

MATILA XIX

MENOS INCERTIDUMBRE, MEJORES DECISIONES: PRONÓSTICO Y SIMULACIÓN APLICADOS AL MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA PESADA

TECNOCARGA S.R.L.



INTEGRANTES

■ **Aguirre Rodríguez, Julián**
DNI 44.537.858

■ **Amaya, Natalia Anabela**
DNI 44.585.483

■ **Arévalo, Tomás**
DNI 44.189.700

■ **Barros, Rocio Mariana**
DNI 44.372.580

■ **González Contino, Milagros**
DNI 44.819.337

■ **Herrera, Constanza María Victoria**
DNI 44.477.584

■ **Herrera Lairana, Josefina**
DNI 43.849.192

■ **Sánchez, María Valentina**
DNI 43.564.986



**MENOS INCERTIDUMBRE, MEJORES DECISIONES: PRONÓSTICO Y SIMULACIÓN APLICADOS AL
MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA PESADA**

**AGUIRRE RODRÍGUEZ JULIÁN - AMAYA NATALIA ANABELA - AREVALO TOMAS - BARROS ROCIO
MARIANA - GONZALEZ CONTINO MILAGROS - HERRERA CONSTANZA MARIA VICTORIA - HERRERA
LAIRANA JOSEFINA - SANCHEZ MARIA VALENTINA**

julian.aguirre2316@gmail.com - tomasarevalo05@gmail.com - rociombarros6@gmail.com-
constanzah2002@gmail.com - josefinaherrera202@gmail.com - sanchezmavalentina2@gmail.com
- milugonzalez982@gmail.com - amayanatalia60@gmail.com

Índice

Resumen.....	4
Introducción.....	5
Situación Problemática.....	6
Preguntas de Investigación.....	7
1. Pregunta de Investigación General.....	7
2. Preguntas de Investigación Específicas.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	8
Marco Metodológico.....	8
Marco Teórico.....	9
Aplicación.....	13
1. Simulación:.....	13
2. Objetivo de la simulación.....	13
3. Datos e insumos utilizados.....	14
4. Descripción del programa de simulación.....	15
a) Construcción de la distribución histórica.....	15
b) Asignación de tipo de servicio por rango.....	15
c) Generación de iteraciones.....	16
d) Consolidación y análisis de resultados.....	16
5. Resultados de la simulación.....	16
6. Interpretación y utilidad para la gestión.....	17
Pronóstico.....	18
Paso 1: Recolección y análisis de datos.....	18
Paso 2: Selección y aplicación de los métodos de pronóstico.....	21
Método 1: Descomposición Multiplicativa.....	21
Método 2: Suavizamiento Exponencial.....	23
Paso 3: Comparación y selección del método.....	24
Paso 4: Pronóstico final e interpretación.....	25
Recomendaciones específicas.....	26
Recomendaciones generales.....	27
Conclusiones.....	28
Referencias.....	30
Apéndice.....	30



Resumen

Este trabajo de investigación con un enfoque cuantitativo analiza la gestión de mantenimiento en la empresa TECNOCARGA S.R.L. enfocado en la maquinaria PE245, con el objetivo de pasar de una administración reactiva a una proactiva frente a las constantes fallas y la variabilidad de la demanda por la época de zafra. A partir de un diseño basado en los registros históricos de Órdenes de Trabajo y horómetros, se aplicó una Simulación Monte Carlo mediante Python en Google Colab (ejecutando 1.000 iteraciones) que determinó que el 60,7% de las intervenciones corresponden a mantenimientos preventivos y el 39,3% a reparaciones correctivas, una relación clave para el presupuesto de la empresa considerando que los arreglos correctivos cuestan más del doble (\$660.100 vs \$282.900). Por otro lado, al evaluar los pronósticos en el software QM, el método de Descomposición Multiplicativa demostró ser el más preciso al captar la estacionalidad del negocio con un menor error absoluto (MAD de 6,148), estimando una demanda de aproximadamente 4 mantenimientos para el próximo cuatrimestre. Finalmente, basándose en estos resultados, se recomienda a la gerencia diseñar un presupuesto cuatrimestral estocástico, flexibilizar la capacidad del taller y los turnos de los técnicos antes de los picos de zafra, y estandarizar la carga de datos en su sistema ERP para seguir puliendo la precisión de los modelos matemáticos.

Palabras claves: Mantenimiento, Simulación Monte Carlo, Pronóstico de series de tiempo, Descomposición multiplicativa.

Introducción

TECNOCARGA SRL es una empresa cuya actividad principal se orienta al alquiler de maquinaria pesada destinada a distintos sectores productivos, tales como la construcción, la minería, la agroindustria y la industria en general. La organización estructura sus operaciones en tres ejes fundamentales: el alquiler de equipos, los servicios de mantenimiento y el soporte técnico integral. En lo referente al alquiler, dispone de una amplia gama de maquinarias que incluyen equipos para movimiento de suelo, manipulación de cargas y elevación de personas, los cuales pueden ser provistos con operadores certificados para garantizar un servicio seguro y especializado.

Para asegurar la continuidad operativa de los servicios, el soporte técnico integral se sustenta en la existencia de un taller propio, depósitos de repuestos, logística de traslado, vehículos de auxilio y un sistema de gestión ERP que permite optimizar el control de stock y de órdenes de trabajo. En este marco, TECNOCARGA SRL ejecuta tanto modalidades de mantenimiento preventivo (programadas en función de horas de uso o kilometraje con el objetivo de disminuir paradas imprevistas) como intervenciones correctivas, que contemplan la reparación urgente de fallas y la asistencia en obra.

Tras una evaluación preliminar, se decidió trabajar exclusivamente con la base de datos correspondiente a la orden OT PE245. La elección de este equipo se fundamenta en su fuerte impacto operativo, ya que fue la máquina que registró la mayor cantidad de arreglos e intervenciones. Focalizar el estudio en el activo más inestable permite abordar la problemática desde una perspectiva de optimización de recursos, buscando que las propuestas analíticas basadas en

datos históricos generen un impacto económico y operativo significativo para la gestión de la empresa.

Situación Problemática

El área de mantenimiento enfrenta un desafío crítico caracterizado por una elevada frecuencia de mantenimientos en su flota de maquinaria pesada. Estas fallas imprevistas generan paradas no programadas, incrementan significativamente los costos operativos y dificultan la planificación de los turnos del personal técnico y el stock de repuestos.

Esta problemática se ve agudizada por una notable incertidumbre respecto a la carga de trabajo futura, la cual presenta variaciones irregulares y picos de demanda influenciados por la estacionalidad de actividades productivas externas (como la época de zafra). Ante la falta de un esquema proactivo fundamentado en datos, la administración opera de forma reactiva, lo que impide alcanzar un equilibrio eficiente entre la capacidad ociosa del taller y los tiempos de demora en la atención de los equipos, afectando la continuidad operativa y la rentabilidad de la organización.

Preguntas de Investigación

1. Pregunta de Investigación General

¿Cómo contribuyen las herramientas de pronóstico y simulación a mejorar la planificación de los recursos del área de mantenimiento de Tecnocarga S.R.L.?

2. Preguntas de Investigación Específicas

- ¿Cuál es la demanda esperada de mantenimientos correctivos para el próximo período utilizando modelos de pronóstico de series de tiempo?
- ¿Qué comportamiento presentan los distintos tipos de intervenciones de mantenimiento al aplicar una simulación Monte Carlo basada en datos históricos?
- ¿De qué manera los resultados obtenidos mediante el pronóstico y la simulación pueden contribuir a una mejor planificación sobre el presupuesto requerido para cada cuatrimestre?

Objetivo general

Aplicar herramientas de pronóstico y simulación para analizar el comportamiento del mantenimiento de la maquinaria PE245 y generar información que contribuya a la planificación operativa y a la toma de decisiones en Tecnocarga S.R.L.

Objetivos específicos

- Elaborar un pronóstico de la demanda futura de mantenimientos mediante modelos de series de tiempo.



- Estimar, a través de una simulación montecarlo, la distribución de los distintos tipos de intervenciones y sus costos asociados.
- Interpretar los resultados obtenidos para apoyar la realización de un plan de presupuesto cuatrimestral.

Marco Metodológico

Enfoque: Este trabajo se llevará a cabo con un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recopilación, medición y análisis de datos numéricos que provienen de registros históricos de mantenimiento. Esto nos permite estudiar de manera objetiva las variables involucradas y utilizar las herramientas necesarias para procesar y analizar la información.

Alcance: La investigación tendrá un alcance descriptivo y correlacional. Descriptivo porque nos ayudará a caracterizar el comportamiento de las fallas y las intervenciones de mantenimiento que se han registrado en los equipos. Por otro lado, será correlacional porque se examinará la relación entre las variables que afectan el funcionamiento de los equipos y la aparición de fallas.

Diseño: El diseño de la investigación será longitudinal, dado que trabajaremos con información histórica recopilada a lo largo de diferentes periodos de tiempo. Esto nos permitirá analizar cómo han evolucionado los eventos y detectar tendencias en el comportamiento de los equipos a lo largo del periodo.

Técnicas a utilizar:

- Revisión de registros históricos: Para recopilar información sobre fallas que han ocurrido, las reparaciones realizadas y la frecuencia de las intervenciones correctivas en los equipos.
- Análisis de bases de datos de Órdenes de trabajo (OT): Considerando datos como la fecha de la intervención, el tipo de falla, el equipo afectado, el tiempo de reparación y las actividades realizadas durante el mantenimiento.
- Relevamiento de datos operativos de los equipos: A través de la consulta de registros de horometro y otros indicadores disponibles, para conocer el nivel de utilización y funcionamiento de cada equipo.
- Consulta de historiales técnicos y reportes de mantenimiento: Con el objetivo de complementar la información obtenida y verificar la consistencia de los registros utilizados en el estudio.

Marco Teórico

Análisis Cuantitativo y Toma de Decisiones

El análisis cuantitativo es un enfoque que se basa en datos numéricos y modelos matemáticos para apoyar la toma de decisiones gerenciales. Render, Stair, Hanna y Hale (2016) señalan que el análisis cuantitativo se complementa con el análisis cualitativo, y que ambos son necesarios para una gestión

eficaz. Mientras el análisis cualitativo se apoya en la intuición y la experiencia del administrador, el análisis cuantitativo proporciona una base objetiva y rigurosa para decidir.

Según los autores, cuando el gerente tiene poca experiencia con problemas similares, o cuando el problema es muy complejo, el análisis cuantitativo se vuelve especialmente relevante. Para ello, el analista debe identificar los hechos cuantitativos asociados con el problema y construir expresiones matemáticas que describan los objetivos, las restricciones y las relaciones existentes (Render, 2016).

El proceso general del análisis cuantitativo comprende los siguientes pasos: definir el problema, desarrollar un modelo, obtener los datos de entrada, desarrollar una solución, probar la solución, analizar los resultados e implementarlos. Este enfoque estructurado permite aumentar la efectividad de la toma de decisiones y reducir la incertidumbre inherente a los entornos empresariales complejos.

En el contexto del presente trabajo, Tecnocarga S.R.L. enfrenta una situación donde la elevada frecuencia de mantenimientos correctivos no sólo genera costos adicionales, sino que dificulta la planificación de sus recursos humanos y materiales. La aplicación de herramientas cuantitativas permite transformar un proceso reactivo en uno proactivo, fundamentado en datos históricos y modelos matemáticos.

Simulación

La Simulación Monte Carlo es un método numérico que utiliza números aleatorios para modelar el comportamiento de sistemas que presentan incertidumbre o variabilidad. Su nombre hace referencia al famoso casino de Mónaco, por la naturaleza probabilística de los procesos que modela.

El principio básico consiste en repetir un experimento simulado una gran cantidad de veces (en el caso de aplicación de 1.000 iteraciones) donde cada repetición representa un evento de servicio distinto, con valores generados aleatoriamente dentro de los rangos definidos por la distribución histórica. Al acumular los resultados de todas las iteraciones, emerge una distribución estadística del fenómeno que permite estimar probabilidades, costos esperados y rangos de variación con mucha mayor precisión que cualquier cálculo puntual.

Para que esta técnica sea válida, es imprescindible contar con datos históricos representativos que permitan construir la distribución de frecuencias inicial. En este caso, esa base está constituida por el registro histórico del horómetro de los equipos, que permite determinar con qué frecuencia los distintos rangos de uso están asociados a intervenciones preventivas o correctivas

Pronósticos

Los pronósticos son estimaciones de valores futuros de una variable, elaboradas a partir de información histórica o de juicios expertos. Render (2016) afirma que todos los días los administradores toman decisiones sin saber qué ocurrirá en el futuro, y que el propósito fundamental del pronóstico es reducir esa incertidumbre para apoyar una planificación más eficiente.

En el contexto de Tecnocarga S.R.L., pronosticar la demanda futura de mantenimientos correctivos permite anticipar la cantidad de intervenciones esperadas y planificar los recursos técnicos y materiales necesarios para atenderlas.

Los métodos de pronóstico se clasifican en cualitativos, basados en juicios y experiencia, y cuantitativos, basados en datos históricos numéricos. Dentro de los métodos cuantitativos, los modelos de series de tiempo predicen los valores futuros de una variable únicamente a partir de sus valores pasados, considerando que cualquier influencia externa ya está reflejada en el comportamiento histórico. Para evaluar la precisión de estos modelos y seleccionar el más adecuado, se utilizan medidas de error como la Desviación Media Absoluta (MAD), el Error Cuadrático Medio (MSE) y el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE). El modelo con menores valores en estas medidas es el que mejor se ajusta a los datos.

En el presente trabajo se aplicará el método de descomposición multiplicativa, que descompone la serie de tiempo en sus componentes fundamentales: tendencia (T), estacionalidad (S), ciclo (C) y componente aleatorio (R), expresándolos de forma multiplicativa como $Y = T \times S \times C \times R$. Su aplicación permite identificar patrones estacionales en la demanda de reparaciones y proyectar su comportamiento futuro incorporando dichos patrones, lo que aporta mayor precisión al pronóstico en comparación con métodos que no consideran la estacionalidad.

Aplicación

1. Simulación:

En la gestión operativa de empresas que trabajan con maquinaria pesada, uno de los grandes desafíos consiste en anticipar el comportamiento de los equipos y estimar con suficiente precisión los recursos que demandará su mantenimiento. Estas decisiones no pueden tomarse sobre la base de un único dato histórico ni de una suposición simplificada: los sistemas reales presentan variabilidad, incertidumbre y comportamientos que cambian según las condiciones de operación.

A continuación se describe la aplicación de la simulación Monte Carlo al sistema de servicios de mantenimiento de la empresa, con el propósito de estimar la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de intervención (mantenimiento preventivo o reparación correctiva) en función del nivel de uso registrado en los equipos, medido en horas de operación (horómetro).

2. Objetivo de la simulación

El objetivo central de la simulación es responder la siguiente pregunta: dado el comportamiento histórico del horómetro de la maquinaria y la relación observada entre el nivel de uso y el tipo de servicio requerido, ¿qué proporción de los servicios futuros corresponden a mantenimiento preventivo y cuántos derivarán en reparaciones correctivas?

Esta pregunta tiene consecuencias directas sobre la planificación presupuestaria, la disponibilidad de los equipos y la organización del área técnica, dado que el costo de una reparación correctiva es más

del doble que el de un mantenimiento preventivo. Conocer con anticipación la distribución esperada de ambos tipos de servicio permite tomar decisiones más fundamentadas.

3. Datos e insumos utilizados

La simulación se construyó a partir de un conjunto de datos históricos de la empresa Tecnocarga, contenidos en el archivo PE245. Dicha base registra el valor del horómetro al momento de cada intervención, lo que permitió construir una distribución de frecuencias segmentando los equipos en rangos de 1.000 horas, desde 0 hasta 10.000 horas de operación.

A partir de esa distribución se determinó, para cada rango del horómetro, la probabilidad histórica de que la intervención fuera un mantenimiento preventivo o derivara en una reparación. Estas proporciones se tradujeron en intervalos de números aleatorios que, durante la simulación, determinan el resultado de cada iteración, las cuales las definimos como el resultado de cada escenario individual dados por la simulación a partir de los números aleatorios generados.

Los costos unitarios considerados para cada tipo de servicio son los siguientes:

- Precio por hora de mantenimiento: el costo por cada hora incurrida en un servicio es de \$94.300
- Mantenimiento preventivo: \$ 282.900 (La duración promedio de este servicio es de 3 horas)
- Reparación correctiva: \$ 660.100 (La duración promedio para este servicio es de 7 horas)
- Costo de reparaciones:
 - Preventivas = $P \times T = \$94300 \times 3$ horas promedio de duración = \$282.900
 - Reparaciones = $P \times T = \$94300 \times 7$ horas promedio de duración = \$660.100, donde P = Precio base del servicio y T = Tiempo promedio de servicio

4. Descripción del programa de simulación

El programa fue desarrollado en el entorno Google Colab, utilizando el lenguaje Python, mediante la integración de herramientas de Inteligencia Artificial como Gemini y Claude que, luego del planteamiento matemático formulado por el equipo de investigación, fueron de utilidad para la generación de los códigos para la programación de la simulación.

El funcionamiento de la simulación puede describirse en cuatro etapas secuenciales:

a) Construcción de la distribución histórica

A partir del archivo de datos, el programa calcula cuántas veces aparece cada rango de horómetro en el historial de intervenciones. Con esa información construye la distribución de frecuencias

acumulada, que es la que determina qué número aleatorio le corresponde a cada rango. Si un rango representa el 18% de los eventos históricos, le serán asignados 18 de los 100 números posibles.

Tabla N°1: Distribución de frecuencias de horometro

Intervalos Horometro	Preventivos (Cant)	Reparaciones (Cant)	Frecuencia total	F acum	Intervalo horometro
0 - 1,000	18	0	8.96%	8.96%	1 A 9
1,001 - 2,000	14	0	6.97%	15.92%	10 A 16
2,001 - 3,000	5	0	2.49%	18.41%	17 A 19
3,001 - 4,000	0	3	1.49%	19.90%	19 A 20
4,001 - 5,000	10	18	13.93%	33.83%	21 A 34
5,001 - 6,000	27	6	16.42%	50.25%	35 A 50
6,001 - 7,000	9	13	10.95%	61.19%	51 A 61
7,001 - 8,000	0	10	4.98%	66.17%	62 A 66
8,001 - 9,000	27	20	23.38%	89.55%	67 A 90
9,001 - 10,000	6	15	10.45%	100.00%	91 A 100

Fuente: Elaboración propia

b) Asignación de tipo de servicio por rango

Para cada rango de horómetro, el programa define un umbral que indica cuántos de los 100 números aleatorios disponibles corresponden a un mantenimiento preventivo y cuántos a una reparación. Este umbral se determina a partir de las proporciones históricas observadas dentro de cada rango. Si históricamente el 65% de las intervenciones en el rango 3.001-4.000 horas fueron preventivas, los números del 1 al 65 generarán un mantenimiento y los del 66 al 100, una reparación.

Tabla N°2: Distribución de frecuencias mantenimiento preventivo y reparaciones

Intervalos Horometro	Preventivos (Cant)	Reparaciones (Cant)	distribución de probabilidad	distribución de probabilidad reparaciones	Intervalo mantenimiento	Intervalo reparaciones
0 - 1,000	18	0	18.00%	0.00%	1 a 18	0
1,001 - 2,000	14	0	14.00%	0.00%	1 a 14	0
2,001 - 3,000	5	0	5.00%	0.00%	1 a 5	0
3,001 - 4,000	0	3	3.00%	3.00%	0	1 a 3
4,001 - 5,000	10	18	35.71%	64.29%	1 a 36	37 a 100
5,001 - 6,000	27	6	81.82%	18.18%	1 a 82	83 a 100
6,001 - 7,000	9	13	40.91%	59.09%	1 a 41	42 a 100
7,001 - 8,000	0	10	9.09%	90.91%	0	1 a 10
8,001 - 9,000	27	20	57.45%	42.55%	1 a 57	58 a 100
9,001 - 10,000	6	15	18.18%	71.82%	1 a 18	19 a 100

Fuente: Elaboración propia

c) Generación de iteraciones

El programa genera 1.000 pares de números aleatorios: el primero determina el rango de horómetro al que pertenece el evento, y el segundo determina si ese evento es mantenimiento o reparación. Cada par de números constituye una iteración, que representa un evento de servicio simulado. Al repetir este proceso 1.000 veces, se obtiene una muestra estadísticamente representativa del comportamiento del sistema.

d) Consolidación y análisis de resultados

Finalizada la generación de iteraciones, el programa consolida todos los registros en una tabla de datos y calcula los indicadores clave: cantidad de eventos de cada tipo, proporción sobre el total y costos acumulados. Estos valores constituyen la estimación estadística del comportamiento esperado del sistema en condiciones similares a las históricas, determinando la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de servicio de mantenimiento esperado.

5. Resultados de la simulación

Tras ejecutar las 1.000 iteraciones, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a la distribución de tipos de servicio:

Tabla N°3: Probabilidad estimada de servicio

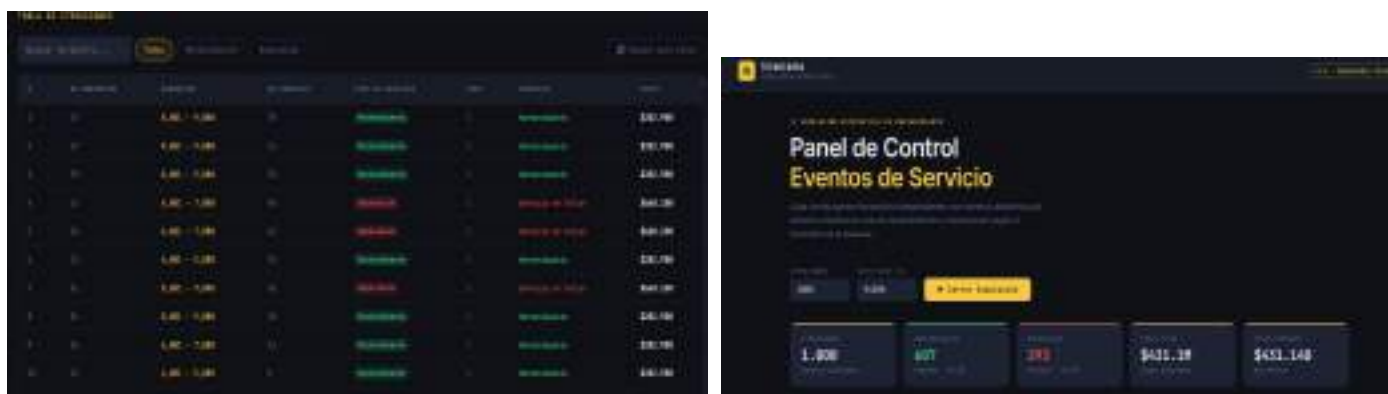
<i>Tipo de servicio</i>	<i>Cantidad de eventos</i>	<i>Probabilidad estimada</i>
<i>Mantenimiento preventivo</i>	<i>607 / 1.000</i>	<i>60,70 %</i>
<i>Reparación correctiva</i>	<i>393 / 1.000</i>	<i>39,30 %</i>
<i>Total</i>	<i>1.000</i>	<i>100,00 %</i>

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que, bajo las condiciones históricas observadas, aproximadamente 6 de cada 10 intervenciones corresponden a mantenimiento preventivo, mientras que las 4 restantes derivan en reparaciones correctivas. Esta proporción es coherente con un sistema donde los equipos reciben atención periódica pero también presentan fallas no programadas con una frecuencia relevante.

Además se generó una web interactiva mediante Netlify Drop, la cual en base a los códigos de programación utilizados nos permite obtener de manera resumida los datos de la simulación generada, con la posibilidad de manipular la cantidad de interacciones y el costo base del servicio, como así también la visualización de cada resultado de cada evento simulado.

Imagen N°1: Visualización de los resultados de la simulación mediante la web generada.



Fuente: Elaboración propia

6. Interpretación y utilidad para la gestión

La Simulación Monte Carlo no predice lo que ocurrirá en el próximo período con certeza absoluta. Lo que ofrece es una estimación probabilística del comportamiento más probable del sistema, basada en su historia operativa. En ese sentido, sus resultados deben interpretarse como rangos de referencia para la toma de decisiones, no como valores exactos.

En el contexto de la gestión de mantenimiento, este análisis aporta valor concreto en al menos tres dimensiones:

- **Presupuestación:** permite estimar con base estadística cuánto se destinará a mantenimiento y cuánto a reparaciones, y construir escenarios optimista, esperado y pesimista.
- **Planificación de recursos:** facilita dimensionar el equipo técnico, el stock de repuestos y la disponibilidad de herramientas según la demanda esperada de cada tipo de intervención.
- **Análisis de impacto:** permite cuantificar cuánto mejora la situación económica si se logra reducir la proporción de reparaciones en un determinado porcentaje, fundamentando así la inversión en mantenimiento preventivo.

Pronóstico

Paso 1: Recolección y análisis de datos

Para llevar a cabo el pronóstico de la demanda de cada tipo de mantenimiento del equipo PE245 de Tecnocarga S.R.L., se trabajó con la base de datos histórica de órdenes de trabajo proporcionada por la empresa. Esta base contiene registros de todas las intervenciones realizadas sobre el equipo identificado como "PE245", incluyendo la fecha de cada orden y el tipo de servicio ejecutado (reparación o mantenimiento preventivo).

Los registros fueron agrupados por cuatrimestre obteniendo la cantidad total de reparaciones ocurridas en cada período. Esta forma de agrupamiento fue seleccionada luego de una entrevista con el gerente de la empresa, el cual comentó que los análisis se realizan con esta frecuencia de periodos por practicidad, destacando como ejemplo su utilidad para identificar la época de zafra. El resultado de este proceso fue una serie de tiempo compuesta por 25 períodos cuatrimestrales, comprendidos entre el tercer cuatrimestre de 2017 y el tercer cuatrimestre de 2025, tal como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla N°4: Cantidad de mantenimientos por cuatrimestre – PE245

Año - Cuatrimestre	Cantidad Total de reparaciones
2017 - C3	12
2018 - C1	6
2018 - C2	8
2018 - C3	6
2019 - C1	1
2019 - C2	5
2019 - C3	1
2020 - C1	23
2020 - C2	22
2020 - C3	15
2021 - C1	1
2021 - C2	13
2021 - C3	13
2022 - C1	1
2022 - C2	1
2022 - C3	6
2023 - C1	8
2023 - C2	36
2023 - C3	1
2024 - C1	1
2024 - C2	1
2024 - C3	3
2025 - C1	2
2025 - C2	7
2025 - C3	13

Fuente: elaboración propia en base a datos de Tecnocarga S.R.L.

Una vez construida la serie, se procedió a graficar para analizar visualmente su comportamiento antes de seleccionar el método de pronóstico más apropiado. El Gráfico N°1 muestra la evolución de la cantidad de mantenimientos a lo largo de los 25 períodos relevados.

Gráfico N°1: Serie de tiempo – Comportamiento de mantenimiento cuatrimestral PE245



Fuente: elaboración propia.

Del análisis visual de la serie se desprenden las siguientes observaciones. En primer lugar, la serie presenta una tendencia general levemente decreciente a lo largo del tiempo, lo que sugiere que la cantidad de mantenimientos ha tendido a reducirse en el período analizado. En segundo lugar, se identifican fluctuaciones importantes entre cuatrimestres, con picos pronunciados en 2020-C1, 2021-C2 y 2023-C2, alternados con períodos de baja actividad. Esta variabilidad irregular dificulta la identificación de un patrón estacional perfectamente definido, aunque se observan ciertos comportamientos recurrentes según el cuatrimestre del año.

Paso 2: Selección y aplicación de los métodos de pronóstico

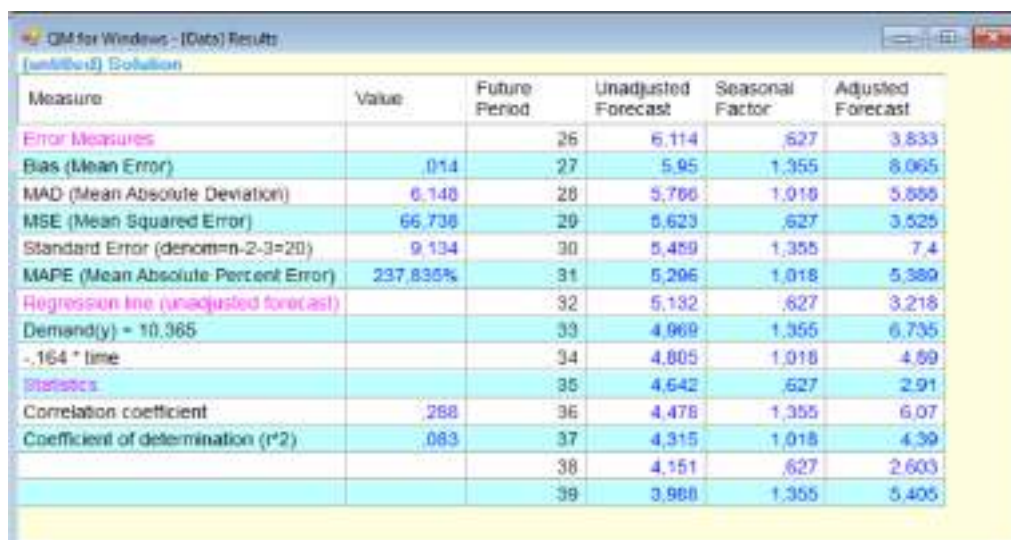
Con el objetivo de seleccionar el modelo más preciso para pronosticar la demanda futura de reparaciones, se decidió aplicar y comparar dos métodos de series de tiempo disponibles en el software QM: descomposición multiplicativa y suavizamiento exponencial. La elección de estos dos métodos responde a las características observadas en la serie: la descomposición multiplicativa es adecuada cuando se sospecha la presencia de componentes estacionales (sospecha fundamentada por el relato del gerente de Tecnocarga S.R.L. que sostiene que su actividad se incrementa en los meses de julio y agosto generalmente debido a las épocas de zafra que demandan el uso de las maquinarias ofrecidas por la empresa), mientras que el suavizamiento exponencial es apropiado para series con variaciones irregulares donde se desea dar mayor peso a los datos más recientes.

Método 1: Descomposición Multiplicativa

El método de descomposición multiplicativa fue el primero en aplicarse. Este modelo descompone la serie en sus componentes de tendencia, estacionalidad y aleatoriedad, y los combina

de forma multiplicativa para generar el pronóstico. En el software QM se ingresaron los 25 valores cuatrimestrales de la serie y se ejecutó el módulo de Forecasting con el método de descomposición. Los resultados obtenidos se presentan en la imagen N°1.

Imagen N°2: Resultados del Método de Descomposición Multiplicativa.



Measure	Value	Future Period	Unadjusted Forecast	Seasonal Factor	Adjusted Forecast
Error Measures		26	6,114	,627	3,833
Bias (Mean Error)	,014	27	5,95	1,355	8,065
MAD (Mean Absolute Deviation)	6,148	28	5,766	1,018	5,865
MSE (Mean Squared Error)	66,738	29	5,623	,627	3,525
Standard Error (denom=n-2-3=20)	9,134	30	5,489	1,355	7,4
MAPE (Mean Absolute Percent Error)	237,835%	31	5,206	1,018	5,389
Regression line (unadjusted forecast)		32	5,132	,627	3,218
Demand(y) = 10,365		33	4,969	1,355	6,735
-.164 * time		34	4,805	1,018	4,89
Statistics		35	4,642	,627	2,91
Correlation coefficient	,268	36	4,478	1,355	6,07
Coefficient of determination (r^2)	,083	37	4,315	1,018	4,39
		38	4,151	,627	2,603
		39	3,988	1,355	5,405

Fuente: elaboración propia mediante QM for Windows.

El software calculó la ecuación de regresión lineal que describe la tendencia de la serie: Demand(y) = 10,365 – 0,164 × tiempo. Esta ecuación indica que, en promedio, la cantidad de reparaciones disminuye en 0,164 unidades por cuatrimestre, confirmando la tendencia descendente observada visualmente. Las medidas de error obtenidas para este método fueron: MAD = 6,148 y MAPE = 237,835%. El MAD de 6,148 significa que, en promedio, las estimaciones del modelo se alejan en 6,148 mantenimientos respecto de los valores reales observados. Por su parte, el MAPE refleja un porcentaje promedio de error relativo elevado, lo cual es completamente esperable en series temporales con valores históricos muy bajos (con varios períodos cercanos a cero o uno) y de alta variabilidad, donde una mínima diferencia absoluta genera un error porcentual magnificado.

En lo referente a los pronósticos, el modelo arroja para el período 26 un pronóstico sin ajustar (basado puramente en la tendencia) de 6,114 mantenimientos. Al incorporar el comportamiento estacional mediante el factor correspondiente de 0,627, se obtiene un pronóstico final ajustado de 3,833 mantenimientos para dicho período.

Método 2: Suavizamiento Exponencial

El segundo método aplicado fue el suavizamiento exponencial. En el software QM se ingresó la misma serie de 25 períodos y se ejecutó el módulo de Forecasting con el método de suavizamiento exponencial, dejando que el software determinara el valor óptimo del parámetro alfa. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente imagen.

Imagen N°3: Resultados del Método de Suavizamiento Exponencial.

(untitled) Solution	
Measure	Value
Error Measures	
Bias (Mean Error)	-.452
MAD (Mean Absolute Deviation)	6,875
MSE (Mean Squared Error)	94,864
Standard Error (denom=n-2=23)	10,154
MAPE (Mean Absolute Percent Error)	334,813%
Forecast	
next period	7,816

Fuente: elaboración propia mediante QM for Windows.

Imagen N°4: Resultados de los distintos alfas

(untitled) Solution					
Alpha	Bias	MAD	MSE	Standard error	MAPE
.28	-.606	7,246	94,462	10,151	3,486
.29	-.666	7,232	94,963	10,178	3,485
.30	-.638	7,218	95,46	10,205	3,485
.31	-.611	7,203	95,952	10,231	3,484
.32	-.585	7,194	96,44	10,257	3,484
.33	-.561	7,189	96,924	10,283	3,485
.34	-.537	7,183	97,403	10,308	3,486
.35	-.514	7,176	97,878	10,333	3,487
.36	-.492	7,169	98,35	10,358	3,487
.37	-.471	7,161	98,817	10,383	3,488
.38	-.451	7,156	99,281	10,407	3,489
.39	-.431	7,173	99,741	10,431	3,49
.40	-.413	7,18	100,198	10,455	3,491
.41	-.394	7,189	100,652	10,479	3,493
.42	-.377	7,203	101,103	10,502	3,495
.43	-.36	7,216	101,552	10,525	3,497

Fuente: elaboración propia mediante QM for Windows.

La elección de este parámetro (alfa) se fundamenta en un criterio de minimización de todas las iteraciones posibles. Un alfa de 0,37 es el que logra reducir la Desviación Absoluta Media (MAD) a su punto más bajo (7,161). Esto indica que el modelo con este factor de ajuste es el que logra interpretar con mayor precisión el comportamiento real de las roturas del equipo PE245 durante los 25 trimestres analizados, otorgando el mayor grado de confiabilidad matemática al pronóstico resultante para la planificación del próximo período.

Las medidas de error obtenidas para este método fueron: MAD = 6,875 y MAPE = 334,813%. El MAD de 6,875 es considerablemente mayor que el obtenido por la descomposición multiplicativa, lo que significa que el pronóstico del suavizamiento exponencial se aleja en promedio 6,87 mantenimientos del valor real, el MAPE de 334,813% resulta igualmente más elevado, confirmando una menor precisión relativa. Finalmente, el pronóstico puntual que arroja este método para el próximo período operativo es de 7,816 mantenimientos.

Paso 3: Comparación y selección del método

Una vez obtenidos los resultados de ambos métodos, se procedió a compararlos sistemáticamente a través de sus medidas de error, tal como se resume en la Tabla N°2.

Tabla N°5: Comparación de métodos de pronóstico

Medida de Error	Descomposición Multiplicativa	Suavización Exponencial
MAD	6,148	6,875
Pronóstico próximo período	3,83	7,816

Fuente: elaboración propia.

La comparación realizada muestra que el método de descomposición multiplicativa presenta un mejor desempeño que el suavizamiento exponencial, al obtener un menor error absoluto medio (MAD= 6,148 frente a 6,875). Esto indica que, en promedio, sus pronósticos se aproximan más a los valores reales de la serie. Además, este método considera el comportamiento estacional de los datos,

permitiendo representar de manera más adecuada las variaciones observadas en la demanda. En consecuencia, se selecciona la descomposición multiplicativa como el método más conveniente para realizar el pronóstico del próximo período, estimando una demanda de 3,83 mantenimientos.

Paso 4: Pronóstico final e interpretación

El pronóstico obtenido mediante el método de descomposición multiplicativa para los próximos períodos es de aproximadamente 4 mantenimientos para el primer cuatrimestre (según la probabilidad de ocurrencia obtenida en la simulación, representa aproximadamente 2 mantenimientos preventivos y 1 correctivo). Para el segundo cuatrimestre, el cual muestra una mayor estacionalidad, la demanda estimada para cada cada servicio es de 5 mantenimientos preventivos y 3 reparaciones. Para el último cuatrimestre del año se estiman 4 mantenimientos y 2 reparaciones.

Tabla N° 6: Resumen de costos esperados.

PROYECCIÓN POR CUATRIMESTRE	MANTENIMIENTO	REPARACIÓN	COSTOS CUATRIMESTRALES POR MANTENIMIENTO	COSTOS CUATRIMESTRALES POR REPARACIONES	COSTOS TOTALES
C1	2.32	1.51	\$657.688.75	\$993.575.92	\$1.651.264.67
C2	4.90	3.17	\$1.385.782.82	\$2.803.513.75	\$3.479.296.57
C3	3.58	2.31	\$1.011.632.57	\$1.927.876.88	\$2.939.509.45

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 6 se pueden observar los costos esperados por cuatrimestres por cada tipo de servicio, surgiendo de $P \times Q \times T$, donde P=Precio base del servicio, Q= cantidad de servicios de cada tipo a realizar y T= Tiempo promedio correspondiente a cada servicio.

Tabla N° 7: Información relevante

PROBABILIDAD MANTENIMIENTO	60.70%
PROBABILIDAD REPARACION	39.30%
COSTO BASE POR SERVICIO	\$94,300
HORAS PROM MANT PREV	3
HORAS PROM MANT CORRECTIVO	7

Fuente: Elaboración propia

Estos valores pronosticados surgen de ajustar el pronóstico de tendencia mediante el factor estacional correspondiente, incorporando tanto la evolución temporal como las variaciones estacionales observadas en la serie histórica.

El resultado es consistente con el comportamiento de los datos, los cuales presentan una elevada variabilidad entre períodos. Si bien el modelo logra captar el componente estacional de la demanda, el valor del MAPE obtenido indica que la capacidad predictiva se ve afectada por la presencia de picos y caídas pronunciadas en la serie.

Desde el punto de vista de la gestión, este pronóstico constituye una herramienta útil para la planificación operativa, ya que permite estimar la demanda esperada del próximo período y anticipar la asignación de recursos, la disponibilidad de personal, la programación de actividades y la gestión de los insumos necesarios. Asimismo, los resultados sugieren que, dada la irregularidad de la serie, los pronósticos deben complementarse con un seguimiento continuo de la demanda y una actualización periódica del modelo.

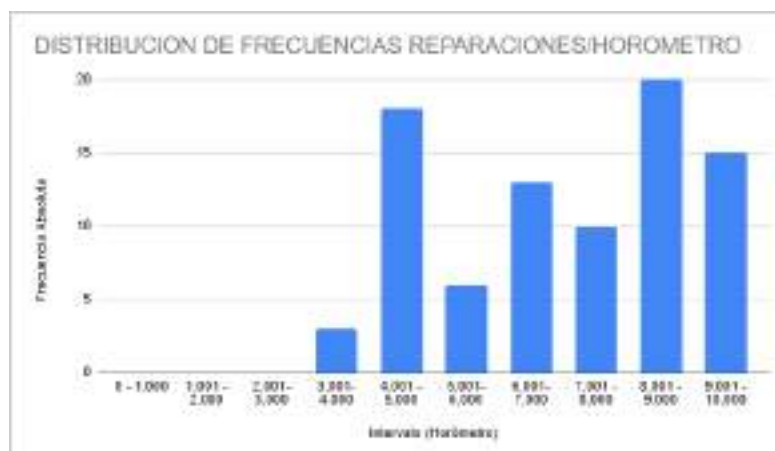
Recomendaciones específicas

A la luz de los resultados cuantitativos obtenidos mediante los modelos de pronóstico por descomposición multiplicativa y la simulación estocástica de Monte Carlo, se recomiendan las siguientes acciones estratégicas y operativas para la gerencia de TECNOCARGA SRL:

- **Diseño de un Presupuesto Operativo Base Basado en Escenarios Simulados:** Se recomienda abandonar la presupuestación basada en promedios históricos simple, utilizando la distribución probabilística de la simulación (60,7% preventivos y 39,3% correctivos) junto con el costo de cada servicio (\$282.900 y \$660.100 respectivamente), la empresa debe estructurar un presupuesto base cuatrimestral estocástico, el cual en base al trabajo es alrededor de \$1.600.000 para el primer cuatrimestre, \$3.500.000 para el segundo y para el tercer cuatrimestre de \$2.600.000. Esto permitirá asignar partidas específicas para absorber los costos fijos de mantenimiento programado y constituir un fondo de contingencia preciso para las reparaciones de emergencia del equipo PE245, disminuyendo el impacto de la incertidumbre financiera.
- **Planificación Flexible de la Capacidad en Época de Zafra:** Dado que el modelo de descomposición multiplicativa seleccionó la estacionalidad como una variable crítica (captando las fluctuaciones de alta demanda informadas por la gerencia), se recomienda calendarizar la asignación del personal técnico y los turnos del taller en función de estos ciclos operativos. Específicamente para el próximo cuatrimestre, donde el pronóstico matemático estima una demanda de aproximadamente 4 intervenciones para este activo crítico, el taller debe asegurar la disponibilidad de mano de obra calificada justo antes del inicio de los picos estacionales de la zafra, evitando cuellos de botella y demoras en el servicio.
- **Control en rangos críticos de Horometro:** La distribución histórica muestra que los equipos no registran intervenciones correctivas en las primeras 3.000 horas de uso, y que más de la mitad de los eventos se concentran a partir de las 7.001 horas, siendo el rango 8.001–9.000 el de mayor frecuencia con un 23,53% del total de reparaciones. En función de esto, se recomienda intensificar el seguimiento preventivo de los equipos que se encuentren dentro de los rangos de mayor densidad de eventos (6.001 horas en adelante), priorizando su atención antes de que las intervenciones deriven en reparaciones correctivas de mayor costo.

Para que esta política sea efectiva, resulta indispensable que el horómetro de cada máquina sea registrado de forma precisa y actualizada en el sistema ERP, ya que sin esa información confiable no es posible identificar oportunamente qué equipos requieren atención ni planificar los recursos necesarios para atenderlos.

Gráfico N° 2: distribución de probabilidades de las reparaciones según su rango de horometro.



Fuente: Elaboración propia

- **Sistematización y Actualización Dinámica de las Bases de Datos (ERP):** Para reducir los elevados márgenes de error relativo (MAPE) observados en las series de tiempo producto de la variabilidad y la falta de registros continuos, se recomienda estandarizar el proceso de carga de datos en el sistema ERP de la empresa. Es fundamental que el personal registre con exactitud el valor del horómetro, la duración exacta de la parada en el taller y el desglose de los repuestos utilizados en cada Orden de Trabajo (OT). Esto alimentará los scripts de Python desarrollados en este trabajo, permitiendo actualizaciones cuatrimestrales automáticas de la simulación y mejorando de manera progresiva la capacidad predictiva de los modelos matemáticos de la organización.

Recomendaciones generales

- **Implementación de Indicadores de Gestión del Mantenimiento (KPIs):** Se recomienda establecer indicadores de desempeño, tales como el tiempo medio entre fallas, el tiempo medio de reparación y la disponibilidad operativa de los equipos, con el objetivo de monitorear la eficiencia del área de mantenimiento y detectar desvíos que permitan implementar acciones de mejora. La utilización de estos indicadores contribuirá a fortalecer la toma de decisiones basada en información objetiva.
- **Gestión Estratégica del Stock de Repuestos Críticos:** Se recomienda identificar los repuestos de mayor criticidad asociados al equipo PE245 y mantener niveles mínimos de inventario que

permitan responder oportunamente ante fallas imprevistas. Esta medida contribuirá a reducir los tiempos de inactividad de los equipos y a mejorar la continuidad operativa del servicio brindado por la empresa.

- **Trazabilidad de Maquinarias por Cliente:** Se recomienda sistematizar la información referente a la asignación de las maquinarias a cada cliente mediante el sistema ERP de la empresa. Esto permitirá contar con una mayor trazabilidad de los equipos, optimizar la planificación de las intervenciones y fortalecer la capacidad de respuesta ante eventuales fallas, favoreciendo una gestión más eficiente de los recursos y una mejor atención a los requerimientos de los clientes.

Conclusiones

El presente trabajo se propuso aplicar herramientas de pronóstico y simulación para analizar el comportamiento del mantenimiento del equipo PE245 de Tecnocarga S.R.L. y generar información que apoye la planificación operativa y la toma de decisiones. A partir de los registros históricos de órdenes de trabajo y de los valores de horómetro, se logró transformar un conjunto de datos dispersos en evidencia cuantitativa útil para responder a la pregunta general de investigación: las herramientas de pronóstico y simulación contribuyen a la planificación de los recursos del área de mantenimiento al reducir la incertidumbre, anticipar la demanda esperada y dimensionar con base estadística el presupuesto de cada cuatrimestre.

En relación con el primer objetivo específico, la comparación entre la descomposición multiplicativa y el suavizamiento exponencial mostró que el primer método es el más adecuado para esta serie, al obtener un menor error absoluto medio (MAD de 6,148 frente a 6,875) y captar el componente estacional asociado a la época de zafra. El modelo estimó una demanda de aproximadamente 4 mantenimientos correctivos para el próximo cuatrimestre. No obstante, el elevado valor del MAPE (237,835%) confirma que la alta variabilidad de la serie (con períodos próximos a cero y picos pronunciados) limita la precisión puntual del pronóstico, por lo que sus resultados deben interpretarse como una referencia para la planificación y no como un valor exacto.

Respecto del segundo objetivo, la simulación Monte Carlo de 1.000 iteraciones permitió estimar que el 60,7% de las intervenciones corresponde a mantenimiento preventivo y el 39,3% a reparaciones correctivas. Esta distribución, combinada con los costos unitarios calculados (\$282.900 el preventivo y \$660.100 el correctivo), cuantifica el principal argumento económico del trabajo: dado que una reparación cuesta más del doble que un mantenimiento programado, toda reducción en la proporción de correctivos genera un ahorro significativo y justifica sostener una política activa de mantenimiento preventivo.

En cuanto al tercer objetivo, la integración de ambos resultados habilita el diseño de un presupuesto cuatrimestral estocástico, construido sobre escenarios optimista, esperado y pesimista, en lugar de promedios históricos simples. De este modo, la empresa puede asignar partidas diferenciadas para el mantenimiento programado y constituir un fondo de contingencia ajustado para las reparaciones de emergencia del equipo PE245, disminuyendo el impacto de la incertidumbre financiera.

En síntesis, el estudio demuestra que la incorporación de modelos cuantitativos permite a Tecnocarga S.R.L. avanzar desde una administración reactiva hacia una gestión proactiva y fundamentada en datos. La principal limitación detectada (la calidad y continuidad de los registros) se convierte a la vez en la principal oportunidad de mejora: estandarizar la carga de datos en el sistema ERP y actualizar periódicamente los modelos elevará progresivamente su capacidad predictiva. Se recomienda, por tanto, institucionalizar estas herramientas como práctica habitual del área y complementarlas con un seguimiento continuo de los indicadores de gestión del mantenimiento.

Referencias

Render, B., Stair, R. M., Hanna, M. E., & Hale, T. S. (2016). *Métodos cuantitativos para los negocios* (12.ª ed.). Pearson Educación.

Apéndice

Preguntas de la entrevista realizada al Gerente General del TECNOCARGA SRL

- ¿Cuáles son las fallas más recurrentes que han identificado por “intuición” o experiencia?
- Cuando ocurre una parada no programada ¿Cuánto tiempo promedio pasa desde que la máquina falla hasta que vuelve a estar operativa?
- ¿Cuál es el costo promedio de una hora de parada de máquina?
- ¿Cuántas horas hombre totales tiene disponible el taller por semana?
- ¿Existen limitaciones críticas de espacio físico en el taller o de herramientas especializadas que actúen como cuellos de botella?
- ¿Tienen registros históricos de más de un año?
- ¿Cómo registran actualmente el uso de las máquinas?
- ¿Existen factores externos que no estén en la base de datos para que influyan en la demanda de reparaciones?
- ¿Qué criterios usan actualmente para decidir si una pieza se repara o se reemplaza por una nueva?
- ¿Tienen un presupuesto mensual o semanal asignado para el área de mantenimiento que debamos considerar como una restricción económica?
- ¿Podrían categorizar sus máquinas por “rango de horas de uso” o por “tipo de maquinaria”?

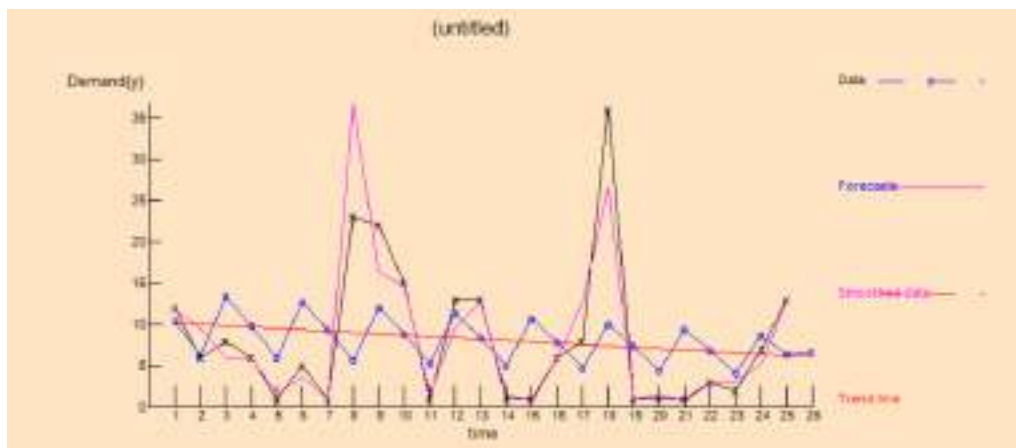
Anexo

Tabla N°8: Base de datos OT245

[illegible]

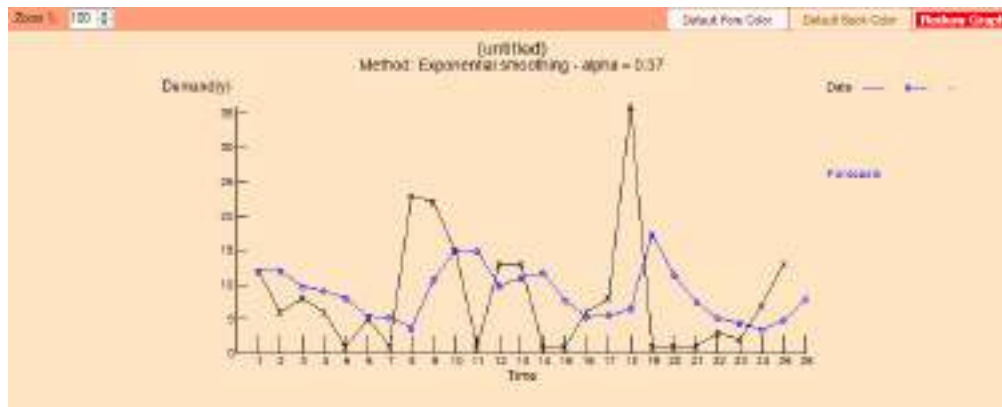
Fuente: gentileza de la empresa

Gráfico N°3: Pronóstico de mantenimiento por método de descomposición multiplicativa.



Fuente: Elaboración propia mediante QM for Windows.

Gráfico N°3: Pronóstico de mantenimiento por método de suavizamiento exponencial.



Fuente: Elaboración propia mediante QM for Windows.

Imagen N°5: Maquinaria pesada de Tecnocarga S.R.L. en operación en campo.



Fuente: gentileza de Tecnocarga S.R.L.

Imagen N°6: Equipo de Tecnocarga S.R.L. durante tareas de campo en época de actividad productiva.

Universidad Nacional de Tucumán
Facultad de Ciencias Económicas
Instituto de Administración

**XIX Muestra Académica de Trabajos de Investigación
de la Licenciatura en Administración**

