035	84	\$ 1,119	\$ 2,238
dic-24	\$ 3,850	\$ 654,500	\$ 412,335	\$ 1,053	\$ 1,014	84	\$ 1,098	\$ 2,196
SAC 1° sem		\$ 245,650	\$ 154,760	\$ 931	\$ 430			
SAC 2° sem		\$ 327,250	\$ 206,168	\$ 1,053	\$ 507			
costo anual 1 empleado:							\$ 11,340	\$ 22,681

Tabla 6: costos en dólares correspondientes a mano de obra

En conclusión, el costo anual de ambos empleados es de \$22,681 dólares.

2.5.3. Energía eléctrica

Las boletas de luz obtenidas detallan los cargos fijos y por consumo, así como los gastos asociados a cada uno. Los cargos fijos se subdividen en punta, fuera de punta y adquirida, mientras que los cargos por consumo se clasifican en punta, resto y noche. Esta diferenciación responde a las franjas horarias en las que se consume la energía.

Los cargos fijos, convertidos a dólares según la cotización histórica, se presentan en la Tabla 7. El Gráfico 8 ofrece una visión de su evolución en el tiempo.

CARGOS FIJOS EN USD							
Mes	Cotización usd	Gasto por cargo fijo					Gráfico
		cargo fijo	punta	fuera punta	adquirido	Total	
enero	845.50	25.69	60.35	203.19	7.92	297.15	
febrero	861.00	34.97	82.14	265.58	236.51	619.20	619.20
marzo	876.00	44.20	103.83	321.87	240.77	710.66	710.66
abril	896.00	54.51	128.06	384.17	227.80	794.54	794.54
mayo	914.00	68.34	160.54	160.54	111.66	501.07	
junio	930.50	85.21	200.18	667.25	236.50	1189.14	1189.14
julio	951.50	105.19	247.12	823.72	231.24	1407.28	1407.28
agosto	972.00	124.88	293.35	977.84	236.44	1632.52	1632.52
septiembre	990.00	123.28	289.60	984.63	247.46	1644.96	1644.96
octubre	1011.50	120.66	283.44	944.80	245.36	1594.26	1594.26
noviembre	1031.00	118.37	278.08	926.93	240.72	1564.11	1564.11
diciembre	1052.50	115.96	272.40	908.00	235.80	1532.16	1532.16
						promedio	1593.60

Tabla 7: cargos fijos en dólares correspondientes a electricidad

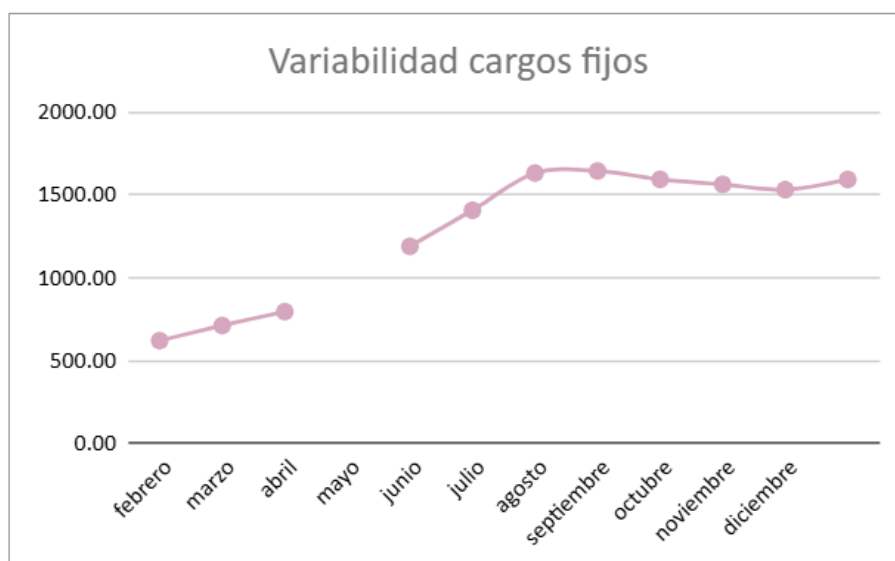


Gráfico 8: evolución en el tiempo de los cargos fijos por electricidad

En diciembre de 2023 hubo un cambio de gobierno que implementó medidas que aumentaron las tarifas de servicios públicos, previamente subsidiados. Por lo tanto, el cargo de enero de 2024 es significativamente menor que el resto. En mayo de 2024, no hubo producción, pero el costo de la electricidad fue de \$501.07 dólares, correspondiente al consumo general de luces del predio. Para este análisis, se considerarán \$500 dólares como costo fijo mensual, independientemente de la producción, ya que deberá afrontarse todos los meses.

Entre febrero y julio, hubo ajustes tarifarios que aumentaron los cargos fijos, estabilizándose entre agosto y diciembre en un promedio de \$1,593.60 dólares. Es probable que los precios en 2025 sigan un comportamiento similar a los últimos meses de 2024. Por lo tanto, se utilizará este último promedio menos el costo fijo de \$500 dólares, como un costo semifijo que solo ocurre cuando hay producción, es decir, con las maquinarias encendidas, independientemente del nivel de producción específico de cada mes. Así, el costo semifijo se establece en \$1,094 dólares.

La Tabla 8 muestra los cargos por consumo convertidos a dólares según cotización mensual.

CARGOS VARIABLES EN USD - PARTE 1									
Mes	Cotización usd	Potencia Consumida				Gasto por consumo			
		punta	resto	noche	total	punta	resto	noche	total
enero	845.50	0	8100	100	8200.00	0.00	202.62	2.49	205.12
febrero	861.00	200	6500	100	6800.00	13.83	434.74	6.56	455.12
marzo	876.00	0	6800	0	6800.00	0.00	467.22	0.00	467.22
abril	896.00	100	2400	100	2600.00	6.95	161.22	6.58	174.75
mayo	914.00	0	200	0	200.00	0.00	13.17	0.00	13.17
junio	930.50	100	2700	100	2900.00	8.65	225.83	8.20	242.68
julio	951.50	0	6000	0	6000.00	0.00	494.74	0.00	494.74
agosto	972.00	0	6400	100	6500.00	0.00	540.12	8.27	548.39
septiembre	990.00	100	6700	100	6900.00	8.99	582.72	8.53	600.24
octubre	1011.50	100	4800	200	5100.00	9.05	419.81	17.15	446.00
noviembre	1031.00	0	5600	100	5700.00	0.00	486.59	8.52	495.10
diciembre	1052.50	100	3900	200	4200.00	8.80	332.08	16.70	357.58

Tabla 8: cargos por consumos en dólares correspondientes a electricidad

La tabla 8 muestra que las tarifas de consumo variable oscilan entre \$0.7, \$0.8 y \$0.9 dólares por unidad, independientemente de la franja horaria. La tarifa promedio es de \$0.8 dólares por unidad de consumo.

Se determinó un ratio para analizar la relación entre la potencia consumida, basada en las facturas, y los datos de producción mensuales correspondientes. Dichos ratios se detallan en la Tabla 9.

CARGOS VARIABLES EN USD - PARTE 2					
Mes	Cotización usd	tarifa consumos			Gráfico
		punta	resto	noche	ratio pot/prod
enero	845.50	0.00	0.03	0.02	16.80
febrero	861.00	0.07	0.07	0.07	20.73
marzo	876.00		0.07		16.83
abril	896.00	0.07	0.07	0.07	19.12
mayo	914.00		0.07		n/a
junio	930.50	0.09	0.08	0.08	10.82
julio	951.50		0.08		18.52
agosto	972.00		0.08	0.08	21.96
septiembre	990.00	0.09	0.09	0.09	22.70
octubre	1011.50	0.09	0.09	0.09	17.96
noviembre	1031.00		0.09	0.09	16.57
diciembre	1052.50	0.09	0.09	0.08	20.19
promedios		0.08			18.38

Tabla 9: promedio de tarifa de consumo y ratio de potencia/producción

El Gráfico 9 muestra un comportamiento variable de estos ratios, pero la mayoría de los meses se encuentra en el rango de 15 a 20. Excluyendo mayo, debido a la falta de producción, el ratio promedio es de 18.38.

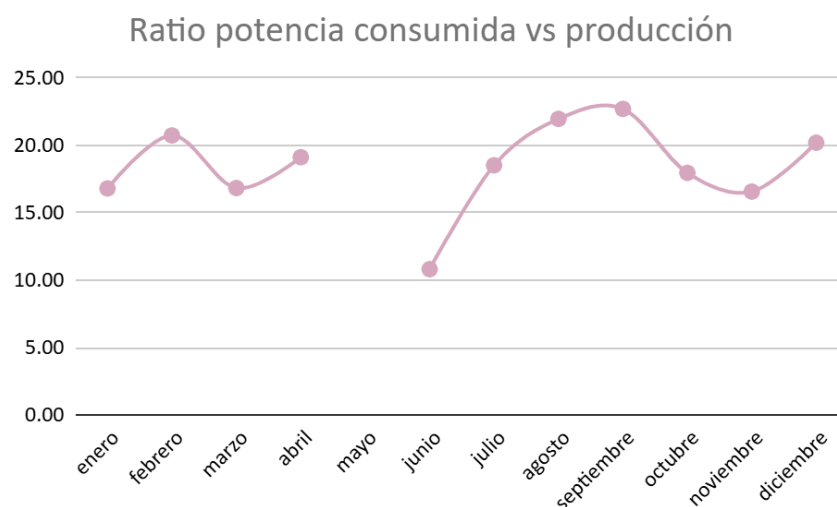


Gráfico 9: evolución en el tiempo del ratio potencia/producción

Luego, al multiplicar la tarifa de consumo promedio por el ratio promedio, se obtiene un costo de \$1.47 dólares por placa de energía eléctrica.

Los gastos totales por energía eléctrica se exponen en la Tabla 10.

Energía eléctrica:					
Mes	Cotización usd	Cargo fijo en USD	Cargo semifijo en USD	Cargo var en USD	Costo total USD/mes
ene-24	845.50	\$ 500	\$ 1,094	\$ 716	\$ 2,309
feb-24	861.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 481	\$ 2,075
mar-24	876.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 593	\$ 2,186
abr-24	896.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 199	\$ 1,793
may-24	914.00	\$ 500	\$ -	\$ -	\$ 500
jun-24	930.50	\$ 500	\$ 1,094	\$ 393	\$ 1,987
jul-24	951.50	\$ 500	\$ 1,094	\$ 475	\$ 2,069
ago-24	972.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 434	\$ 2,028
sep-24	990.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 446	\$ 2,040
oct-24	1011.50	\$ 500	\$ 1,094	\$ 417	\$ 2,010
nov-24	1031.00	\$ 500	\$ 1,094	\$ 505	\$ 2,098
dic-24	1052.50	\$ 500	\$ 1,094	\$ 305	\$ 1,899
costo anual:		\$ 6,000	\$ 12,030	\$ 4,964	\$ 22,994

Tabla 10: costos en dólares correspondientes a electricidad

A modo de resumen, el costo fijo mensual es de \$500 dólares, el costo semifijo en los meses productivos es de \$1,094 dólares y los costos variables van desde \$199 dólares a \$716 dólares. Estos últimos se obtienen al multiplicar el costo unitario de energía eléctrica por la cantidad producida en cada mes.

2.5.4. Costos totales

En conclusión, el costo unitario de cada placa está dado por los insumos y por el cargo variable de luz; los costos fijos anuales incluyen los sueldos de los dos empleados y el cargo fijo de energía eléctrica de todo el año; y los costos semifijos están dados por el cargo de energía eléctrica en los meses en que hay producción. La Tabla 11 resume esta situación.

Costo unitario:	\$	14.22
Costos fijos anuales:	\$	28,681
Costos semifijos mensuales	\$	1,094

Tabla 11: resumen de costos totales

3. Capítulo 3: Modelo de optimización

Dada una demanda estimada en un horizonte de 12 meses, es posible determinar la cantidad óptima de fabricación para cada período con el objetivo de satisfacer la demanda y minimizar los costos totales. Este tipo de problema se enmarca dentro de la optimización combinatoria, donde se busca la mejor solución entre un conjunto finito de posibilidades. El mismo, puede ser planteado a través de un modelo de programación lineal entera. En el desarrollo del modelo de planificación de la producción, se optó por utilizar un enfoque de programación lineal entera (PLE), dado que las variables de decisión representan cantidades discretas de productos a fabricar. Según Hermosilla (2010), la PLE es adecuada para modelar problemas donde las soluciones que brinda el modelo deben ser enteras, como en la producción de paneles, permitiendo una representación más realista de las restricciones y objetivos del sistema de producción.

Siguiendo la metodología propuesta por Maroto Álvarez, Alcaraz Soria y Ruiz García (2002), el proceso de modelización comienza con la identificación clara del objetivo del problema, las variables de decisión involucradas y las restricciones que definen el sistema bajo estudio. En el presente caso, se trata de planificar la producción de una Pyme del sector agroindustrial que fabrica paneles evaporativos, considerando las particularidades de la estacionalidad en la demanda, la disponibilidad de insumos y la capacidad limitada de producción. Este enfoque estructurado permite representar adecuadamente la complejidad del sistema productivo y establecer un marco formal para la toma de decisiones. Es necesario definir en primer lugar una variable que indique la cantidad de productos a fabricar. Esta variable se llamará X . Como las cantidades fabricadas se irán acumulando, también es preciso definir una variable que indique el stock acumulado de productos. Esta variable se llamará S . Adicionalmente, puede ocurrir que en ciertos periodos no sea conveniente fabricar, mientras que en otros sí. Esto puede ser definido por una variable binaria que indique para cada periodo si habrá o no producción. Esta variable se llamará W . Finalmente, puede ser necesario contratar personal adicional para cumplir con los requerimientos de producción. La variable que definirá cuántos empleados adicionales contratar será llamada Y y es una variable entera.

Adicionalmente, llamamos P a la capacidad máxima de almacenamiento en stock. En la empresa en la que se aplica este modelo se tiene $P = 300$. Llamamos Q a la capacidad productiva total. En la empresa se tiene $Q = 450$. Llamamos R a la capacidad productiva de una sola persona. En la empresa se tiene $R = 150$. Y por último llamamos Z a una cantidad lo suficientemente grande para permitir que la variable binaria W se active siempre que sea

conveniente. En la empresa se tiene $Z = 1000$.

De esta forma, el modelo puede ser planteado con la siguiente estructura matemática:

$\min \sum_{t \in T} c_t x_t + f_t y_t + w_t$	
$s_t = s_{t-1} + x_t - d_t \quad \forall t \in T$	(1)
$x_t \geq 0 \quad \forall t \in T$	(2)
$y_t \geq 0 \quad \forall t \in T$	(3)
$s_t \geq 0 \quad \forall t \in T$	(4)
$s_0 = 0$	(5)
$s_t \leq P \quad \forall t \in T$	(6)
$x_t \leq Q + R y_t \quad \forall t \in T$	(7)
$x_t \leq Z w_t \quad \forall t \in T$	(8)

En este modelo,

- llamamos $T = \{1..n\}$ al conjunto de periodos,
- llamamos $C[T]$ al parámetro de costos para cada periodo,
- llamamos $F[T]$ al parámetro de costo de empleado adicional para cada periodo,
- llamamos $D[T]$ al parámetro de demanda para cada periodo,
- llamamos $X[T]$ a la variable de cantidad producida en cada periodo ,
- llamamos $Y[T]$ a la variable entera de cantidad de empleados adicionales en cada periodo,
- llamamos $S[T]$ a la variable de stock de cada periodo, y
- llamamos $W[T]$ a la variable binaria de producción de cada periodo.

La función objetivo busca minimizar la sumatoria, para cada periodo t del conjunto T , de los costos por la cantidad producida. Además, el modelo especifica las siguientes restricciones:

- (1) El stock s del periodo t es igual al stock resultante del periodo inmediato anterior más la producción del periodo t menos la demanda del periodo t , para cada periodo t del conjunto T .
- (2) La producción x del periodo t debe ser mayor o igual a 0, para cada periodo t del conjunto T .
- (3) La cantidad de empleados adicionales a contratar y en el periodo t debe ser mayor o igual a 0, para cada periodo t del conjunto T .
- (4) El stock s del periodo t debe ser mayor o igual a 0, para cada periodo t del Conjunto T . Esto garantiza que se cumpla la demanda.
- (5) El stock inicial s del periodo $t=0$ debe ser igual a 0.
- (6) El stock s del periodo t debe ser menor o igual a P unidades, para cada periodo t del conjunto T . En términos prácticos, $P = 300$, ya que la capacidad actual máxima de almacenamiento de la empresa es de 300 unidades.
- (7) La producción x del periodo t debe ser menor o igual a Q más R por la cantidad de empleados adicionales a contratar y en el periodo t , para cada periodo t del conjunto T . La capacidad de producción actual, que requiere la participación de dos empleados y el propietario, es de 450 unidades por mes. Por lo tanto, a los fines prácticos, se puede estimar que la capacidad de producción de un empleado adicional es de 150 unidades por mes; aunque es válido también resaltar que una eventual contratación de personal adicional probablemente no alcance de forma inmediata este nivel productivo, sino que requiera de mayor tiempo y esfuerzo de aprendizaje.
- (8) La producción x del periodo t debe ser menor o igual a Z por el valor de la variable binaria w en el periodo t , para cada periodo t del conjunto T . A los fines prácticos, se tiene $Z = 1000$.

Para resolver este problema, se puede utilizar un solver como SCIP (Solving Constraint Integer Programs). SCIP es un software de optimización de código abierto que se especializa en la resolución de problemas de programación entera y mixta. A través de algoritmos avanzados, SCIP puede encontrar soluciones óptimas o cercanas al óptimo en tiempos razonables.

La implementación de este modelo en SCIP implica la definición de variables de decisión (cantidad a fabricar en cada período), una función objetivo (minimización de costos) y restricciones (satisfacción de la demanda, capacidad de producción, niveles de inventario, entre otras).

Al utilizar SCIP para resolver este problema, se obtiene una solución que indica la cantidad exacta a fabricar en cada período del horizonte de planificación. Esta solución permitirá a la empresa optimizar sus operaciones, reducir costos y mejorar la eficiencia en la gestión de la cadena de suministro. Además, el modelo puede adaptarse para incluir consideraciones adicionales, como la variabilidad de la demanda frente a posibles escenarios futuros, cambios en las restricciones de capacidad, reestructuración de la planta, etc.

Para la implementación del problema, se utilizará lenguaje de modelado ZIMPL, ya que el solver SCIP tiene capacidad para leer e interpretar este lenguaje.

4. Capítulo 4: Implementación y resultados

4.1. Escenario inicial

4.1.1. Implementación del modelo

En primera instancia, se pensó un escenario inicial para el año 2025 con un comportamiento de la demanda similar a la del año 2024. En la Tabla 12 se exponen los datos y en el Gráfico 10 se puede visualizar su distribución en el tiempo.

Proyección demanda mensual:

Mes	Cantidad
1	200
2	178
3	127
4	0
5	128
6	0
7	303
8	307
9	258
10	396
11	208
12	469
Total	2574

Tabla 12: proyección demanda mensual

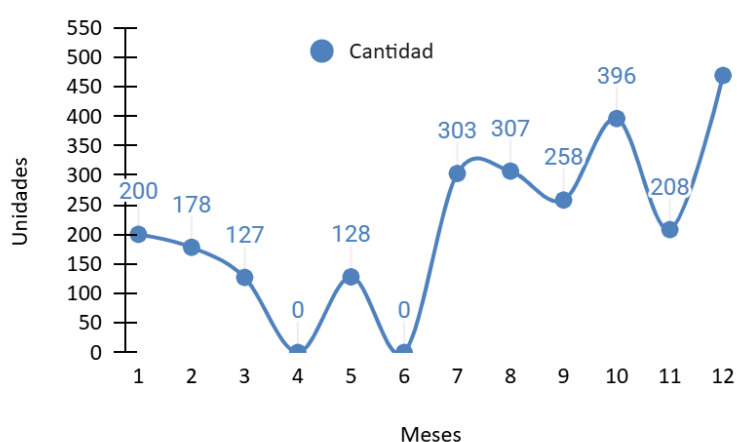


Gráfico 10: Ventas proyectadas

En segundo lugar, se utilizaron los datos obtenidos en el Capítulo 2 para aplicarlos al modelo de optimización definido en el Capítulo 3. De esta forma, la función objetivo del modelo de optimización toma los siguientes valores:

$$\min \sum_{t \in T} c_t x_t + f_t y_t + 1094 w_t + 28681$$

Es la misma definición del modelo del Capítulo 3, donde 1094 representa los costos semifijos de los períodos en que hay producción, y 28681 representa los costos fijos. Si bien este último parámetro fijo no altera la solución óptima, se decidió incluirlo a fin de que la solución ofrecida por el modelo estime los costos totales que la empresa deberá afrontar.

En tercer lugar, el modelo debe ser desarrollado en un archivo de extensión .zpl. Para ello, se utilizó un software de edición de archivos en texto plano. Para comenzar se definieron los conjuntos, parámetros y variables utilizadas de la siguiente forma:

- Conjunto de periodos $T = \{1..n\}$
- Conjunto de periodos $T0 = \{0..n\}$
- Parámetro $n = 12$: Meses del año 2025 para el cual se aplicará el modelo predictivo.
- Parámetro $d[T]$: Demanda de cada periodo que toma los valores de la Tabla 11 de esta misma sección.
- Parámetro $c[T]$: Costo de producción de cada periodo que toma los valores del costo unitario de la Tabla 10 de la sección 2.4.4.
- Parámetro $f[T]$: Costo por nuevo empleado de cada periodo que toma los valores del sueldo mensual de un empleado de la Tabla 5 de la sección 2.4.2.
- Variable $x[T]$: Variable de producción a definir por el modelo.
- Variable $s[T0]$: Variable de stock a definir por el modelo.
- Variable $y[T]$ integer: Variable de empleados adicionales a contratar a definir por el modelo.
- Variable $w[T]$ binaria: Variable binaria de producción a definir por el modelo.

Y seguidamente se definieron la función objetivo con sus restricciones, tomando los valores antes mencionados. El apéndice E muestra la implementación del modelo en código ZIMPL.

En cuarto y último lugar, el archivo fue ejecutado a través de la consola de comando de la computadora. Para eso primero se localizó la carpeta donde se encuentra el archivo zpl y donde ya está instalado scip, y luego se corre el comando: “scip -f archivo.zpl”.

4.1.2. Resultados preliminares

Luego de ejecutar el modelo, la consola arroja los resultados que se exponen en la Tabla 13.

Variable	Valor	Parámetro asociado
objective value:	72941.28	
w#1	1	(obj:1094)
w#2	1	(obj:1094)
w#7	1	(obj:1094)
w#8	1	(obj:1094)
w#10	1	(obj:1094)
w#11	1	(obj:1094)
w#12	1	(obj:1094)
x#1	450	(obj:14.22)
x#2	193	(obj:14.22)
x#7	450	(obj:14.22)
x#8	450	(obj:14.22)
x#10	450	(obj:14.22)
x#11	131	(obj:14.22)
x#12	450	(obj:14.22)
s#1	250	(obj:0)
s#2	265	(obj:0)
s#3	138	(obj:0)
s#4	138	(obj:0)
s#5	10	(obj:0)
s#6	10	(obj:0)
s#7	157	(obj:0)
s#8	300	(obj:0)
s#9	42	(obj:0)
s#10	96	(obj:0)
s#11	19	(obj:0)
Costo fijo	1	(obj:28681)

Tabla 13: resultados del escenario inicial

En primer lugar aparece el resultado final de la función objetivo. Luego, la variable binaria W, que indica si existe producción, está activa durante los meses 1, 2, 7, 8, 10, 11 y 12. En cada uno de estos meses, se incurre en un costo semifijo de \$1,094 dólares. Luego sigue la variable X, que indica la cantidad a producir en los meses en que habrá producción, junto con el costo unitario correspondiente a cada producto fabricado en ese período, de \$14.22 dólares. La variable de stock S muestra que hay stock acumulado desde el mes 1 hasta el mes 11 para satisfacer la demanda. Finalmente, se incluye el costo fijo de producción, que en este caso es de \$28,681 dólares. Este dato es incluido en el modelo para proporcionar a la empresa una estimación más precisa de los costos totales en este escenario.

4.1.3. Análisis de resultados

El modelo predictivo presentado no solo proporciona una estimación precisa del costo total de producción anual, que asciende a \$72,941.28 dólares, sino que también detalla un análisis exhaustivo de los meses óptimos para la producción. Esta información vital permite a la empresa planificar estratégicamente su capacidad y recursos, optimizando la eficiencia

y minimizando los costos.

El gráfico 11 permite visualizar los resultados de forma más intuitiva. A través del mismo, se puede observar que en todos los meses, la demanda estimada (en rojo) se encuentra por debajo de los niveles de stock-producción (en azul), que corresponden a la sumatoria de stock del periodo anterior y producción del periodo actual. Es decir, que todos los meses la demanda está cubierta.

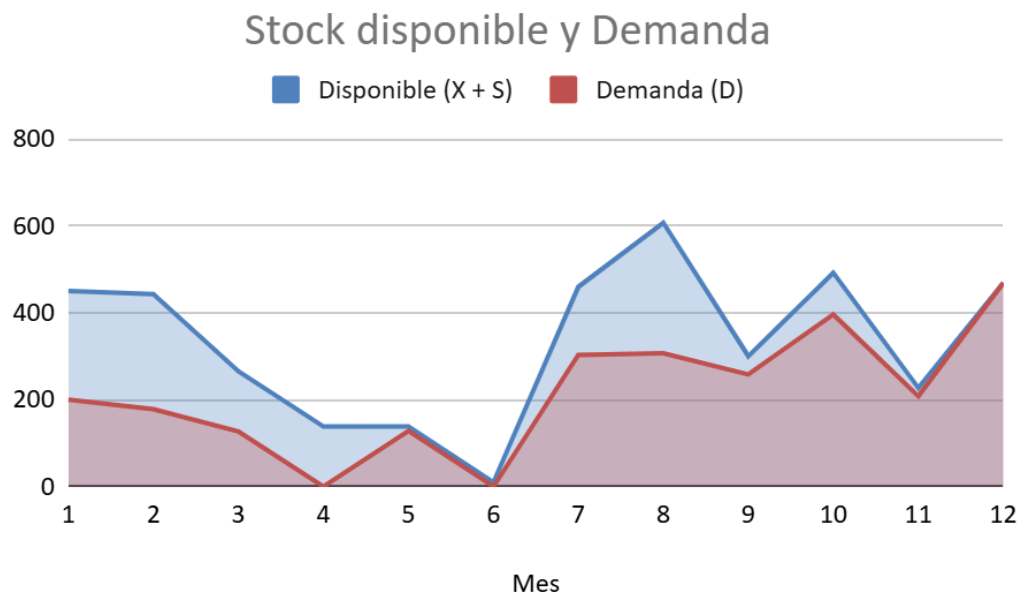


Gráfico 11: resultados del escenario inicial

Los resultados muestran que la producción óptima se alcanza fabricando en 7 de los 12 meses del año. En los 5 meses restantes, es más eficiente en términos de costos mantener la fábrica cerrada, incluso así satisfaciendo la demanda estimada. Esto indica que existe capacidad productiva sin utilizar disponible para la expansión. Además, el modelo de optimización demuestra ser efectivo en comparación con la producción no planificada del 2024, ya que reduce significativamente los meses de trabajo y evita que haya capacidad ociosa mal utilizada todos los meses.

Además, el modelo inicial subraya la necesidad de implementar una estrategia de gestión de inventario que permita acumular stock de manera inteligente y eficiente durante los meses de alta producción. Esta acumulación estratégica tiene como objetivo principal garantizar la disponibilidad de productos suficientes para satisfacer la demanda en los períodos de baja producción, evitando así posibles pérdidas de ventas y clientes insatisfechos. La implementación de esta estrategia requiere considerar los costos asociados al almacenamiento y manejo del inventario, así como los riesgos de

obsolescencia o deterioro de los productos, para encontrar un equilibrio entre la disponibilidad de productos y la eficiencia en la gestión de los recursos.

La inclusión de los costos fijos y semifijos en el modelo de costos no solo permite una estimación precisa del costo total de producción, sino que también facilita una comprensión más profunda de la estructura de costos de la empresa. Esta comprensión detallada es fundamental para la toma de decisiones estratégicas y financieras informadas, como la fijación de precios, la evaluación de la rentabilidad de nuevos productos o proyectos, y la optimización de la capacidad de producción. Además, al considerar los costos fijos y semifijos, la empresa puede analizar el impacto de diferentes niveles de producción en sus costos totales y, por lo tanto, en su rentabilidad. Esto puede ayudar a identificar el punto de equilibrio, es decir, el nivel de producción en el que los ingresos totales igualan a los costos totales, y a tomar decisiones informadas sobre el volumen de producción óptimo. Asimismo, la incorporación de estos costos en el modelo puede revelar oportunidades para reducir costos y mejorar la eficiencia operativa. Por ejemplo, al analizar los costos semifijos, una empresa podría identificar áreas donde es posible optimizar el uso de recursos y reducir costos sin afectar negativamente la capacidad de producción.

Los resultados de este escenario, que se basan en estimaciones similares a las del año 2024, muestran una mejora significativa en la planificación eficiente de la producción anual. Esto permite tener meses libres para implementar mejoras en los procesos, ampliaciones de planta, capacitaciones o incluso la expansión productiva. Al mismo tiempo, los resultados relacionados con el stock prevén una situación mucho más tranquila y aliviada que la del año 2024, cuando los almacenes de la empresa experimentaron una acumulación constante de stock que llegó a niveles críticos de saturación. Esta situación de sobrecarga en los almacenes fue el resultado directo de una planificación ineficiente en la gestión de la producción y el inventario. La falta de una estrategia clara y coordinada para anticipar la demanda y ajustar la producción en consecuencia condujo a un desequilibrio entre la oferta y la demanda.

Como consecuencia de esta problemática, la empresa se vio obligada a considerar seriamente la posibilidad de ampliar sus almacenes. Esta opción, que se analiza en detalle en un escenario alternativo posterior, se planteó como una solución potencial para hacer frente a la acumulación de stock y evitar futuras situaciones de saturación. Sin embargo, es importante destacar que la ampliación de los almacenes no aborda la raíz del problema, que radica en la falta de una planificación eficiente, objetivo que se pretende alcanzar en el presente trabajo.

4.2. Escenarios alternativos

A fines de evaluar la aplicación del modelo presentado en distintos escenarios futuros, se pensó en algunas posibilidades según indicaciones y comentarios del propietario. Se presentan a continuación tres escenarios alternativos para la aplicación del modelo de optimización y seguidamente el análisis de los resultados arrojados en cada uno de ellos.

4.2.1. Escenario alternativo 1

En diciembre de 2024, se estableció una alianza estratégica con un revendedor de materiales para la industria agropecuaria, con el objetivo de facilitar la inserción de las placas evaporativas en el mercado de grandes consumidores. Según estimaciones basadas en las ventas de diciembre, el revendedor tiene el potencial de igualar el volumen de ventas actual de la empresa, lo que resultaría en una duplicación de la demanda mensual. Afortunadamente, la capacidad productiva actual permite esta expansión, ya que el límite de producción es de 5400 unidades anuales (450 unidades x 12 meses), mientras que el escenario inicial contempla la fabricación y venta de tan solo 2574 unidades al año.

El revendedor recibe una comisión del 10% sobre el precio de venta al público. Aunque los precios varían según el modelo, los más vendidos son el “200/60/15 P” y el “180/60/15 P”, con precios de \$102 dólares y \$93 dólares respectivamente. Con respecto a la participación en las ventas de cada uno de estos dos modelos de placas, al evaluar los datos históricos surge que el modelo “180/60/15 P” tuvo 3419 ventas, mientras que el modelo “200/60/15 P” tuvo 1960 ventas. La proporción de cada uno es del 64% y del 36% respectivamente. De forma análoga, al limitar la evaluación únicamente a los datos del 2024, surge que las ventas del modelo “180/60/15 P” fueron 858 unidades y las del modelo “200/60/15 P” fueron 601 unidades, representando un 59% y un 41% respectivamente. La Tabla 14 muestra este detalle.

Modelo	Histórico (2022-2024)		2024	
	Cant vendida	Porcentual	Cant vendida	Porcentual
180/60/15 P	3,419	64%	858	59%
200/60/15 P	1,960	36%	601	41%

Tabla 14: participación en las ventas de cada modelo

Los porcentajes parecen ser consistentes en el tiempo. Suena razonable para este caso particular, considerar el dato histórico ya que coincide con los comentarios realizados por el propietario respecto al comportamiento de ventas de estos modelos. Considerando la

proporción de ventas de cada modelo, los costos de comisión resultantes son los que se detallan en la Tabla 15.

Modelo	Porcentual	Precio vta	Comisión	Comisión
180/60/15 P	64%	93	10%	5.91
200/60/15 P	36%	102	10%	3.72

Tabla 15: costos de comisión de las placas

El costo total de comisión es de \$9.63 dólares, que se añade al costo unitario de cada placa, resultando en un nuevo costo unitario de \$23.84 dólares.

La nueva proyección de demanda anual es la que se expone en la Tabla 16.

Mes	Cantidad
1	400
2	356
3	254
4	0
5	256
6	0
7	606
8	614
9	516
10	792
11	416
12	938
Total	5148

Tabla 16: proyección de demanda en el modelo alternativo 1

La ejecución del modelo para este primer escenario alternativo arroja los resultados que se muestran en la Tabla 17.

Variable	Valor	Parámetro asociado
objective value:	168738.32	
w#1	1	(obj:1094)
w#2	1	(obj:1094)
w#3	1	(obj:1094)
w#6	1	(obj:1094)
w#7	1	(obj:1094)
w#8	1	(obj:1094)
w#9	1	(obj:1094)
w#10	1	(obj:1094)
w#11	1	(obj:1094)
w#12	1	(obj:1094)
y#8	2	(obj:978)
y#10	1	(obj:1139)
y#12	3	(obj:1098)
x#1	450	(obj:23.84)
x#2	450	(obj:23.84)
x#3	366	(obj:23.84)
x#6	300	(obj:23.84)
x#7	450	(obj:23.84)
x#8	732	(obj:23.84)
x#9	450	(obj:23.84)
x#10	600	(obj:23.84)
x#11	450	(obj:23.84)
x#12	900	(obj:23.84)
s#1	50	(obj:0)
s#2	144	(obj:0)
s#3	256	(obj:0)
s#4	256	(obj:0)
s#6	300	(obj:0)
s#7	144	(obj:0)
s#8	262	(obj:0)
s#9	196	(obj:0)
s#10	4	(obj:0)
s#11	38	(obj:0)
Costo fijo	1	(obj:28681)

Tabla 17: resultados del modelo alternativo 1

El escenario alternativo 1, que proyecta un aumento significativo en la demanda debido a una alianza estratégica con el revendedor, genera un costo total de producción anual de \$168,738.32 dólares, incluyendo una comisión del 10% para el revendedor. El modelo también detalla los meses óptimos para la producción, permitiendo una planificación más eficiente de la capacidad y los recursos. En particular, sugiere producir en los meses 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. En este caso, la fábrica quedaría parada en los meses 4 y 5. En este último mes, la demanda se abastece con stock almacenado en los meses previos, mientras que para el mes 4 no se prevé demanda.

El gráfico 12 muestra de manera clara los resultados. Se observa que la demanda estimada (en rojo) se mantiene inferior a los niveles de stock-producción (en azul) en todos los meses. Estos últimos representan la suma del stock del período anterior y la producción del período actual. Esto indica que la demanda siempre está cubierta.

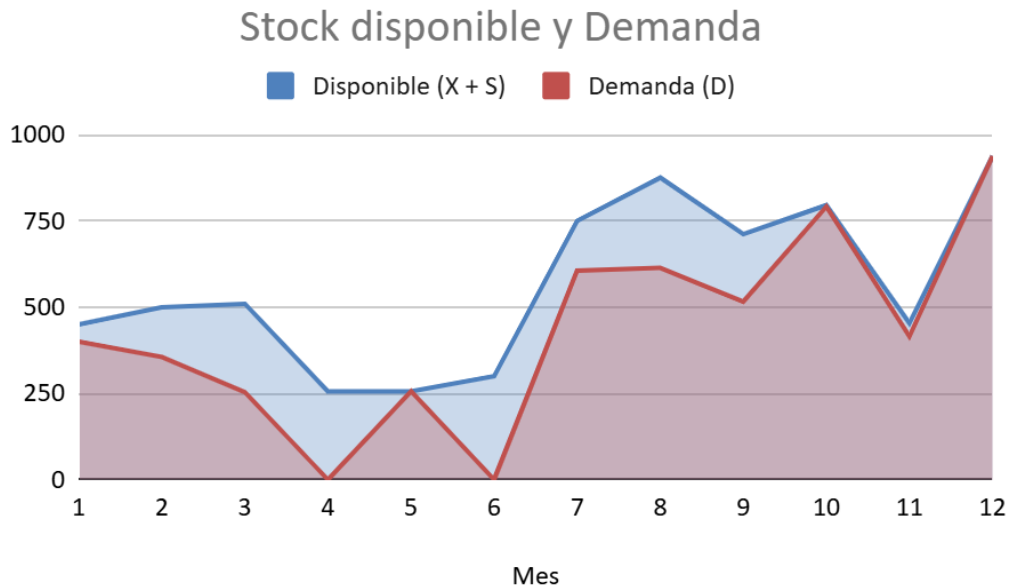


Gráfico 12: resultados del escenario alternativo 1

El modelo sugiere contratar dos nuevos empleados en el mes 8, uno en el mes 10 y 3 en el mes 12 para satisfacer la demanda proyectada. Sin embargo, esta propuesta se considera inviable en un contexto real debido a diversos factores. La contratación de un nuevo empleado implica un proceso que va más allá de la simple incorporación al equipo. Se deben considerar aspectos legales y administrativos, como la firma de un contrato laboral, el registro del empleado en el sistema de la empresa y el cumplimiento de las normativas laborales vigentes. Además, el nuevo empleado requerirá un período de capacitación para adaptarse a las tareas y responsabilidades del puesto, lo que implica una inversión de tiempo y recursos por parte de la empresa. Por un lado las leyes laborales establecen plazos y procedimientos para la contratación de personal, que pueden no ser compatibles con la urgencia de la situación. Además, existen restricciones en cuanto a la contratación temporal y el despido de empleados, lo que dificulta la gestión de personal a corto plazo. Por el otro, la capacitación de un nuevo empleado requiere tiempo y dedicación por parte de los supervisores y compañeros de trabajo. Durante este período, el empleado no estará plenamente productivo, lo que puede afectar el rendimiento general del equipo.

Ante la inviabilidad de la contratación a corto plazo, se propone como alternativa acordar horas extras con los empleados actuales durante el mes de mayor demanda. Esta solución, aunque implica un costo adicional por el pago de las horas extras, permite responder a la demanda de manera flexible y sin incurrir en los costos y complicaciones de la contratación de nuevo personal. Esta propuesta de horas extras presenta ventajas y desventajas que deben ser consideradas:

Ventajas:

- Flexibilidad: Permite ajustar la capacidad productiva a la demanda de manera rápida y sencilla.
- No requiere contratación: Evita los costos y trámites asociados a la contratación de nuevo personal.
- Motivación para los empleados: El pago de horas extras puede ser un incentivo para los empleados actuales.

Desventajas:

- Costo: El pago de horas extras puede ser más costoso que el salario de un empleado adicional.
- Cansancio y estrés: El exceso de trabajo puede afectar la salud y el rendimiento de los empleados.
- Disponibilidad: Los empleados pueden no estar disponibles o dispuestos a trabajar horas extras.

En conclusión, la propuesta de horas extras se presenta como una solución viable y realista para responder a la demanda a corto plazo, evitando las complicaciones de la contratación de nuevo personal. Sin embargo, es importante considerar los costos y riesgos asociados, así como la disponibilidad y disposición de los empleados para trabajar horas extras.

Por otro lado, el modelo también destaca la importancia de una estrategia de gestión de inventario eficiente para satisfacer la demanda en períodos de baja producción y evitar pérdidas de ventas y clientes insatisfechos. En este caso, el modelo prevé un nivel de stock más exigido que en el escenario inicial, lo cual será crucial para cubrir la demanda en los meses en que no se produzca. De todas formas, aún queda remanente de capacidad de almacenamiento.

Existe además la posibilidad de aumentar los plazos de entrega. Actualmente la empresa realiza entregas de forma inmediata o hasta con un día de demora para pedidos pequeños, mientras que los pedidos más grandes se entregan dentro de los 2 o 3 días posteriores. Sin embargo, una alternativa que permitirá satisfacer la totalidad de la demanda sin incumplimientos, es trabajar con plazos de entrega superiores.

En conclusión, los resultados del escenario alternativo 1 indican que la empresa puede satisfacer la mayor demanda sin contratar personal adicional ni ampliar su capacidad de producción, pero deberá trabajar al máximo de su capacidad productiva y cercana al máximo de su capacidad de almacenamiento. Esto requerirá una gestión muy eficiente del

inventario, de las horas de trabajo y considerar el costo de las comisiones para el revendedor.

4.2.1.1. Análisis de rentabilidad

Al comparar la rentabilidad del escenario principal con la del escenario alternativo 1, se observa una diferencia significativa en los resultados financieros.

- Escenario principal: los ingresos están dados por la participación en las ventas de los dos modelos principales de placas. Como se mencionó en la Sección 4.2.1, el modelo “180/60/15 P” participa en un 64% mientras que el modelo “200/60/15 P” participa en un 36%. Estos porcentajes se exponen en la tabla 18 junto con los ingresos por ventas, que totalizan un monto de \$247,721.76. Por su parte, los costos del escenario principal son los arrojados por el modelo en la sección 4.1.2, a saber \$72,941.28. Esto se traduce en una ganancia de \$174,780.48, que representa una rentabilidad del 71%.

Cant anual	Porcentual	Precio	Ingresos
2574	64%	\$93.00	\$153,204.48
2574	36%	\$102.00	\$94,517.28
Total			\$247,721.76

Costo	\$72,941.28
Ganancia	\$174,780.48
Rentabilidad	71%

Tabla 18: ganancia y rentabilidad del escenario principal

- Escenario alternativo 1: los ingresos por ventas ascienden a \$495,443.52 tal como se detallan en la Tabla 19. Los costos aumentan a \$168,738.32, como fue mencionado en el análisis del escenario alternativo 1 en la Sección 4.2.1. Como resultado, la ganancia es de \$326,705.20, que representa una rentabilidad del 66%.

Cant anual	Porcentual	Precio	Ingresos
5148	64%	\$93.00	\$306,408.96
5148	36%	\$102.00	\$189,034.56
Total			\$495,443.52

Costo \$168,738.32

Ganancia \$326,705.20
Rentabilidad 66%

Tabla 19: ganancia y rentabilidad del escenario alternativo 1

En conclusión, la rentabilidad del escenario principal, que supone un nivel de ventas relativamente bajo, se encuentra 5 puntos porcentuales por encima del escenario alternativo 1. Pero por otro lado, el escenario alternativo 1, que implica una alianza con el vendedor y un fuerte aumento en las ventas, supone una ganancia en términos absolutos un 87% mayor que en el escenario principal. Esta diferencia sustancial en las ganancias demuestra que la alianza con el revendedor es una estrategia beneficiosa para la empresa, ya que le permite aumentar significativamente sus ingresos y ganancias, sin demasiados esfuerzos en la gestión de las ventas.

4.2.2. Escenario alternativo 2

El gobierno ha anunciado un ajuste tarifario del 1,7% para abril de 2025. Este ajuste impactará directamente los costos de la energía eléctrica, un insumo fundamental en el proceso productivo. Considerando este aumento y manteniendo constantes los supuestos del escenario 1, los nuevos costos de la energía eléctrica quedarían definidos como se expone en la Tabla 20.

Energía eléctrica:	cargo fijo	cargo semifijo	cargo variable
enero-marzo	\$500.00	\$1,094.00	\$1.47
abril-diciembre	\$508.50	\$1,112.60	\$1.49
total anual	\$6,076.50		

Tabla 20: nuevos costos en dólares correspondientes a electricidad

Estos costos actualizados se calcularon aplicando el aumento del 1.7% sobre los costos de los primeros tres meses del año, que se mantuvieron similares a los del 2024.

De esta forma, los costos unitarios, semifijos y fijos para ambas etapas del año serían lo

que se detallan en la Tabla 21.

	1° trimestre	resto del año
Costo unitario:	\$23.84	\$23.87
Costos fijos anuales:	\$28,757.08	
Costos semifijos mensuales:	\$1,093.60	\$1,112.60

Tabla 21: resumen de los nuevos costos totales

El costo unitario para el primer trimestre es similar al del escenario anterior, mientras que para el resto del año es mayor debido al aumento en el cargo variable de energía eléctrica. Los costos fijos anuales contemplan, al igual que en el escenario anterior, mano de obra y electricidad, pero esta vez el monto de energía eléctrica es mayor. Los costos semi fijos mensuales para el primer trimestre son los mismos del escenario previo, y para el resto del año incluyen un aumento del 1.7%.

La ejecución del modelo para este segundo escenario alternativo arroja los resultados que se muestran en la Tabla 22.

Variable	Valor	Parámetro asociado
objective value:	169062.46	
w#1	1	(obj:1094)
w#2	1	(obj:1094)
w#3	1	(obj:1094)
w#6	1	(obj:1113)
w#7	1	(obj:1113)
w#8	1	(obj:1113)
w#9	1	(obj:1113)
w#10	1	(obj:1113)
w#11	1	(obj:1113)
w#12	1	(obj:1113)
y#8	2	(obj:978)
y#10	1	(obj:1139)
y#12	3	(obj:1098)
x#1	450	(obj:23.84)
x#2	450	(obj:23.84)
x#3	410	(obj:23.84)
x#6	256	(obj:23.87)
x#7	450	(obj:23.87)
x#8	732	(obj:23.87)
x#9	450	(obj:23.87)
x#10	600	(obj:23.87)
x#11	450	(obj:23.87)
x#12	900	(obj:23.87)
s#1	50	(obj:0)
s#2	144	(obj:0)
s#3	300	(obj:0)
s#4	300	(obj:0)
s#5	44	(obj:0)
s#6	300	(obj:0)
s#7	144	(obj:0)
s#8	262	(obj:0)
s#9	196	(obj:0)
s#10	4	(obj:0)
s#11	38	(obj:0)
Costo fijo	1	(obj:28757)

Tabla 22: resultados del modelo alternativo 2

El escenario alternativo 2, que proyecta un aumento en los costos de energía debido a un ajuste tarifario del gobierno, genera un costo total de producción anual de \$169,062.46 dólares, incluyendo una comisión del 10% para el revendedor. Este escenario mantiene las mismas condiciones de demanda que el escenario alternativo 1, por lo que los meses óptimos de producción coinciden con la propuesta del escenario alternativo 1. Sin embargo, las cantidades producidas en cada periodo varían, debido a la diferencia en los costos en los primeros tres meses del año respecto de los siguientes meses.

El gráfico 13 revela que la demanda estimada (rojo) siempre es menor que el stock-producción (azul), lo que asegura su cobertura constante.

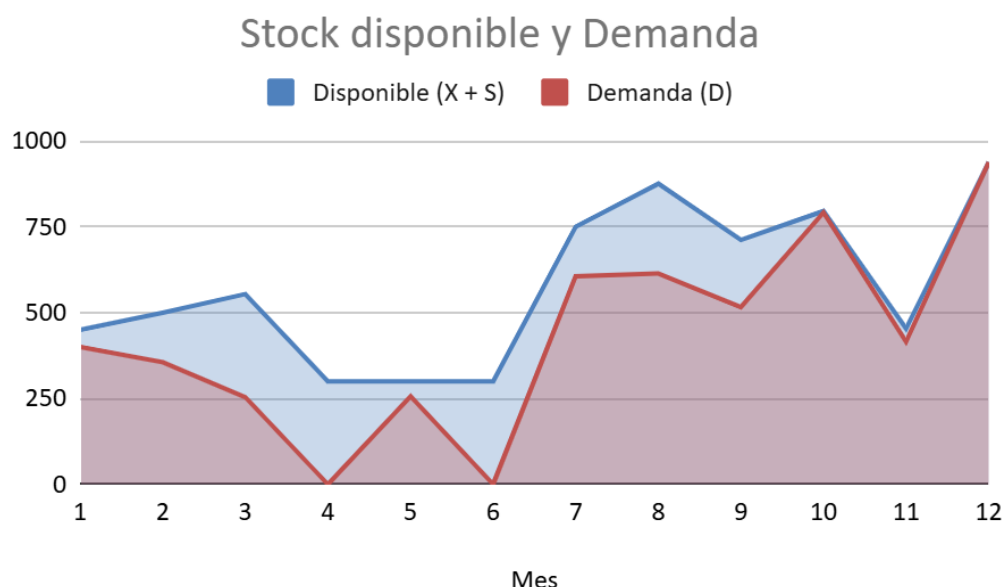


Gráfico 13: resultados del escenario alternativo 2

El modelo también sugiere contratar empleados adicionales en los meses 8, 10 y 12 para satisfacer la demanda proyectada. Al igual que en el escenario alternativo 1, esta contratación presenta complicaciones legales, administrativas y de capacitación. La alternativa de acordar horas extras con los empleados actuales durante los meses de mayor demanda podría resultar insuficiente si las ventas continúan aumentando. Por lo tanto, es importante considerar aumentar la capacidad productiva a mediano y largo plazo mediante nuevos turnos de trabajo y la ampliación del personal.

Asimismo, la acumulación de stock en este caso aumenta casi al máximo posible, lo cual se refleja en niveles de stock de 300 o cercanos a 300 unidades en varios meses del año. Esta situación refuerza la idea de considerar ampliar los almacenes y contar con un sistema eficiente de gestión de inventarios, a fin de evitar pérdidas en las ventas.

En conclusión, los resultados del escenario alternativo 2 indican que la empresa puede satisfacer la mayor demanda a pesar del aumento en los costos de energía. Sin embargo, la empresa deberá trabajar al máximo de su capacidad productiva y de almacenamiento. Esto requerirá una gestión muy eficiente del inventario y de las horas de trabajo, y considerar el costo de las comisiones para el revendedor. Además, será fundamental monitorear de cerca los costos de energía y buscar estrategias para mitigar su impacto en la rentabilidad.

4.2.3. Escenario alternativo 3

En enero de 2025 se terminó de construir un nuevo depósito y se compraron racks nuevos, cuya capacidad de almacenamiento es de hasta 1140 placas. A partir de entonces, se

dejará de usar el viejo galpón de guardado, que no cumple con las medidas de higiene y seguridad adecuadas y se trasladará el almacenamiento de las placas al nuevo espacio. Como resultado de este cambio, se ha establecido una nueva restricción de stock de hasta 1140 unidades en el modelo.

Dejando fijos los supuestos del escenario 1 y 2, y aplicando este nuevo límite, el modelo arroja los resultados expuestos en la Tabla 23.

Variable	Valor	Parámetro asociado
objective value:	165438.76	
w#1	1	(obj:1094)
w#2	1	(obj:1094)
w#3	1	(obj:1094)
w#4	1	(obj:1113)
w#6	1	(obj:1113)
w#7	1	(obj:1113)
w#8	1	(obj:1113)
w#9	1	(obj:1113)
w#10	1	(obj:1113)
w#11	1	(obj:1113)
w#12	1	(obj:1113)
y#1	1	(obj:680)
y#8	1	(obj:978)
x#1	600	(obj:23.84)
x#2	450	(obj:23.84)
x#3	450	(obj:23.84)
x#4	450	(obj:23.87)
x#6	348	(obj:23.87)
x#7	450	(obj:23.87)
x#8	600	(obj:23.87)
x#9	450	(obj:23.87)
x#10	450	(obj:23.87)
x#11	450	(obj:23.87)
x#12	450	(obj:23.87)
s#1	200	(obj:0)
s#2	294	(obj:0)
s#3	490	(obj:0)
s#4	940	(obj:0)
s#5	684	(obj:0)
s#6	1032	(obj:0)
s#7	876	(obj:0)
s#8	862	(obj:0)
s#9	796	(obj:0)
s#10	454	(obj:0)
s#11	488	(obj:0)
Costo fijo	1	(obj:28757)

Tabla 23: resultados del modelo alternativo 3

El escenario alternativo 3, que proyecta un aumento en la capacidad de almacenamiento debido a la construcción de un nuevo depósito, genera un costo total de producción anual de \$165,438.76 dólares, incluyendo una comisión del 10% para el revendedor. Este escenario mantiene las mismas condiciones de demanda que los escenarios alternativos 1 y

2. Sin embargo, los meses óptimos para producir, las cantidades producidas en cada período y el stock de cada mes varían debido al nuevo límite de almacenamiento disponible.

El Gráfico 14 ilustra claramente los resultados obtenidos. Se aprecia que la demanda proyectada (en rojo) se sitúa consistentemente por debajo de los niveles de stock disponible (en azul) a lo largo de todos los meses analizados.

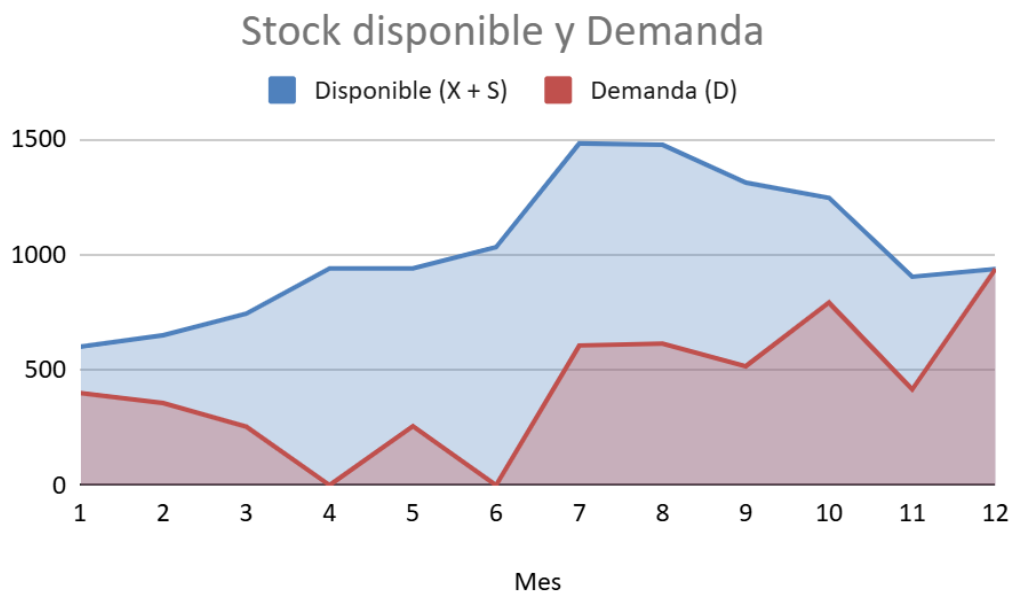


Gráfico 14: resultados del modelo alternativo 3

En particular, el modelo sugiere producir en todos los meses del año, a excepción del mes 5, en el que la fábrica permanecerá parada. En este mes, se prevé cubrir la demanda con unidades almacenadas de periodos anteriores. En esta situación, se puede ver que hay una mayor cantidad de stock disponible con respecto a los escenarios previos. Esto se da porque uno de sus componentes, el stock almacenado de periodos previos, ha aumentado debido a la ampliación de los almacenes.

Anteriormente, la producción de los últimos meses del año se encontraba al límite de su capacidad (incluso con necesidad de personal adicional) debido a que las reservas acumuladas eran insuficientes para satisfacer la demanda. No obstante, en el presente escenario, la mayor capacidad de almacenamiento posibilita operar con niveles de producción más flexibles y parejos a lo largo del año. Igualmente, disponer de un mayor margen de stock proporciona más seguridad a la empresa, ya que permite hacer frente a eventuales problemas en la producción o inconvenientes con el personal sin que esto repercuta en los clientes.

En este caso, el modelo sugiere contratar un nuevo empleado en los meses 1 y 8 para

satisfacer la demanda proyectada. A diferencia de los dos escenarios alternativos previos, en que se requería la contratación total de 6 personas, aquí solo se necesita el trabajo de 2 personas más. Con mayor razón en este caso, tal contratación podría ser reemplazada por horas de trabajo extra de los empleados actuales.

El aumento en la capacidad de almacenamiento permite una gestión más eficiente del inventario, lo que se refleja en el stock acumulado en cada mes, que en ningún caso se acerca al nuevo máximo posible. Esta mejora en la gestión del inventario genera una disminución de los costos respecto a los escenarios previos. La ampliación de la capacidad de almacenamiento evita la contratación forzada de personal adicional y permite cubrir la demanda proyectada con la capacidad productiva actual, apenas recurriendo a dos turnos de horas extras en los meses 1 y 8.

En resumen, el escenario alternativo 3 muestra que la empresa puede satisfacer el aumento de la demanda si incrementa su capacidad de almacenamiento. Sin embargo, esto requerirá que la empresa opere a su máxima capacidad productiva, lo que implicaría en principio pagar horas extras. Además, la gestión eficiente del inventario será esencial para optimizar el uso del espacio de almacenamiento ampliado y evitar costos innecesarios.

4.2.3.1. Análisis de rentabilidad

Al comparar la rentabilidad del escenario alternativo 3 con la del escenario alternativo 2, que abarca los supuestos de todos los escenarios previos, se observan las siguientes diferencias:

- Escenario alternativo 2: los ingresos totalizan un monto de \$495,443.52. Por su parte, los costos del escenario alternativo 2 son los mencionados en la sección 4.2.2 y ascienden a \$169,062.46. Esto se traduce en una ganancia de \$326,381.06, que representa una rentabilidad del 66%. En la Tabla 24 se presenta el detalle.

Cant anual	Porcentual	Precio	Ingresos
5148	64%	\$93.00	\$306,408.96
5148	36%	\$102.00	\$189,034.56
Total			\$495,443.52

Costo \$169,062.46

Ganancia \$326,381.06
Rentabilidad 66%

Tabla 24: ganancia y rentabilidad del escenario alternativo 2

- Escenario alternativo 3: los ingresos por ventas ascienden a \$495,443.52. Los costos aumentan a \$165,438.76, como fue mencionado en el análisis del escenario alternativo 3 en la sección 4.2.3. Como resultado, la ganancia es de \$330,004.76, que representa una rentabilidad del 67%. La Tabla 25 expone la situación de este escenario:

Cant anual	Porcentual	Precio	Ingresos
5148	64%	\$93.00	\$306,408.96
5148	36%	\$102.00	\$189,034.56
Total			\$495,443.52

Costo \$165,438.76

Ganancia \$330,004.76
Rentabilidad 67%

Tabla 25: ganancia y rentabilidad del escenario alternativo 3

En conclusión, en un escenario de altas ventas por alianza con el revendedor junto a un aumento en los costos por ajuste tarifario, la ampliación de los almacenes reduce los costos y genera eficiencia en la logística de producción. Sin embargo, la ganancia solo aumenta un 1% respecto al escenario alternativo 2 y la rentabilidad aumenta apenas en un punto porcentual. Vale la pena evaluar entonces, si este pequeño aumento en las ganancias y en la rentabilidad compensa los costos de inversión en la construcción del nuevo almacén. Para esto sería necesario conocer los costos involucrados y analizar en cuántos años de ganancia se logra recuperar la inversión total.

4.2.4. Conclusión al análisis de rentabilidad

La tabla 26 expone de forma resumida las ganancias y rentabilidades de cada escenario mencionado previamente.

Escenario	Ganancia	Variación	Rentabilidad
Principal	\$174,780.48		71%
Alternativo 1	\$326,705.20	87%	66%
Alternativo 2	\$326,381.06	0%	66%
Alternativo 3	\$330,004.76	1%	67%

Tabla 26: ganancia y rentabilidad de todos los escenarios

En conclusión, si bien los escenarios alternativos que contemplan un aumento en las ventas, los costos y la capacidad de almacenamiento demuestran una mejora en las ganancias en términos absolutos, es fundamental señalar que la rentabilidad global empeora en comparación con el escenario inicial. Esta aparente contradicción se debe a que, aunque el volumen de ingresos y egresos se incrementa, la proporción de las ganancias netas en relación con los ingresos totales disminuye. Esto sugiere que el aumento en los costos supera proporcionalmente el crecimiento de las ventas, lo que resulta en un margen de beneficio más estrecho. Por lo tanto, aunque se genere un mayor flujo de efectivo bruto, la eficiencia en la generación de ganancias por cada unidad de venta se ve comprometida.

Sin embargo, desde una perspectiva a largo plazo, es crucial atravesar estas fases críticas para conseguir un crecimiento significativo en el volumen de ventas y en la capacidad de producción. Más adelante, será factible optimizar la rentabilidad mediante el ajuste de la eficiencia de costos y la mejora de los márgenes de venta.

5. Capítulo 5: Recomendaciones

5.1. Contratación de personal

Dado que en los escenarios alternativos evaluados surge la necesidad de contratar personal adicional en diferentes momentos del año para satisfacer la demanda, y considerando que la contratación temporal por pocos meses no es factible debido a las implicaciones legales, administrativas y de capacitación, una recomendación a realizar sería la de ampliar la planta de empleados fijos a mediano y largo plazo.

Esta ampliación permitiría a la empresa:

- Aumentar su capacidad productiva: para poder hacer frente a una demanda creciente sin tener que recurrir a soluciones temporales como las horas extras, que pueden resultar costosas y afectar el bienestar de los empleados.
- Reducir costos a largo plazo: al evitar el pago constante de horas extras y los costos asociados a la contratación y capacitación continua de personal temporal.
- Mejorar la eficiencia y la calidad: al contar con un equipo estable y bien capacitado, lo que puede traducirse en una mayor productividad y una menor tasa de errores.
- Aprovechar oportunidades de crecimiento: al tener la capacidad de responder rápidamente a un aumento en la demanda, lo que puede permitir a la empresa expandir su participación en el mercado y aumentar sus ventas.
- Concentrar en la gerencia: desligar al propietario de tareas manuales le permitirá focalizar sus esfuerzos en la toma de decisiones y la gestión de la producción en base a los resultados obtenidos en este trabajo.

La sugerencia de contratar personal extra surge del siguiente cálculo: las ventas anuales del año 2024 fueron 2574 unidades. Esto se logró con el trabajo de tres personas. Entonces se puede decir que cada persona fabricó en promedio 858 unidades anuales. Si se venden estas placas (considerando el escenario más pesimista con el precio más bajo) a 93 dólares, se obtienen unos ingresos de 79794 dólares anuales. El costo unitario de esas placas fabricadas por una sola persona es de 858 unidades x 14.22 dólares = 12201 dólares anuales. La diferencia da una ganancia anual de 67593 dólares. Esa es la ganancia que aporta el trabajo de una sola persona. Por otro lado, el sueldo anual de una persona es de 11340 dólares. Entonces, la diferencia es de 56253 dólares anuales. Esa ganancia contribuirá a cubrir los demás costos fijos y semifijos. Por eso considero que, al final del año, el aporte de ganancia de un empleado supera el costo de contratarlo, incluso teniendo

ventas estacionales con periodos altos y bajos.

Es importante destacar que la ampliación de la planta de empleados debe ir acompañada de una planificación estratégica que considere las proyecciones de demanda, los costos asociados y la capacidad de la empresa para absorber y gestionar un equipo más grande. En este sentido, será necesario dedicar exclusivamente un rol para gestionar el equipo ampliado.

Además, la maquinaria actual no es suficiente para acomodar a más empleados en un solo turno. Por lo tanto, para aumentar la capacidad de producción y cumplir con la creciente demanda, será necesario organizar un nuevo turno de trabajo. Por un lado, esto permitirá optimizar el uso de la maquinaria existente. Pero por el otro, también se deberán considerar los costos asociados con la creación de un nuevo turno, como el posible aumento en los costos de energía y los costos de supervisión adicionales. Sin embargo, se espera que estos costos se compensen con el aumento de la producción y las ventas.

5.2. Limitaciones del modelo predictivo

Es de suma importancia enfatizar que el modelo predictivo presentado, independientemente del escenario específico al que se aplique, se fundamenta en estimaciones y proyecciones que, si bien están basadas en datos y análisis rigurosos, no pueden capturar la totalidad de las variables y fluctuaciones inherentes a la realidad.

El entorno empresarial y económico es dinámico y está sujeto a cambios constantes e impredecibles. Factores como las fluctuaciones en la demanda, la aparición de nuevos competidores, las variaciones en las políticas gubernamentales, los avances tecnológicos disruptivos y los eventos globales imprevistos, pueden generar desviaciones significativas entre los resultados proyectados por el modelo y los resultados reales.

Por lo tanto, es imperativo que la empresa no considere las predicciones del modelo como verdades absolutas e inmutables, sino como herramientas de apoyo para la toma de decisiones informadas. Es esencial que la empresa adopte un enfoque proactivo y realice un seguimiento continuo y sistemático de los resultados obtenidos, comparándolos con las proyecciones del modelo y analizando las posibles causas de las desviaciones.

Asimismo, es recomendable que la empresa establezca mecanismos de retroalimentación que permitan ajustar y refinar el modelo predictivo de forma periódica, incorporando los datos reales y las lecciones aprendidas. De esta manera, el modelo se mantendrá actualizado y relevante, y podrá proporcionar predicciones cada vez más precisas y confiables.

En definitiva, el modelo predictivo es una herramienta valiosa, pero no infalible. Su eficacia

depende en gran medida de la capacidad de la empresa para utilizarlo de forma inteligente, crítica y adaptativa, combinando las proyecciones del modelo con el análisis de los datos reales y la comprensión profunda del entorno empresarial.

6. Capítulo 6: Conclusiones

El desarrollo de esta tesis ha generado múltiples aportes y beneficios significativos para la empresa. En primer lugar, se llevó a cabo una exhaustiva organización y digitalización de la información disponible, que hasta el momento se encontraba dispersa y en formato manual. Este proceso no solo facilitó el acceso y análisis de los datos, sino que también sentó las bases para una gestión más eficiente y una toma de decisiones informada.

En segundo lugar, se creó un modelo de optimización de la producción por lotes (batch sizing) que resulta una herramienta clave para la planificación y gestión de los recursos. Este modelo puede ser utilizado para evaluar diferentes escenarios de producción y analizar el impacto de cambios en los costos de materia prima, mano de obra y otros factores clave. Al proporcionar una visión integral de los costos de producción y la estacionalidad de la demanda, este modelo se convierte en una herramienta indispensable para la toma de decisiones informadas y la gestión eficaz de la producción. Como explican Maroto Álvarez et al. (2002), una solución óptima no solo debe satisfacer los requisitos matemáticos del modelo, sino también aportar información útil y aplicable para la gestión real del sistema. En este caso, los resultados permitieron identificar:

- El calendario óptimo de producción que acompaña mejor la estacionalidad de la demanda.
- Las cantidades ideales de productos a fabricar mensualmente para evitar sobreproducción y minimizar stock excedente.
- La asignación eficiente de recursos productivos, respetando las restricciones operativas de la planta.

A partir de esta interpretación, se formularon recomendaciones valiosas para el futuro, basadas en el análisis de los datos y los resultados del modelo. Estas recomendaciones incluyen estrategias para la gestión de inventario, la contratación de personal, la ampliación de la capacidad productiva y la adaptación a posibles cambios en el entorno económico y regulatorio, así como también un análisis de la rentabilidad de los cambios sugeridos, lo cual da mayor sustento a las recomendaciones realizadas. Se enfatizó la importancia de no considerar las predicciones del modelo como verdades absolutas, sino como herramientas de apoyo para la toma de decisiones, y se sugirió establecer mecanismos de retroalimentación para ajustar y refinar el modelo de forma periódica.

Surge como propuesta a futuro, superar algunas de las generalizaciones realizadas en cuanto a insumos utilizados y costos de materia prima, y realizar un análisis más exhaustivo y detallado de los costos unitarios para cada uno de los modelos de placas fabricadas. Con

esto, se obtendría un costo de fabricación mucho más exacto, lo que contribuiría a realizar análisis más precisos a fin de tomar las decisiones óptimas que favorezcan las ganancias de la empresa.

En resumen, esta tesis ha proporcionado a la empresa una estructura organizada de información, una herramienta de optimización de la producción y un conjunto de recomendaciones estratégicas que pueden contribuir significativamente a mejorar su eficiencia, rentabilidad y capacidad de adaptación a los desafíos del mercado.

Bibliografía

1. Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9ª ed.). McGraw-Hill.
2. Hermosilla Hidalgo, F. (2010). *Optimización*. Academia.edu.
3. Maroto Álvarez, C., Alcaraz Soria, J., & Ruiz García, R. (2002). *Investigación operativa: modelos y técnicas de optimización*. Universitat Politècnica de València.
4. Rodrigo Viveros E. y Eduardo Salazar H. (2010). *Modelo de Planificación de Producción para un Sistema Multiproducto con Múltiples Lineas de Producción*. *Revista Ingeniería de Sistemas*.
5. A. Drexl y A. Kimms. (1997). *Lot sizing and scheduling - Survey and extensions*. European Journal of Operational Research 99.
6. Florim, W.; Dias, P.; Santos, A. S. et al. (2019). *Analysis of lot-sizing methods suitability for different manufacturing application scenarios oriented to MRP and JIT/Kanban environments*. Brazilian Journal of Operations & Production Management, Vol. 16, No. 4, pp. 638-649.
7. M. Schmidt, B. Münzberg, P. Nyhuis. (2015). *Determining Lot Sizes in Production Areas – Exact Calculations versus Research Based Estimation*. Procedia CIRP, volume 28, pages 143-148.
8. Rendiyatna Ferdiana, Abdul Hakim Halim. (2024). *Dynamic lot sizing model for retailers with multi suppliers, quantity discounts, and capacity constraints that consider advance demand informations*. International Journal of Production Management and Engineering.
9. Raf Jans, Zeger Degraeve. (2008). *Modeling Industrial Lot Sizing Problems: A Review*. International Journal of Production Research.
10. Prentis, Eric L. (1989). *MRP Lot Sizing with Variable Production/Purchasing Costs: Formulation and Solution*. International Journal of Production Research 1989.
11. [Constraint Integer Programming: A New Approach to Integrate CP and MIP](#). Tobias Achterberg, Timo Berthold, Thorsten Koch, Kati Wolter. Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems, CPAIOR 2008, LNCS 5015, Pages 6–20, 2008. Available as [ZIB Report 08-01](#) and at [SpringerLink](#), January 2008. [BibTeX](#).
12. [SCIP: Solving Constraint Integer Programs](#). Tobias Achterberg. Mathematical Programming Computation, Volume 1, Number 1, Pages 1–41, 2009. Available at [Mathematical Programming Computation](#), 2009. [BibTeX](#).
13. Thorsten Koch. [Rapid Mathematical Programming](#). Berlin 2004.

Apéndices

Apéndice A

Tabla de datos relacional

Inicialmente, la empresa entregó datos referentes a insumos, compras, producción y ventas, los cuales fueron digitalizados y organizados en 4 tablas, que se relacionan entre sí mediante claves foráneas y primarias.

Tabla Detalle Insumos			
Columna	Descripción	Dtype	
DeIns	Detalle del insumo requerido	object	clave foránea
DeCan	Cantidad requerida del insumo	integr	
DeMed	Unidad de medida del insumo	integr	
DeProd	Producto final/semifinal sobre el cual se mide la cantidad de insumos utilizados	object	clave foránea

Tabla Compras			
Columna	Descripción	Dtype	
CoFec	Fecha en que se realizó la compra	datetime	
Colns	Insumo comprado	object	clave primaria
CoPro	Proveedor al cual se compró el insumo	object	
CoCan	Cantidad de unidades compradas del insumo	integr	
CoPre	Precio de compra unitario del insumo	integr	
CoMed	Unidad de medida del insumo	integr	

Tabla Producción			
Columna	Descripción	Dtype	
PrFec	Fecha en que se terminó de realizar una tarea sobre un producto final/semifinal	datetime	
PrTar	Tarea de producción que se realizó	object	
PrProd	Producto final/semifinal sobre el que se realizó la tarea	object	clave primaria
PrLar	Largo de las hojas (producto semifin 1) expresado en cm	integr	
PrHoj	Cantidad de hojas (producto semifin 1) sobre las cuales se realizaron tareas	integr	
PrBat	Cantidad de batches (producto semifin 2) sobre los cuales se realizaron tareas	integr	
PrPla	Cantidad de placas (producto final) sobre las cuales se realizaron tareas	integr	

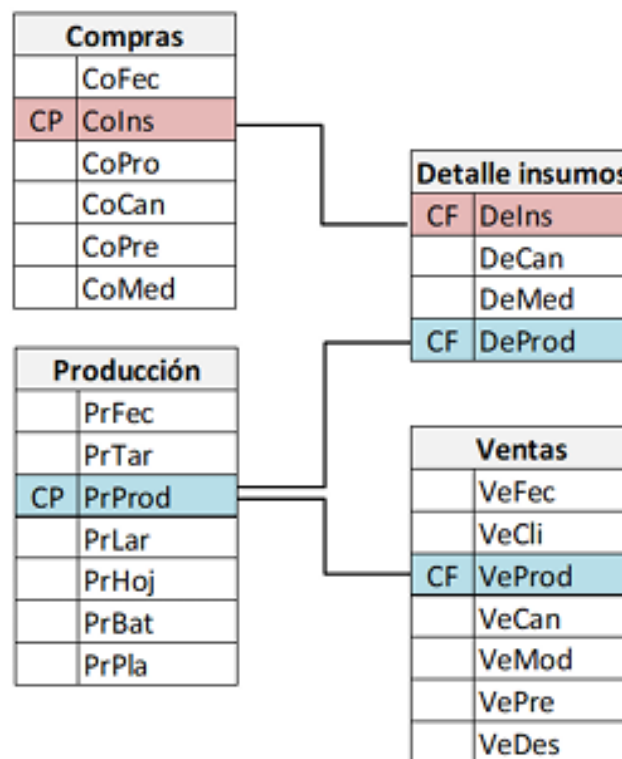
Tabla Ventas			
Columna	Descripción	Dtype	
VeFec	Fecha en que se realizó la venta	datetime	
VeCli	Cliente al cual se le facturó	object	
VeProd	Producto final vendido (placa)	object	clave foránea
VeCan	Cantidad de placas (producto final) vendidas	integr	
VeMod	Modelo de placas (producto final) vendidas	object	
VePre	Precio en dolares por placa (producto final) vendida	integr	
VeDes	Descuento realizado sobre el precio total expresado en porcentaje	integr	

Apéndice B

Diagrama entidad relación

Los 4 datasets obtenidos se relacionan entre sí de la siguiente forma:

La clave primaria “insumo comprado” de la tabla de Compras se corresponde con la clave foránea “Detalle del insumo requerido” de la tabla Detalle insumos. La clave primaria “Producto final/semifinal” de la tabla de Producción se corresponde con las claves foráneas “Producto final/semifinal” de la tabla Detalle insumos y con “Producto final vendido” de la tabla de Ventas.



Apéndice C

Dataset producción 2024

Contiene un detalle de los diferentes productos finales y semifinales fabricados desde enero hasta diciembre de 2024. Incluye fecha, tarea, producto final/semifinal, largo de hojas, hojas por batch, cantidad de batches y cantidad de placas. Tiene 256 registros.

Año	Mes	Fecha	Tarea	Producto	largo hojas	cant hojas	cant batches	cant placas
2024	1	1/2/2024	armado	hoja	2500	720	8	32
2024	1	1/2/2024	cortado	batch	2500	720	8	32
2024	1	1/3/2024	pintado	placa	2500	720	8	32
2024	1	1/4/2024	armado	hoja	2280	990	11	44
2024	1	1/4/2024	armado	hoja	2500	90	1	4
2024	1	1/4/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	1	1/4/2024	cortado	batch	2280	990	11	44
2024	1	1/4/2024	cortado	batch	2500	90	1	4
2024	1	1/4/2024	pintado	placa	2280	990	11	44
2024	1	1/5/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	1	1/5/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	1	1/6/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	1	1/8/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	1	1/10/2024	armado	hoja	2280	1260	14	56
2024	1	1/10/2024	cortado	batch	2280	1260	14	56
2024	10	1/10/2024	armado	hoja	2500	1170	13	52
2024	1	1/11/2024	pintado	placa	2280	1260	14	56
2024	11	1/11/2024	armado	hoja	2550	990	11	44
2024	11	1/11/2024	armado	hoja	2280	180	2	8
2024	1	1/12/2024	impregnación	hoja	2500	1890	21	84
2024	1	1/14/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	1	1/15/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	1	1/15/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	1	1/16/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48
2024	1	1/18/2024	armado	hoja	2500	720	8	32
2024	1	1/18/2024	armado	hoja	2280	270	3	12
2024	1	1/18/2024	cortado	batch	2500	720	8	32
2024	1	1/18/2024	cortado	batch	2280	270	3	12
2024	1	1/18/2024	pintado	placa	2280	270	3	12
2024	1	1/19/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	1	1/22/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	1	1/22/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	1	1/23/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	1	1/23/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	1	1/24/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	1	1/29/2024	armado	hoja	2280	1260	14	56
2024	1	1/29/2024	cortado	batch	2280	1260	14	56
2024	1	1/30/2024	impregnación	hoja	2500	1800	20	80
2024	1	1/30/2024	pintado	placa	2280	1260	14	56
2024	1	1/31/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	1	1/31/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	2	2/1/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	2	2/2/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	2	2/2/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48

2024	2	2/5/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	2	2/5/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	2	2/6/2024	armado	hoja	2500	900	10	40
2024	2	2/6/2024	armado	hoja	2280	180	2	8
2024	2	2/6/2024	cortado	batch	2500	900	10	40
2024	2	2/6/2024	cortado	batch	2280	180	2	8
2024	2	2/6/2024	pintado	placa	2500	900	10	40
2024	2	2/7/2024	pintado	placa	2280	180	2	8
2024	10	2/10/2024	armado	hoja	2500	540	6	24
2024	10	2/10/2024	armado	hoja	2280	630	7	28
2024	2	2/14/2024	armado	hoja	2300	1170	13	52
2024	2	2/14/2024	cortado	batch	2300	1170	13	52
2024	2	2/15/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	2	2/15/2024	pintado	placa	2300	1170	13	52
2024	2	2/16/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	2	2/16/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	2	2/17/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	2	2/19/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	2	2/19/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	2	2/20/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	2	2/20/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	2	2/21/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	2	2/21/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	2	2/22/2024	armado	hoja	2280	630	7	28
2024	2	2/22/2024	cortado	batch	2280	630	7	28
2024	2	2/23/2024	pintado	placa	2280	630	7	28
2024	3	3/4/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	3	3/4/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48
2024	3	3/5/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	3	3/5/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	3	3/6/2024	armado	hoja	2500	900	10	40
2024	3	3/6/2024	cortado	batch	2500	900	10	40
2024	3	3/6/2024	pintado	placa	2500	900	10	40
2024	3	3/7/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	3	3/8/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	3	3/8/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	3	3/9/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	3	3/11/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	3	3/11/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	3	3/12/2024	impregnación	hoja	2280	1530	17	68
2024	3	3/12/2024	impregnación	hoja	1850	450	5	20
2024	3	3/12/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	3	3/15/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	3	3/18/2024	armado	hoja	2280	630	7	28
2024	3	3/18/2024	armado	hoja	1840	450	5	20
2024	3	3/18/2024	cortado	batch	2280	630	7	28
2024	3	3/18/2024	cortado	batch	1840	450	5	20
2024	3	3/18/2024	pintado	placa	2280	630	7	28
2024	3	3/19/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	3	3/19/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	3	3/19/2024	pintado	placa	1840	450	5	20
2024	3	3/20/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	3	3/21/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	3	3/21/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48

2024	3	3/22/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	3	3/22/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	3	3/23/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	3	3/25/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	3	3/26/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	3	3/28/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	3	3/28/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	3	3/29/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	4	4/2/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	4	4/2/2024	armado	hoja	2500	90	1	4
2024	4	4/2/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	4	4/2/2024	cortado	batch	2500	90	1	4
2024	4	4/3/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	4	4/3/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	4	4/5/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	4	4/5/2024	impregnación	hoja	2280	1890	21	84
2024	4	4/5/2024	pintado	placa	2500	90	1	4
2024	4	4/8/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	4	4/8/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	4	4/9/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	4	4/9/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	4	4/10/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	4	4/10/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	11	4/11/2024	armado	hoja	2500	990	11	44
2024	12	4/12/2024	impregnación	hoja	2280	90	10	40
2024	12	4/12/2024	impregnación	hoja	1900	90	12	48
2024	11	5/11/2024	impregnación	hoja	2500	90	20	80
2024	12	5/12/2024	armado	hoja	1900	1080	12	48
2024	12	5/12/2024	armado	hoja	2280	90	1	4
2024	6	6/7/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	6	6/7/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	6	6/8/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	6	6/11/2024	armado	hoja	2280	720	8	32
2024	6	6/11/2024	armado	hoja	2500	450	5	20
2024	6	6/11/2024	cortado	batch	2280	720	8	32
2024	6	6/11/2024	cortado	batch	2500	450	5	20
2024	6	6/12/2024	pintado	placa	2500	450	5	20
2024	6	6/13/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	6	6/13/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	6	6/14/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48
2024	6	6/26/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	6	6/26/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	6	6/27/2024	armado	hoja	2280	900	10	40
2024	6	6/27/2024	armado	hoja	2500	900	10	40
2024	6	6/27/2024	cortado	batch	2280	900	10	40
2024	6	6/27/2024	cortado	batch	2500	900	10	40
2024	6	6/27/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	6	6/28/2024	pintado	placa	2280	900	10	40
2024	7	7/8/2024	impregnación	hoja	2280	1710	19	76
2024	7	7/10/2024	armado	hoja	2280	990	11	44
2024	7	7/10/2024	cortado	batch	2280	990	11	44
2024	11	7/11/2024	armado	hoja	2500	990	11	44
2024	7	7/12/2024	impregnación	hoja	2280	1710	19	76
2024	7	7/12/2024	pintado	placa	2280	990	11	44

2024	7	7/15/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	7	7/15/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	7	7/16/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	7	7/17/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	7	7/17/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	7	7/18/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	7	7/19/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	7	7/22/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	7	7/22/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	7	7/22/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	7	7/23/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	7	7/23/2024	cortado	batch	2280	1080	12	48
2024	7	7/25/2024	pintado	placa	2280	1080	12	48
2024	7	7/26/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	7	7/26/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	7	7/29/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	7	7/29/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	7	7/30/2024	armado	hoja	2500	540	6	24
2024	7	7/30/2024	armado	hoja	2280	360	4	16
2024	7	7/30/2024	cortado	batch	2500	540	6	24
2024	7	7/30/2024	cortado	batch	2280	360	4	16
2024	7	7/30/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48
2024	7	7/31/2024	pintado	placa	2280	360	4	16
2024	8	8/2/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	8	8/7/2024	armado	hoja	2500	1170	13	52
2024	8	8/7/2024	cortado	batch	2500	1170	13	52
2024	8	8/8/2024	pintado	placa	2500	1170	13	52
2024	8	8/12/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	8	8/13/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	8	8/13/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	8	8/14/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	8	8/15/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	8	8/19/2024	armado	hoja	2280	1260	14	56
2024	8	8/19/2024	cortado	batch	2280	1260	14	56
2024	8	8/20/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	8	8/20/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	8	8/20/2024	pintado	placa	2280	1260	14	56
2024	8	8/21/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	8	8/22/2024	armado	hoja	2280	360	4	16
2024	8	8/22/2024	armado	hoja	2500	360	4	16
2024	8	8/22/2024	cortado	batch	2280	360	4	16
2024	8	8/22/2024	cortado	batch	2500	360	4	16
2024	8	8/23/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	8	8/23/2024	pintado	placa	2500	360	4	16
2024	8	8/26/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	8	8/26/2024	armado	hoja	2280	90	1	4
2024	8	8/26/2024	cortado	batch	2500	1080	12	48
2024	8	8/26/2024	cortado	batch	2280	90	1	4
2024	8	8/27/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	8	8/27/2024	pintado	placa	2500	1080	12	48
2024	8	8/29/2024	pintado	placa	2280	90	1	4
2024	9	9/2/2024	armado	hoja	2280	630	7	28
2024	9	9/2/2024	armado	hoja	2500	540	6	24
2024	9	9/2/2024	cortado	batch	2280	630	7	28

2024	9	9/2/2024	cortado	batch	2500	540	6	24
2024	9	9/3/2024	impregnación	hoja	2280	1800	20	80
2024	9	9/3/2024	pintado	placa	2500	540	6	24
2024	9	9/9/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	9	9/9/2024	cortado	batch	2280	1170	13	52
2024	9	9/10/2024	pintado	placa	2280	1170	13	52
2024	9	9/11/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	9	9/12/2024	armado	hoja	1500	1080	12	48
2024	9	9/12/2024	cortado	batch	1500	1080	12	48
2024	9	9/13/2024	pintado	placa	1500	1080	12	48
2024	9	9/17/2024	armado	hoja	2500	540	6	24
2024	9	9/17/2024	armado	hoja	2280	540	6	24
2024	9	9/17/2024	cortado	batch	2500	540	6	24
2024	9	9/17/2024	cortado	batch	2280	540	6	24
2024	9	9/18/2024	impregnación	hoja	2280	1620	18	72
2024	9	9/18/2024	impregnación	hoja	2500	90	1	4
2024	9	9/18/2024	pintado	placa	2280	540	6	24
2024	9	9/20/2024	armado	hoja	2500	180	2	8
2024	9	9/20/2024	armado	hoja	2280	990	11	44
2024	9	9/20/2024	cortado	batch	2500	180	2	8
2024	9	9/20/2024	cortado	batch	2280	990	11	44
2024	9	9/21/2024	pintado	placa	2500	180	2	8
2024	9	9/22/2024	pintado	placa	2280	990	11	44
2024	9	9/24/2024	impregnación	hoja	2500	1710	19	76
2024	9	9/25/2024	armado	hoja	2500	1170	13	52
2024	9	9/25/2024	cortado	batch	2500	1170	13	52
2024	9	9/26/2024	pintado	placa	2500	1170	13	52
2024	12	11/12/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	11	12/11/2024	impregnación	hoja	2280	90	21	84
2024	10	10/16/2024	impregnación	hoja	2500	90	18	72
2024	10	10/16/2024	impregnación	hoja	2280	66	1	4
2024	10	10/17/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	10	10/17/2024	armado	hoja	2500	1080	12	48
2024	10	10/21/2024	impregnación	hoja	2500	90	18	72
2024	10	10/21/2024	impregnación	hoja	2280	90	24	96
2024	10	10/22/2024	armado	hoja	2500	810	9	36
2024	10	10/22/2024	armado	hoja	2280	90	1	4
2024	10	10/23/2024	armado	hoja	2500	990	11	44
2024	10	10/25/2024	impregnación	hoja	2500	90	19	76
2024	10	10/25/2024	impregnación	hoja	2280	90	1	4
2024	11	11/13/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	11	11/19/2024	impregnación	hoja	2280	90	21	84
2024	11	11/20/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	11	11/21/2024	armado	hoja	2280	1080	12	48
2024	11	11/26/2024	impregnación	hoja	2280	90	21	84
2024	11	11/29/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52
2024	12	12/13/2024	armado	hoja	2280	810	9	36
2024	12	12/13/2024	armado	hoja	2500	360	4	16
2024	12	12/20/2024	impregnación	hoja	2280	90	21	84
2024	12	12/27/2024	armado	hoja	2280	1170	13	52

Apéndice D

Dataset ventas 2024

Contiene un listado de todas los productos vendidos desde enero hasta diciembre de 2024. Originalmente incluía fecha, cliente, cantidad, modelo, precio en dólares, y descuento. Para la exposición en el presente trabajo, los datos de clientes y de precios y descuentos ofrecidos a cada uno de ellos fueron ocultados. Tiene 80 registros.

Año	Mes	Fecha	Producto final	Cantidad	Modelo
2024	1	1/2/2024	placa	60	180/60/15 P
2024	1	1/2/2024	placa	20	200/60/15 P
2024	1	1/5/2024	placa	24	180/60/15 SP
2024	1	1/12/2024	placa	56	200/60/10 SP
2024	1	1/24/2024	placa	25	180/60/15 P
2024	1	1/31/2024	placa	15	100/60/15 SP
2024	2	2/2/2024	placa	10	180/60/15 SP
2024	2	2/2/2024	placa	3	200/60/15 SP
2024	2	2/5/2024	placa	12	200/60/10 SP
2024	2	2/16/2024	placa	54	180/60/15 SP
2024	2	2/22/2024	placa	44	200/60/10 SP
2024	2	2/22/2024	placa	10	200/60/15 SP
2024	2	2/22/2024	placa	10	180/60/15 SP
2024	2	2/28/2024	placa	35	180/60/15 P
2024	3	3/8/2024	placa	10	200/60/15 P
2024	3	3/8/2024	placa	15	180/60/15 P
2024	3	3/11/2024	placa	20	180/60/15 SP
2024	3	3/20/2024	placa	37	180/60/15 P
2024	3	3/20/2024	placa	20	180/60/15 P
2024	3	3/25/2024	placa	25	200/60/15 P
2024	5	5/8/2024	placa	13	200/60/15 P
2024	5	5/9/2024	placa	5	180/60/15 P
2024	5	5/10/2024	placa	30	180/60/15 P
2024	5	5/17/2024	placa	51	180/60/10 SP
2024	5	5/30/2024	placa	25	180/60/10 SP
2024	5	5/30/2024	placa	4	200/60/10 SP
2024	7	7/2/2024	placa	25	180/60/15 P
2024	7	7/3/2024	placa	12	200/60/15 SP
2024	7	7/3/2024	placa	12	200/60/15 P
2024	7	7/3/2024	placa	64	180/60/15 P
2024	7	7/10/2024	placa	40	180/60/15 SP
2024	7	7/29/2024	placa	150	180/60/15 P
2024	8	8/1/2024	placa	36	200/60/15 P
2024	8	8/7/2024	placa	81	200/60/15 P

2024	8	8/8/2024	placa	34	200/60/10 SP
2024	8	8/14/2024	placa	40	200/60/10 SP
2024	8	8/15/2024	placa	20	180/60/15 P
2024	8	8/20/2024	placa	60	180/60/15 SP
2024	8	8/28/2024	placa	3	180/60/15 SP
2024	8	8/28/2024	placa	8	200/60/15 SP
2024	8	8/30/2024	placa	25	200/60/15 P
2024	9	9/3/2024	placa	15	180/60/10 SP
2024	9	9/3/2024	placa	8	180/60/15 P
2024	9	9/6/2024	placa	50	200/60/15 P
2024	9	9/17/2024	placa	15	200/60/15 P
2024	9	9/17/2024	placa	60	200/60/10 SP
2024	9	9/18/2024	placa	10	180/60/15 P
2024	9	9/23/2024	placa	100	200/60/15 SP
2024	10	10/3/2024	placa	7	200/60/15 SP
2024	10	10/3/2024	placa	3	180/60/15 P
2024	10	10/4/2024	placa	10	200/60/15 P
2024	10	10/2/2024	placa	100	200/60/15 P
2024	10	10/14/2024	placa	30	180/60/15 P
2024	10	10/16/2024	placa	135	100/60/15 P
2024	10	10/16/2024	placa	10	160/60/15 SP
2024	10	10/20/2024	placa	10	200/60/15 P
2024	10	10/20/2024	placa	40	180/60/15 P
2024	10	10/26/2024	placa	21	180/60/15 P
2024	10	10/28/2024	placa	30	200/60/15 SP
2024	11	11/1/2024	placa	40	180/60/15 P
2024	11	11/12/2024	placa	15	180/60/15 P
2024	11	11/12/2024	placa	10	180/60/15 P
2024	11	11/13/2024	placa	5	180/60/15 P
2024	11	11/15/2024	placa	30	200/60/15 SP
2024	11	11/28/2024	placa	100	180/60/15 P
2024	11	11/19/2024	placa	4	180/60/15 SP
2024	11	11/19/2024	placa	4	180/60/15 SP
2024	12	12/3/2024	placa	50	150/60/15 P
2024	12	12/4/2024	placa	82	200/60/15 P
2024	12	12/10/2024	placa	30	180/60/15 SP
2024	12	12/10/2024	placa	6	180/60/15 SP
2024	12	12/16/2024	placa	5	200/60/15 P
2024	12	12/16/2024	placa	27	200/60/15 P
2024	12	12/19/2024	placa	50	180/60/15 P
2024	12	12/26/2024	placa	40	180/60/15 P
2024	12	12/23/2024	placa	56	180/60/15 SP
2024	12	12/23/2024	placa	28	200/60/15 SP
2024	12	12/27/2024	placa	65	200/60/15 P

2024	12	12/27/2024	placa	15	180/60/15 SP
2024	12	12/27/2024	placa	15	200/60/15 P

Apéndice E

Implementación del modelo en código ZIMPL

Cantidad de períodos

param n := 12;

Conjunto de periodos

set T := {1..n};

set T0 := {0..n};

Demanda de cada periodo

param d[T] := <1> 200, <2> 178, <3> 127, <4> 0, <5> 128, <6> 0, <7> 303, <8> 307, <9> 258, <10> 396, <11> 208, <12> 469;

Costo de producción de cada periodo

param c[T] := <1> 14.22, <2> 14.22, <3> 14.22, <4> 14.22, <5> 14.22, <6> 14.22, <7> 14.22, <8> 14.22, <9> 14.22, <10> 14.22, <11> 14.22, <12> 14.22;

Costo por nuevo empleado de cada periodo

param f[T] := <1> 680, <2> 760, <3> 834, <4> 884, <5> 868, <6> 932, <7> 998, <8> 978, <9> 1048, <10> 1139, <11> 1119, <12> 1098;

Variables

#Variable de producción

var x[T];

Variable de stock

var s[T0];

#Variable de empleados adicionales a contratar

var y[T] integer;

#Variable binaria de producción

var w[T] binary;

#Variable de costo

var costo[T];

Función objetivo

minimize fobjcosto: sum <t> in T: (c[t] * x[t] + f[t] * y[t] + 1094 * w[t]) + 28681;

Restricciones

subto defstock: forall t in T:

$$s[t] == s[t-1] + x[t] - d[t];$$

subto xpos: forall t in T:

$$x[t] \geq 0;$$

subto ypos: forall t in T:

$$y[t] \geq 0;$$

subto spos: forall t in T:

$$s[t] \geq 0;$$

subto stockinicial: $s[0] == 0$;

subto stocklimitado: forall t in T:

$$s[t] \leq 300;$$

subto ligar1: forall t in T:

$$x[t] \leq 450 + 150 * y[t];$$

subto ligar2: forall t in T:

$$x[t] \leq 1000 * w[t];$$