



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Diseño de un Sistema de Abastecimiento de repuestos basado en algoritmo de pronóstico de fallas y sistema de revisión continua para cumplir a tiempo con el servicio postventa en una PYME comercial

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Industrial

AUTOR(ES)

Retuerto Espinoza, Bessi Virginia (0000-0001-6597-5325)

Ricra Clemente, Alexander Virginio (0000-0001-5125-659X)

ASESOR

León Chavarri, Claudia Carolina (0000-0002-2919-8351)

Lima, 17 de octubre de 2021

DEDICATORIA

A nuestros padres con cariño y afecto.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por su apoyo constante durante nuestra formación profesional.

A nuestros asesores por su paciencia y aporte en cada etapa del proyecto.

Al programa Beca 18 por darnos la oportunidad de cumplir nuestros sueños.

RESUMEN

Generalmente, cuando una máquina falla y no es reparada en un corto tiempo, perjudica económicamente a la empresa, ya que el equipo deja de producir durante ese tiempo. Esta demora sucede porque la empresa encargada del servicio postventa no logra atender de forma inmediata, ya que no cuenta con los repuestos necesarios para lograr reparar el equipo. Es por ello, que el proveedor de las piezas de repuestos debe tener disponible los componentes para así atender a sus clientes en el menor tiempo posible y evitar de esta forma el pago de penalidades por incumplimiento del servicio. En ese sentido, con la finalidad de que estos proveedores puedan abastecer a sus clientes oportunamente, es importante que analicen el patrón de la demanda de los ítems, ya que estas presentan demanda intermitente. Si bien es cierto, existe una amplia literatura sobre modelos de pronósticos para piezas de repuestos; sin embargo, estas presentan deficiencias ya que se basan en la venta histórica y no utilizan como datos de entrada el ciclo de vida del equipo. De esta forma, en el presente trabajo de investigación se analizó en el primer capítulo la fundamentación teórica, en el cual se discute el estado de arte. En el segundo capítulo se presenta el diagnóstico realizado al caso de estudio. En el tercer capítulo se presenta la propuesta de solución a nivel macro y micro. Finalmente, en el cuarto capítulo se analizó la validación, así como la viabilidad económica de la propuesta.

Palabras clave: Pronóstico de piezas de repuesto, Servicio Postventa, Pronóstico de fallas, ciclo de vida, demanda intermitente

Design of a System of Supply of spare parts based on algorithm of forecast of failures and system of continuous revision to fulfill in time with the after-sales service in a commercial PYME.

ABSTRACT

Generally, when a machine fails and is not repaired in a short time, it hurts the company financially, since the equipment stops producing during that time. This delay happens because the company in charge of the after-sales service fails to attend immediately, since it doesn't have the necessary spare parts to repair the equipment. That is why the supplier of spare parts must have the components available to serve their customers in the shortest possible time and thus avoid paying penalties for breach of service. In that sense, for these suppliers to supply their customers in a timely manner, it is important that they analyze the pattern of demand for the items, since they present intermittent demand. While it is true, there is extensive literature on forecast models for spare parts; However, these have deficiencies because they are based on historical sales and don't the equipment life cycle as input data. In this way, in the present research work the theoretical foundation was analyzed in the first chapter, in which the state of art is discussed. In the second chapter the diagnosis made to the case study is presented. In the third chapter the proposal for a macro and micro level solution is presented. Finally, in the fourth chapter the validation was analyzed, as well as the economic viability of the proposal.

Keywords: Spare Parts Forecast, After Sales Service, Failure Forecast, Life Cycle, Intermittent Demand

TABLA DE CONTENIDOS

1.	CAPITULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEORICA	11
1.1.	ENTORNO DE LA INDUSTRIA.....	11
1.1.1.	Pymes del sector comercio	11
1.1.2.	Importaciones	12
1.2.	MARCO TEÓRICO	13
1.2.1.	Logística	13
1.2.2.	Cadena de suministro	14
1.2.3.	Demanda.....	14
1.2.4.	Pronóstico	17
1.2.5.	Ciclos de vida del producto	20
1.2.6.	Información de base instalada de máquinas	21
1.2.7.	Definiciones empleadas en el mantenimiento	23
1.2.8.	Inventarios	27
1.2.9.	Sistema de Revisión de Inventario	29
1.3.	ESTADO DEL ARTE	30
1.3.1.	Limitaciones	34
1.3.2.	Pasos de la Metodología.....	34
1.4.	CASOS DE ÉXITO	35
1.4.1.	Metodología para el control y la gestión de inventarios en una empresa minorista de electrodomésticos	35
1.4.2.	Metodología para la previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo en una industria de sistemas de refrigeración.....	36
1.4.3.	Pronóstico de la demanda de piezas de repuesto de automóviles bajo la política de mantenimiento preventivo	38
1.4.4.	Pronóstico con el uso de información de base instalada de piezas de repuesto en una empresa de servicio logístico.....	39
1.4.5.	Modelo de pronóstico con serie de tiempo para predecir las fallas de repuesto de cajeros automáticos	40
2.	CAPITULO 2: DIAGNÓSTICO	42

2.1.	CASO DE ESTUDIO.....	42
2.1.1.	Presentación de la empresa.....	42
2.1.2.	Proceso de compras de la empresa	45
2.2.	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	47
2.2.1.	Problema: Incumplimiento del servicio postventa	47
2.3.	IMPACTO ECONÓMICO DEL PROBLEMA: INCUMPLIMIENTO DEL SERVICIO POSTVENTA.....	48
2.4.	ANÁLISIS DE LAS CAUSAS	49
2.4.1.	Causas del problema.....	49
2.4.2.	Vinculación de problemas y consecuencias	54
2.5.	HIPÓTESIS.....	55
3.	CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA.....	56
3.1.	DISEÑO DEL MODELO.....	56
3.2.	OBJETIVOS.....	59
3.2.1.	Objetivo general	59
3.2.2.	Objetivos específicos	59
3.3.	INDICADORES	60
3.4.	DISEÑO DE LA PROPUESTA	61
3.4.1.	Clasificación de los equipos vendidos.....	61
3.4.2.	Análisis de la criticidad de los repuestos.....	61
3.4.3.	Pronóstico de la demanda.....	67
3.4.4.	Determinación del punto reposición.....	70
3.5.	CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN	70
4.	CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA	71
4.1.	VALIDACIÓN.....	71
4.1.1.	Tipo de validación	72
4.1.2.	Descripción del proceso.....	72
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
4.2.1.	Presentación de resultados.....	72
4.2.2.	Indicadores.....	86

4.3.	PROCESOS ADICIONALES TRAS LA PROPUESTA DE MEJORA	87
4.4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	88
4.4.1.	Flujo de Fondos	88
4.5.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	92
4.6.	IMPACTO SOCIAL	92
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
6.	REFERENCIAS	97
7.	ANEXOS	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de criterios de criticidad	62
Tabla 2: Escala de corte para los criterios de criticidad	63
Tabla 3: Pesos para la evaluación de las características logísticas	64
Tabla 4: Niveles de criticidad	64
Tabla 5: Repuestos de alta criticidad	73
Tabla 6: Pronóstico de fallas de los equipos	76
Tabla 7: Demanda de las piezas de repuestos de nivel de criticidad 1	77
Tabla 8: Comparación del desempeño de la política de inventario	78
Tabla 9: Política de inventario por pieza de repuesto	78
Tabla 10: Resumen del sistema de inventario	81
Tabla 11: Análisis de la Distribución de probabilidad de la demanda	82
Tabla 12: Resultado de la simulación	84
Tabla 13: Inversión requerida para la implementación del proyecto	88
Tabla 14: Costos de operación	88
Tabla 15: Estructura de flujo de fondos	89
Tabla 16: Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales	90
Tabla 17: Análisis de impacto social del proyecto	92

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Patrones de demanda intermitente.....	17
Ilustración 2: Tipos de Modelos de Pronóstico Cualitativo	19
Ilustración 3: Tipos de Modelos de pronóstico cuantitativo.....	19
Ilustración 4: Etapas del ciclo de vida del producto.....	21
Ilustración 5: Evolución de la base instalada y la demanda de piezas de repuesto.	22
Ilustración 6: Esquema del sistema de revisión continua	30
Ilustración 7: Sistema de Soporte de Pronóstico	32
Ilustración 8: Flujograma del proceso de compras y abastecimiento de inventario.....	46
Ilustración 9: Árbol de problemas	55
Ilustración 10: Árbol de Objetivos	57
Ilustración 11: Modelo de Sistema de Abastecimiento de Repuestos	58
Ilustración 12: Diagrama de clasificación de la criticidad	66
Ilustración 13: clasificación y análisis de criticidad.....	67
Ilustración 14: Análisis de la demanda para el nivel 1	75
Ilustración 15: Escenario de validación.....	83
Ilustración 16: Reporte consolidado de la simulación.....	84
Ilustración 17: Pasos para el cálculo de la cantidad optima de replicas	85
Ilustración 18: Análisis del tamaño de muestra optimo	85

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1: Porcentaje de Actividad Económica Según sector	11
Gráfica 2: Registro de Importación de Bienes de Capital Industrial en 2018	13
Gráfica 3: Representación del MTTF Y MTTR.....	24
Gráfica 4: Curva del ciclo de vida de un producto	26
Gráfica 5: Factores que influyen en el pronóstico de la demanda de repuestos.....	31
Gráfica 6: Representación porcentual del ingreso por ventas del 2018	42
Gráfica 7: Pareto del ingreso por ventas del 2018.....	43
Gráfica 8: Distribución porcentual de equipos vendidos en países de Latinoamérica	44
Gráfica 9: Distribución de productos vendidos en Perú por marca.....	45
Gráfica 10: Distribución porcentual del cumplimiento del servicio Postventa.....	48
Gráfica 11: Impacto económico	48
Gráfica 12: Pareto de primer nivel de motivos.....	49
Gráfica 13: Rotura de Stock	50
Gráfica 14: Pareto de las causas raíz de Rotura de Stock.....	51
Gráfica 15: Venta planificada vs venta real (unidades).....	52
Gráfica 16: Patrón de demanda de repuestos.....	52
Gráfica 17: Punto de Reposición Versus Requerimiento	54

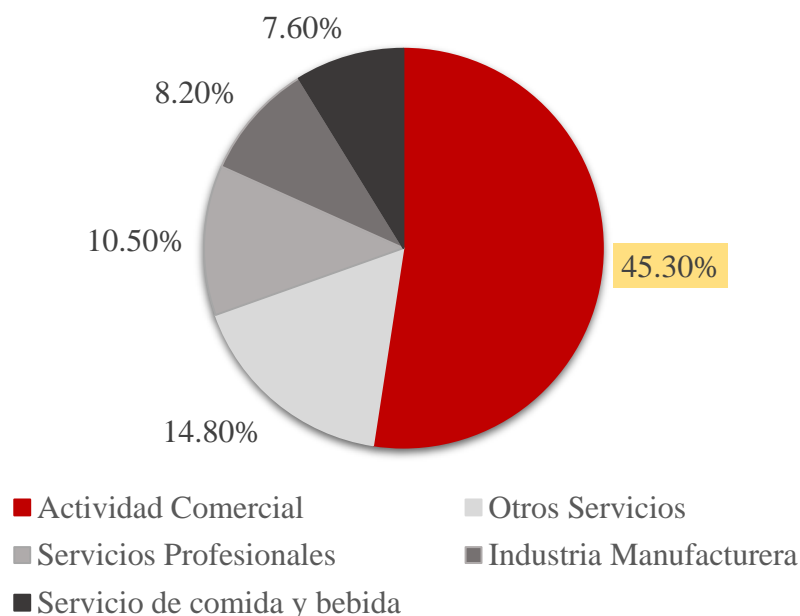
1. CAPITULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEORICA

1.1. Entorno de la industria

1.1.1. Pymes del sector comercio

Según el INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA, en el Perú existen más de dos millones y medio de empresas, de las cuales el 94.7% son pequeñas y medianas empresas (pymes). Pues, estas son uno de los más importantes sectores económicos del país, ya que, según la Cámara de Comercio de Lima, aportan alrededor del 45% del PBI nacional, así como brindan empleo a más de 75% de la Población Económicamente Activa (PEA). Por otro lado, según la Sociedad de Comercio Exterior del Perú, el 25% de las Pymes tienen como actividad principal la importación de productos, de las cuales 27% de las empresas se dedican a la importación de bienes de capital industrial como son las máquinas CNC, máquinas de corte Láser, entre otros. A nivel de actividad económica, del total de Pymes, el 45,30% corresponde a las actividades comerciales tal como se aprecia en la gráfica 1 (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA, 2017).

Gráfica 1: Porcentaje de Actividad Económica Según sector



Fuente: INEI (2018)

Por otro lado, se pudo identificar que “las PYMES enfrentan una serie de obstáculos que limitan su supervivencia y desarrollo a largo plazo” (Mesones & Roca, n.d. p. 71). Esto debido a que estas PYMES enfrentan problemas como el difícil acceso al financiamiento, la baja penetración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), la falta de planificación¹, entre otros; todo ello se “traduce en falta de competitividad y baja productividad” (Andrea et al., 2011, p. 151). Además, al no contar con los recursos suficientes para generar utilidades ni mejorar su productividad, presentan también problemas en sus diversos procesos como en la gestión de sus existencias. De la misma manera, cabe indicar que las PYMES no cuentan con herramientas que les permitan predecir la demanda futura de sus existencias, como métodos de pronósticos. Ante la necesidad de mejorar su estructura organizativa, ellos realizan planificaciones y/o estimaciones basados en su experiencia, “lo que significa, pérdidas físicas, así como retraso en la entrega de pedidos”. (Párraga Condezo, 2011)

1.1.2. Importaciones

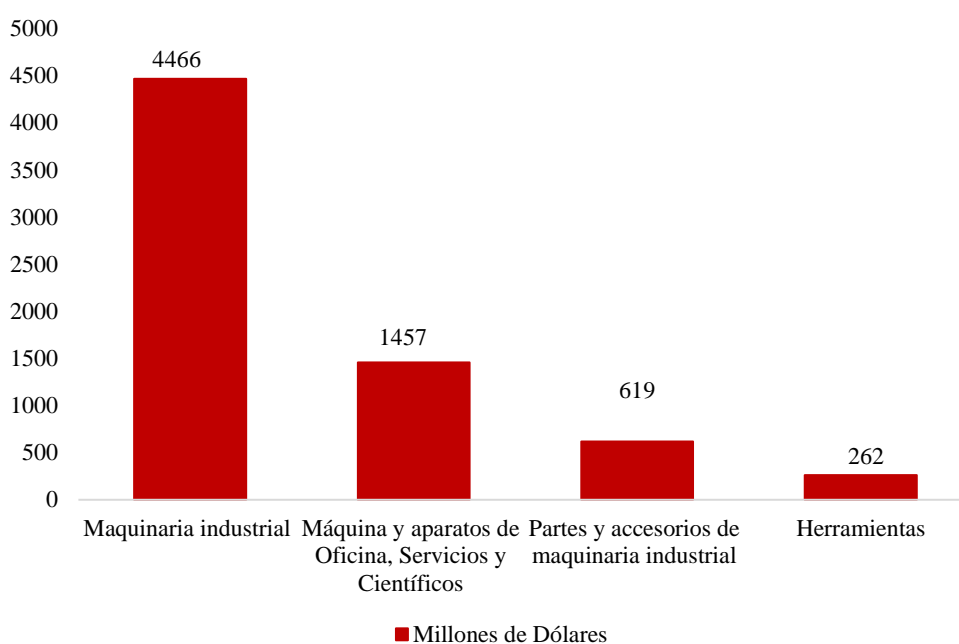
De acuerdo con la Superintendencia Nacional de Aduana y de Administración Tributaria (SUNAT), en el año 2017 el número de importaciones que se registraron superaron los 39,714 millones de dólares en valor CIF, una cifra mayor en 9.8% en comparación con el año 2016. Cabe precisar que este crecimiento se debió al incremento de las importaciones principalmente de materias primas, bienes de capital industrial, así como de bienes de consumo. El crecimiento del volumen de importaciones sobre todo en bienes de capital significa que en nuestro país existe una alta demanda de los mismos.

Por otro lado, se conoce que, según los registros de la SUNAT, en diciembre del 2018 el número de importaciones de los bienes de capital industrial totalizaron los 984 millones de dólares en valor CIF que representó un crecimiento de 0.4%. Los bienes que se importaron en mayor número fueron principalmente partes y accesorios de maquinarias industriales, teléfonos móviles, así como equipos o máquinas automáticas portátiles para uso diverso.

¹ Cámara de Comercio de Lima (2018)

Es preciso indicar que, el número de importaciones de los bienes de capital para la industria se ha incrementado debido a que existe una gran demanda desde el sector industrial que es el eje vertical de la producción y desarrollo del país. Sumado a ello las restricciones también se han incrementado según el tipo de mercadería a fin de garantizar que éstas ingresen en buen estado. En los últimos años se ha registrado un gran volumen de equipos y/o maquinarias ingresantes a la industria, entre las más resaltantes se destaca en la gráfica 2.

Gráfica 2: Registro de Importación de Bienes de Capital Industrial en 2018



Fuente: INEI (2018)

1.2. Marco teórico

1.2.1. Logística

De acuerdo con Ballou (2004), es preciso indicar que la logística es un proceso que forma parte de la cadena de suministros de una organización y que como tal permite realizar la planificación, la ejecución y el control de todo el flujo de los bienes y servicios incluida la información relacionada. En otras palabras, la logística es el proceso mediante el cual se asegura la disponibilidad de los bienes y servicios desde un punto de origen hasta el consumidor final teniendo como objetivo lograr la plena satisfacción de los clientes. Cabe

precisar también que la logística se aplica en diferentes ámbitos, por ejemplo, en el sector servicios, donde el fin último será asegurar la disponibilidad de los materiales e información necesaria para llevar a cabo el servicio de manera eficaz y eficiente.

1.2.2. Cadena de suministro

Ballou (2004) en su libro “Logística: administración de la cadena de suministros” indica que una cadena de suministros es un conjunto de tareas y/o actividades que están relacionadas con todo el proceso de la transformación de los bienes considerándose desde la etapa de adquisición de la materia prima hasta la entrega del bien o producto al usuario final y que además se considera el flujo de información que pueda existir tanto en sentido ascendente como descendente dentro de la cadena de suministros. Dicho de otra manera, una cadena de suministros involucra el proceso logístico y sus partes como son los subprocesos de compra, almacenamiento y distribución.

Otros autores indican que tanto la cadena de suministros como el proceso logístico funcionan de manera conjunta para añadir un valor agregado al flujo de los bienes y servicios y que además éstas se repiten constantemente a lo largo de todo el canal del flujo.

1.2.3. Demanda

Se entiende por demanda como el número de productos (bienes o servicios) que solicita un cliente específico o el mercado para satisfacer una necesidad a un precio determinado.

Pues, la demanda de cualquier producto o servicio está determinado por diversas variables que depende del comportamiento del consumidor que establece la cantidad del producto o servicio solicitado (cantidad demandada).

Las variables que determinan el comportamiento de la demanda son diversas por ejemplo podemos considerar algunas como los hábitos del consumidor, la información que lleva consigo cada producto, el poder adquisitivo que tiene el cliente, entre otros. En otras palabras, el comportamiento de la demanda dependerá de la capacidad económica que tiene el cliente para poder adquirir un producto o servicio. Es por ello, para las empresas proveedoras de productos o servicios es importante contar con la información del comportamiento de la demanda a fin de disponer de los recursos necesarios para satisfacer dicha demanda.

I. Patrones de demanda

Si bien es cierto, el comportamiento histórico de la demanda sigue un patrón según su rotación, es por ello que se cada histórico debe ser analizado para determinar el patrón de demanda que sigue y posteriormente realizar los pronósticos. En la literatura existen 5 patrones básicos que son aplicables para analizar el historial de movimientos de un producto o servicio:

1. **Estacional:** El histórico de la demanda sigue un patrón que se repite a incrementos o decrementos dentro de un período de tiempo.
2. **Tendencia:** El promedio o la media de la demanda presenta un incremento o decremento a través del tiempo.
3. **Horizontal:** Los datos de la demanda presentan un comportamiento constante en torno a una media.
4. **Cíclico:** El histórico de la demanda presentan incrementos y decrementos graduales en períodos de tiempo más largos (años o decenios).
5. **Aleatoria:** El histórico de la demanda presenta un comportamiento imprevisible, es decir, un comportamiento intermitente.

II. Indicadores de demanda intermitente

Para el caso que la demanda presente un patrón aleatorio los autores como Ghobbar & Friend, (2002) y Santa Cruz & Corrêa, (2017) han profundizado en sus estudios en determinar el grado de aleatoriedad o intermitencia a través de los siguientes indicadores:

6. **Coefficiente de variación cuadrática (CV2):** Este es un indicador que permite determinar el grado de dispersión que tiene el histórico de la demanda en relación con la media. Empleando este indicador se puede determinar el efecto de las unidades y variaciones de la demanda por producto. La fórmula para realizar el cálculo es la siguiente:

$$CV2 = \frac{\delta_d}{\mu_d} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

δ_d : Desviación estándar de la demanda

μ_d : Demanda promedio

7. **Intervalo promedio entre demandas (ADI):** Es indicador se utiliza para determinar el comportamiento de las series temporales, es decir, aquellas series en las que los valores fluctúan o llegan a cero. Se calcula de la siguiente manera:

$$ADI = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

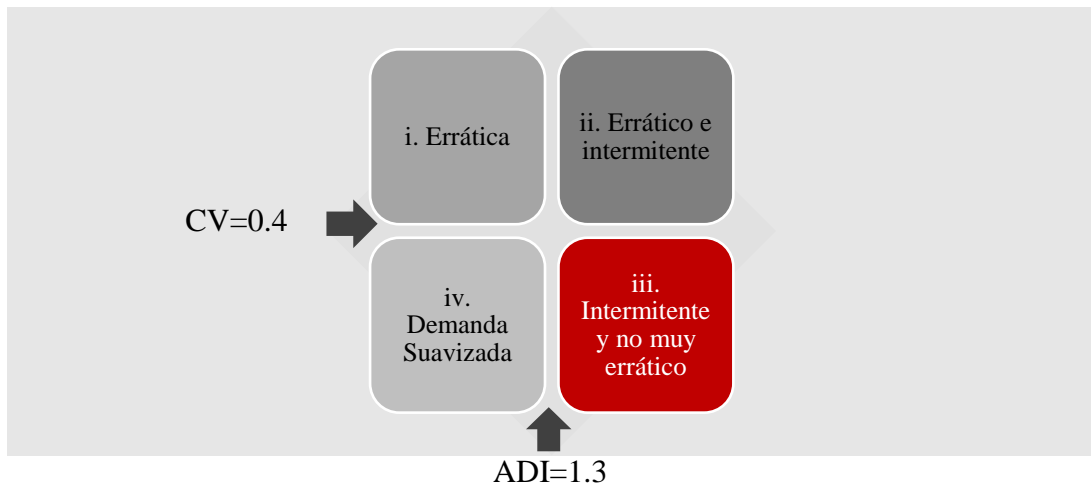
t_i : Intervalo entre dos demandas consecutivas en el instante i

N : número de periodos donde la demanda no es cero.

Según los valores obtenidos de los dos indicadores mencionados, se determina el grado de intermitencia de la demanda, el cual se clasifica de la siguiente manera: 1) es errática, esto ocurre cuando el histórico de la demanda tiene una alta variabilidad; ii) intermitente y errático, la cual se presenta si la serie o el historio de la demanda tiene valores nulos; iii) no muy errático e intermitente, esto se presenta si la variabilidad del histórico de la demanda y los periodos entre dos demandas no nulas son altos y iv) demanda suavizada, se dice así cuando la variabilidad del histórico de la demanda y los periodos entre dos demandas no nulas son bajas. (Santa Cruz & Corrêa, 2017)

En la ilustración 1, se muestra la matriz y los límites de los indicadores CV2 y ADI.

Ilustración 1: Patrones de demanda intermitente



Fuente: Ghobbar & Friend, (2002) en Santa Cruz & Corrêa, (2017)

1.2.4. Pronóstico

Según Heizer & Render (2009) el pronóstico se puede entender como un arte y a la vez una ciencia para predecir los eventos a un futuro determinado. Para realizar dicha predicción se puede emplear registros del histórico y definir un horizonte empleando algún modelo matemático. Cabe aclarar que una predicción se puede realizar de manera subjetivo o intuitiva, así como poder ser la combinación de ambas.

De acuerdo con la literatura se tiene lo siguiente:

I. Tipos de pronóstico

8. **Pronósticos económicos:** Se enfocan en determinar el ciclo o serie de un negocio a fin de predecir por ejemplo la tasa de inflación.
9. **Pronósticos tecnológicos:** Este tipo de pronósticos se realizan para predecir el comportamiento futuro de nuevas tecnologías en el mercado.
10. **Pronósticos de la demanda:** Este de pronósticos se realizar para proyectar el comportamiento de la demanda de un producto o servicio en un horizonte de tiempo.

II. Medición del Error de pronóstico

Syntetos & Boylan (2005) señalan que para determinar una técnica de pronóstico se debe tener una evidencia a fin de asegurar que la predicción realizada no produzca errores. Para ello, es necesario sostener una base consistente la cual servirá para realizar una comparación de exactitud entre las diferentes técnicas de pronóstico. Los indicadores de pronóstico más comunes son los siguientes:

11. **Error del pronóstico:** El error del pronóstico es un indicar que se puede determinar al comparar los resultados de los pronosticados con los valores reales de la siguiente manera:

$$\text{Error del pronóstico} = \text{Demanda real} - \text{Valor pronosticada} \quad \text{Ecuación (3)}$$

12. **Desviación absoluta de la media (MAD):** Este es otro de los indicadores que nos permite medir la precisión de la previsión realizada a través del promedio de los errores de pronóstico, las cuales se expresan en valores absolutos.

$$MAD = \frac{\sum |Real - Pronóstico|}{\text{Número de periodos de datos } (n)} \quad \text{Ecuación (4)}$$

13. **Error porcentual medio absoluto (MAPE):** Este indicador global nos permite calcular el promedio de las diferencias absolutas entre los valores pronosticados y los reales. El resultado que se obtiene se expresa como porcentaje de los valores reales. El MAPE se calcula como:

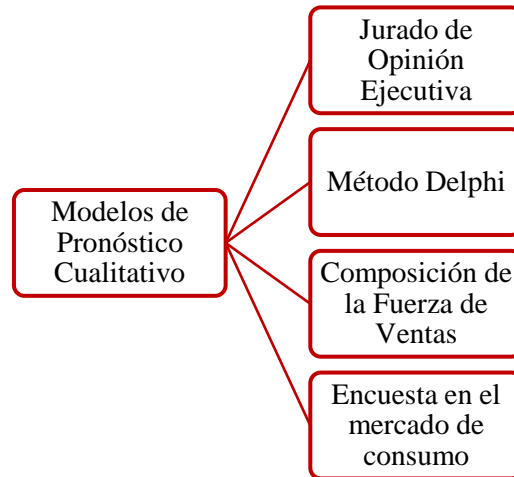
$$MAPE = \frac{\left[\frac{100 \sum_{i=1}^n |real_i - pronóstico_i|}{real_i} \right]}{\text{Número de periodos de datos } (n)} \quad \text{Ecuación (5)}$$

III. Enfoque de pronósticos

14. **Modelos de pronósticos cualitativos:** Este tipo de modelos de pronósticos se realizan considerando variables cualitativas que pueden ser una intuición o incluso las experiencias personales de quién toma las decisiones. Para este tipo de

modelos la información puede estar disponible y no se relevante para la toma de decisiones. Los principales modelos son lo siguiente:

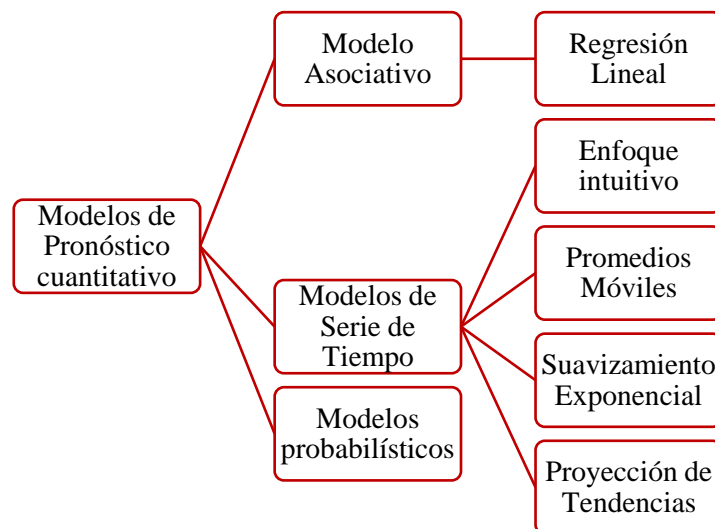
Ilustración 2: Tipos de Modelos de Pronóstico Cualitativo



Fuente: Heizer & Render, (2009).

15. **Modelos de pronósticos cuantitativos:** En este tipo de modelos de pronósticos es necesario emplear modelos matemáticos que basados en datos históricos nos permitan realizar la previsión del comportamiento futura de la demanda. Los principales modelos se muestran en la ilustración 2:

Ilustración 3: Tipos de Modelos de pronóstico cuantitativo



Fuente: Heizer & Render, (2009)

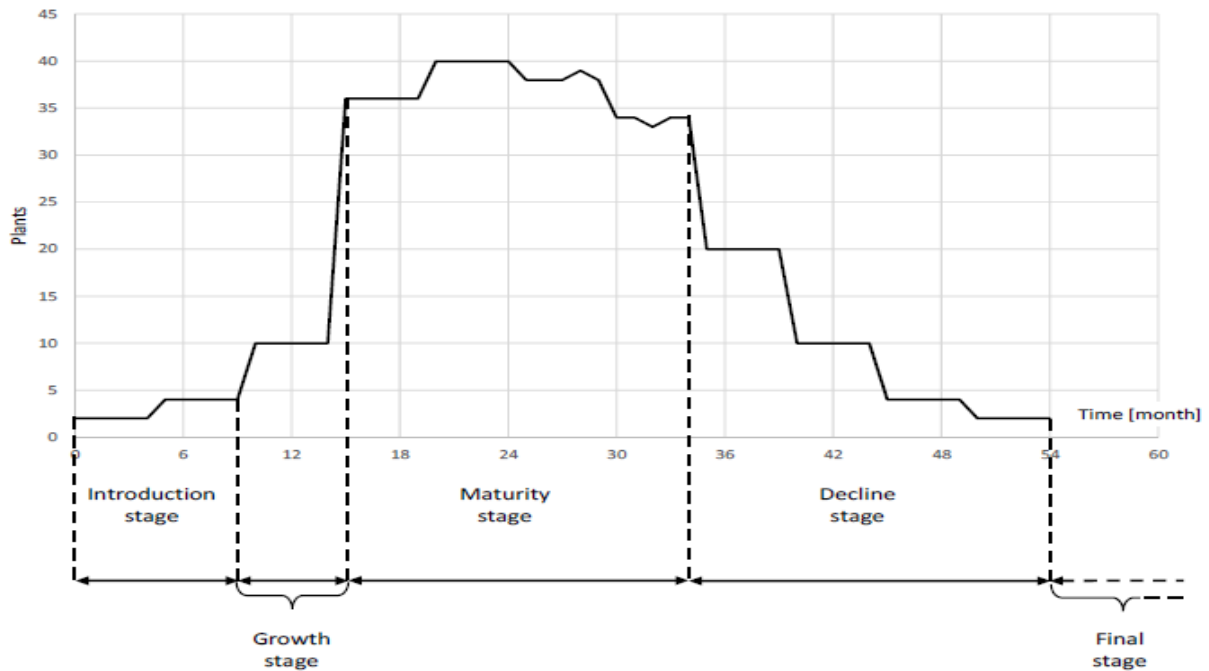
1.2.5. Ciclos de vida del producto

Según Heizer & Render (2009) todos los productos tienen un ciclo de vida, es decir nacen, viven y mueren. Pues, cada producto a medida que pasa el tiempo tener menor impacto en la sociedad hasta que se vuelven obsoletos. Cabe precisar que de acuerdo con la literatura el ciclo de vida de los productos se divide en 4 etapas como son: la fase de introducción, fase de crecimiento, fase de madurez y la fase de declinación.

- **Fase de introducción:** En esta fase la gran mayoría de los productos aún se encuentran en una etapa de mejora según las necesidades del mercado, así como representan mayores gastos para mejorar sus características a través de investigaciones, mejora de procesos, entre otros.
- **Fase de crecimiento.** En esta fase las mejoras que se aplican al producto se estabilizan y es de acuerdo con las expectativas del mercado. Además, se hace necesario realizar ajuste y mejoras en la capacidad de producción a fin de satisfacer la demanda del mercado.
- **Fase de madurez:** Los productos alcanzan esta etapa cuando ya están posicionadas en el mercado, además ya se establecen competidores para satisfacer la demanda del mercado. Es en esta fase cuando se tiene que implementar acciones para apuntar a la producción a gran escala.
- **Fase de declive:** Como se había indicado, todo producto por naturaleza llega a un punto en la que deja de ser atractiva para el mercado. Es en esta fase en la que se debe terminar su producción, Cabe precisar que se pueden realizar mejoras y presentar al mercado como un producto mejorado.

En la siguiente ilustración, se puede apreciar las fases del ciclo de vida de un producto:

Ilustración 4: Etapas del ciclo de vida del producto



Fuente: Armenzoni M. et. Al (2015)

1.2.6. Información de base instalada de máquinas

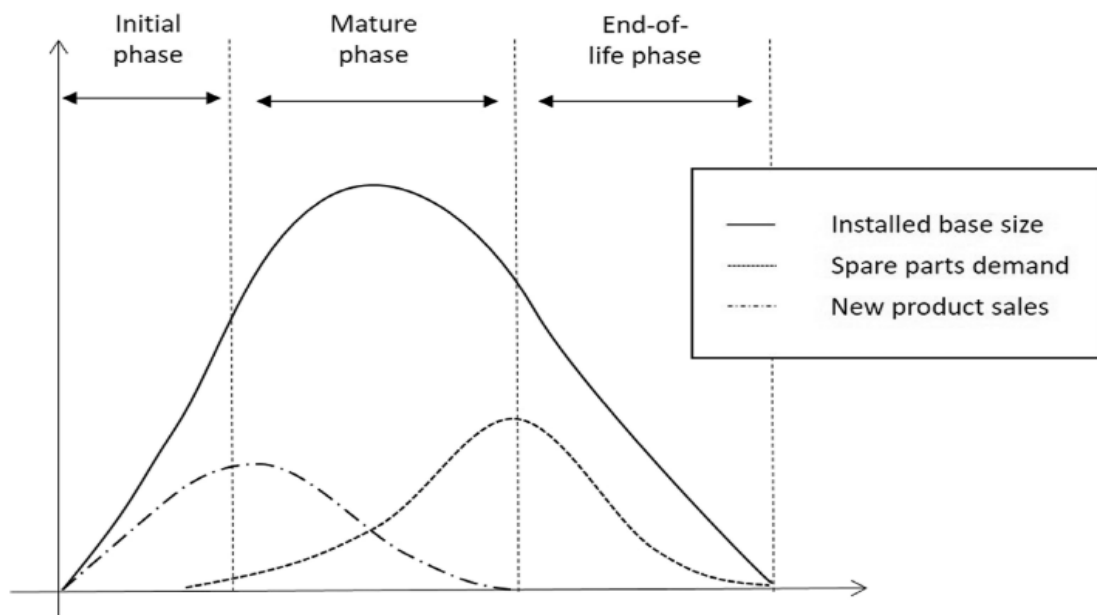
Según los autores Van der Auweraer & Boute, (2019), la base instalada de una empresa es el número de productos vendidos que puede conducir a la previsión de la demanda de los artículos que lo componen, por ejemplo, los repuestos. En otras palabras, la base instalada puede definirse como el conjunto de sistemas o productos para los que una compañía ofrece servicios de postventa. Este puede ser el conjunto activo de máquinas, que contiene la parte en estudio y puede generar una demanda futura de piezas de repuesto. Por otro lado, los autores Kim et al. (2017) sostienen que la base instalada es el número de productos vendidos que puede conducir a gestionar la demanda por las piezas de repuesto. En ese sentido, “el uso de la información de la base instalada para pronosticar la demanda de piezas de repuesto puede conducir a la reducción de stocks de hasta un 25%”. (Fortuin, 1984 en Van der Auweraer, Boute, & Syntetos, 2019)

Cabe indicar que la información de base instalada consta de tres fuentes principales de información que impulsan la demanda de repuestos: (1) el tamaño, el estado de la base

instalada y el estado de la pieza de repuesto; (2) la política de mantenimiento que determina cuando se sustituye una parte; y (3) los factores ambientales que afectan a la fiabilidad de la pieza. Pues, la demanda de piezas de repuesto sigue la demanda del producto instalado. Por lo tanto, es dependiente del ciclo de vida del producto.

El ciclo de vida del producto y su impacto en la demanda de piezas de repuesto se observa en la ilustración 5. En la fase inicial, las ventas de productos presentan una tendencia hacia arriba y la base instalada crece, la demanda de piezas de repuesto suele ser bastante baja, ya que los productos son todavía relativamente jóvenes. En la fase madura, donde las ventas de productos poco a poco vuelven a caer y la base instalada alcanza su tamaño máximo, se espera que la demanda de piezas de repuesto empiece a subir. En la fase final del ciclo de vida del producto, disminuye las ventas de productos finales, la demanda de piezas de repuesto todavía puede seguir aumentando, disminuyendo gradualmente a medida que los productos lleguen a su fin de uso.

Ilustración 5: Evolución de la base instalada y la demanda de piezas de repuesto.



Fuente: Van der Auweraer et al. (2019)

1.2.7. Definiciones empleadas en el mantenimiento

A continuación, se presentan las definiciones de las variables que se emplean en mantenimiento. Es necesario comprender bien dichas definiciones a fin emplear al momento de realizar las estimaciones.

I. Elementos reparables: Se consideran como elementos reparables a todas las partes que de una u otra forma se pueden someter a reparación haciendo que cumpla la función para lo cual fue fabricada. Cabe precisar que, hasta cierto punto los elementos reparables pueden estar compuestas de aquellos elementos que se consideran como No reparables.

II. Elementos no reparables: Se consideran como elementos no reparables a todas las piezas o partes que por su naturaleza ya no se pueden reparar. Esto debido a que su costo de reparación puede resultar mayor a su precio de compra.

Se debe tener clara la diferencia de los elementos reparables de los no reparables para fines estadísticos, ya que para los elementos reparables se puede registrar el Tiempo Promedio Entre Reparaciones (MTBF) y en el caso de los No reparables se puede registrar el Tiempo Promedio Hasta el Fallo (MTTF). Sin embargo, para los productos reparables se emplea el Tiempo medio entre reparaciones (en inglés Mean Time To Repair - MTTR).

III. Tiempo Medio entre fallos (MTBF): Como se indicó líneas arriba, el indicador del Tiempo Medio o Promedio entre Fallos se registra para los elementos reparables. Pues, el tiempo que se registra es el tiempo de funcionamiento correcto de los equipos. Esta idea se representa por medio de la siguiente ilustración:

V. Tiempo medio para el fallo (MTTF): (Mean Time to Failure) es un parámetro muy importante, ya que con ello se mide la fiabilidad de los elementos no se pueden reparar. Conlleva al tiempo medio esperado, culmina cuando la primera reparación inicie Este elemento, corresponde cuando un equipo falla, lo que significa que alguna de sus piezas debe ser sustituido. Por ejemplo, una lámpara el cual no permite una reparación: cuando falla se pone otra en su lugar. El MTBF es el tiempo medio o entre fallas, el cual se aplica en equipos que sí permiten reparación y que después de un tiempo, y después de varias reparaciones, estos llegan al final de su vida útil, es entonces que estos deben ser sustituidos.

Si bien es cierto, se aplica para ítems que no se pueden reparar, es probable que en un equipo que sí permite reparación, el MTTF sea capaz de incluir más de una reparación. De esta manera, el MTTF será mayor que el MTBF. En los equipos que sí permiten tener más de un ciclo de reparación se obtiene lo siguiente:

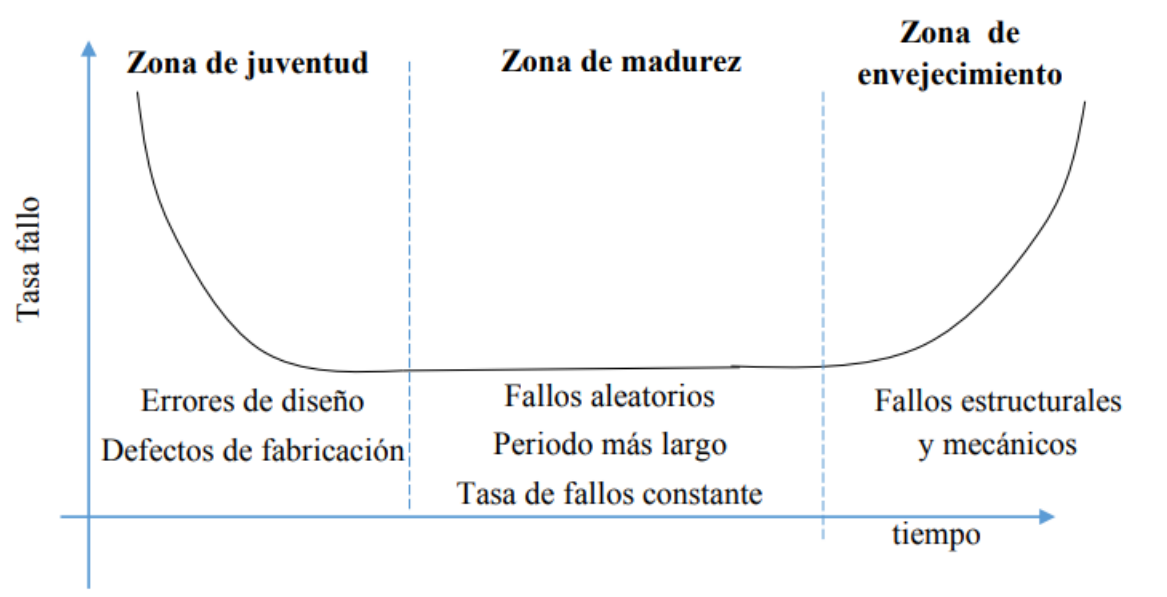
$$MTTF = k \times (MTBF + MTTR) \qquad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

K: Ciclos de reparación

VI. Curva del ciclo de vida: Se conoce también como la curva de la bañera; sin embargo, en la práctica se aplica técnicas de mantenimiento, las cuales alteran la forma, así como los periodos. La curva del ciclo de vida se refiere al comportamiento durante todo el trabajo de una máquina, en lo que respecta a las necesidades que tenga en el mantenimiento.

Gráfica 4: Curva del ciclo de vida de un producto



Fuente: Andrea & Sierra (2015)

16. **Zona de juventud:** Es conocida como “zona de fallos iniciales”, cuya característica es tener una alta tasa de fallos la cual desciende de manera acelerada. Entre las razones se tiene: equipos defectuosos, el poco conocimiento sobre el manejo de un equipo, instalaciones que no está correctamente diseñadas, tolerancias de fabricación o defectos, etc.
17. **Zona de madurez:** En esta parte de la curva, se presenta los fallos constantemente. Es decir, es el periodo más largo de toda la zona de la curva de la bañera, por lo tanto, presenta una mínima probabilidad de averías. El origen de los fallos se encuentra, en causas aleatorias (fallo de algún elemento del equipo, accidentes fortuitos, condiciones inadecuadas, desgastes puntuales no previsibles, mala operación, etc.) esto es a causa de múltiples combinaciones las cuales son en general no predecibles, así como no inherentes al equipo.
18. **Zona de desgaste:** En esta zona se refleja la parte final de la curva de la bañera, en el cual los fallos empiezan a crecer de manera rápida. En este punto los fallos que suceden son en general de tipo estructural o mecánico. Cuando este periodo llega, se produce un importante aumento de los costes de mantenimiento, y una

reducción de la seguridad de uso, por lo tanto, significa el final del periodo de vida del ítem, el cual tiene que ser reemplazado por otro que cuenta con mejores condiciones o esté en un mejor estado. De este modo, los fallos llevan un riesgo para los usuarios, tales como la parada, modificación y/o remplazo del elemento están fuera de todo análisis. Sin embargo, a veces no se llega tan lejos, debido a criterios económicos, cuyo análisis involucra los costes de mantenimiento y el remplazo del elemento.

1.2.8. Inventarios

Tener inventarios es acumular materias primas, provisiones, productos terminados, componentes, productos en proceso, las cuales aparecen en varios puntos a través del canal de producción. Los inventarios deben suministrar un alto nivel disponible del producto o servicio, especialmente cuando se localiza cerca del cliente. Este debe satisfacer y superar incluso las expectativas que tiene el cliente. Asimismo, utilizar inventarios puede llevar a la reducción de manera indirecta de costos operativos de la cadena de suministros. Por eso, se puede afirmar que los inventarios son todo lo que una empresa requiere para funcionar, por lo que se debe mantener el nivel adecuado, cuya renovación debe ser oportuna, así como tenerlos bajo control.

I. Clasificación de inventarios: Los inventarios varían debido al consumo, su utilización y la venta de cada artículo que lo componen. En ese sentido se puede clasificar de acuerdo con los siguientes criterios:

a. Por la función que ejercen

Inventarios de seguridad: Cuentan con tres funciones: el de absorción de las imprecisiones en la demanda; prevenir los retrasos de los plazos de entrega de los proveedores; y evitar demoras en la producción.

Inventarios cíclicos: Se puede realizar la producción o compra en lotes con el fin de sacar provecho a las economías de escala.

Inventarios en tránsito: Involucra a aquellos productos que están en tránsito entre el proveedor y la empresa, o entre la empresa y su cliente, asimismo, son conocidos como inventarios de distribución.

b. Por las clases de productos almacenados

Inventarios de materias primas: Son aquellos materiales/insumos que han pasado por un proceso de producción, manufactura, o construcción con el objetivo de ser convertidos en un producto terminado o en proceso.

Inventarios de productos en proceso: Son aquellos activos que se encuentran en siendo modificados y que se utiliza en la producción o fabricación de otros productos que están aún en proceso o para productos terminados.

Inventarios de productos terminados: Se refiere a aquellos productos que están disponible para su venta y/o distribución al cliente final.

Inventarios de materiales para mantenimiento y operación: Son las herramientas y materiales para realizar las reparaciones y el mantenimiento estándar de equipos.

II. Costos de rotura de stock o por faltantes: Se relacionan con la ausencia de existencias o activos en el momento en que son requeridas. En el sector comercial, estos costos conllevan a costos por pérdidas de ventas, el cual está relacionado con el beneficio que la empresa deja de recibir debido a que no logró atender el pedido. Asimismo, está relacionado a los costos de gestión de pedidos pendientes, como los gastos adicionales en los que se puede incurrir por no atender un pedido dentro del proceso normal de despacho (horas extras, transporte especial, de mano de obra, etc.). Del mismo modo, es vital incluir la posibilidad del efecto negativo que se obtiene luego de un “mal servicio” respecto a las ventas futuras.

La rotura de stock se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Rotura de stock (\%)} = \frac{\text{Pedidos no Satisfecho}}{\text{Pedidos totales}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

1.2.9. Sistema de Revisión de Inventario

Según los autores Babiloni, Carboneras, Guillem, & Palmer Gato, (2007), gestionar el inventario, hoy en día significa que un elemento estratégico clave el cual determina el éxito o el fracaso de las metas importantes para la organización, por ejemplo, cumplir con un nivel de servicio determinado a priori, manteniendo costes adecuados y razonables. Un correcto modelo de gestión de inventarios debe tomar en consideración aquellas características que tiene la demanda de los elementos que se gestiona, especialmente cuando éstos no cuentan con un patrón de demanda estable, así como con un periodo de aprovisionamiento constante. Vidal (2005) y Silver et al. (1998) concuerdan en que existen tres preguntas importantes que debe ser resueltas en cualquier sistema de control o gestión de inventarios: ¿Con qué frecuencia debe revisarse el nivel de inventario? ¿Cuándo es el momento que se debe ordenar el pedido? ¿Qué cantidad debe ordenarse en cada pedido?

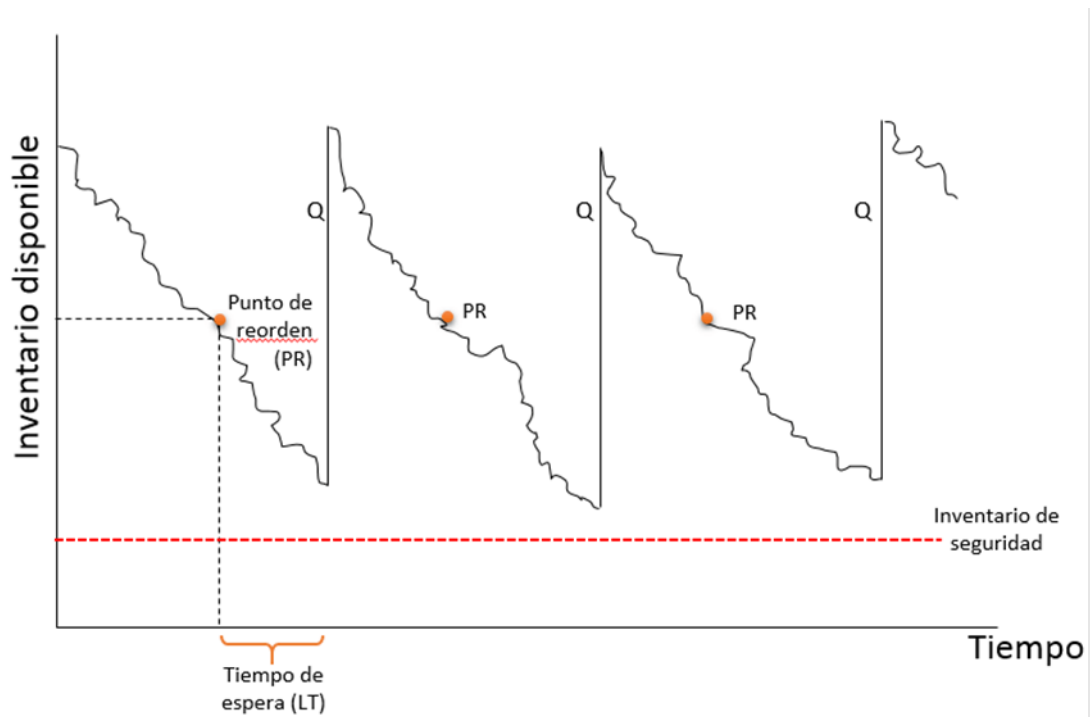
Al seleccionar un sistema de control de inventario para una aplicación en específico, las variables de las demandas impuestas sobre los activos son vital. La diferencia significativa entre los tipos de inventarios es si el artículo analizado está sometido a una demanda dependiente o independiente.

I. Sistema de Revisión continua: Este tipo de sistema también es conocido en la literatura como el sistema Q, ya que este sistema supone que cada vez que se retira un artículo se debe realizar un control de inventario de los artículos restantes. Por ello, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Demanda variable y tiempo de entrega variable
- ✓ Cada vez que realizamos el retiro de un artículo, se realiza el control del inventario restante.
- ✓ Si el inventario resultante está por debajo de determinado nivel, se coloca un nuevo orden.
- ✓ Si el inventario resultante no está por debajo del nivel, sigue consumiéndose.

Tras tomar en cuenta las consideraciones indicadas líneas arriba, se determina el punto de reposición tal como se aprecia en la siguiente ilustración.

Ilustración 6: Esquema del sistema de revisión continua



Fuente: Babiloni (2007)

Por otro lado, se debe considerar el stock de seguridad el cual consiste en almacenar unidades adicionales de artículos para evitar faltantes ya sea por la ineficiencia del proceso de pronóstico. Asimismo, debe determinar el nivel de servicio de inventario, ya que a partir de ello se establece el nivel de seguridad. En ese sentido, el stock de seguridad se calcula tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$SS = (\text{Stock de Seguridad}) = Z \times \sigma_{LT} \quad \text{Ecuación (10)}$$

De la misma manera se determina el punto de reorden tal como se expresa en la siguiente ecuación:

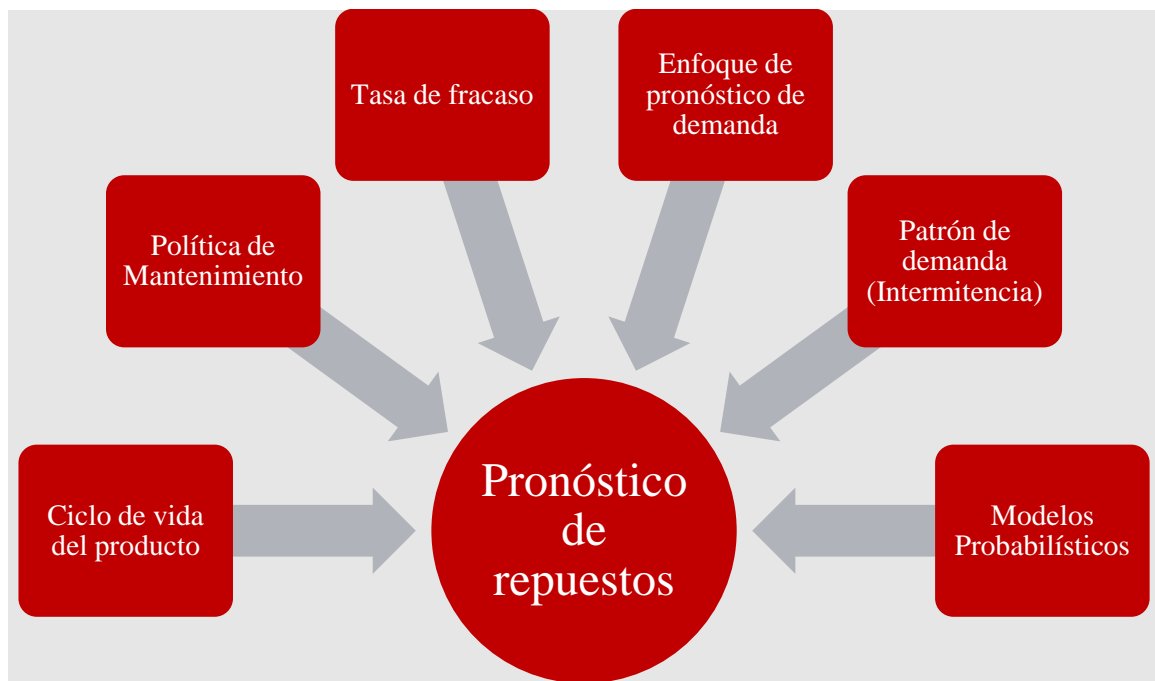
$$\text{Punto de reorden} = \text{Demanda promedio} + \text{Stock de seguridad (SS)} \quad \text{Ecuación (11)}$$

1.3. Estado del arte

Los recambios (también llamadas piezas de servicio o piezas de repuesto) son piezas intercambiables utilizados para la reparación o sustitución de piezas defectuosas de un

determinado equipo. Las piezas de repuesto son una característica importante de la gestión de la logística y la gestión de la cadena de suministro, ya que deben estar disponibles en los puntos apropiados dentro de la cadena de suministro para proporcionar servicios de postventa y garantizar el nivel de servicio deseado a los clientes (Botter y Fortuin, 2000). Asimismo, la demanda de piezas de repuesto es muy esporádica y difícil de pronosticar, y, en algunas circunstancias, también podría depender de la estrategia de mantenimiento aprobado. Por otro lado, en términos generales, los investigadores resaltan que la previsión de la demanda de piezas de repuesto puede ser difícil, ya que existen varios factores que influyen en la demanda, tal como se aprecia en el siguiente gráfico:

Gráfica 5: Factores que influyen en el pronóstico de la demanda de repuestos



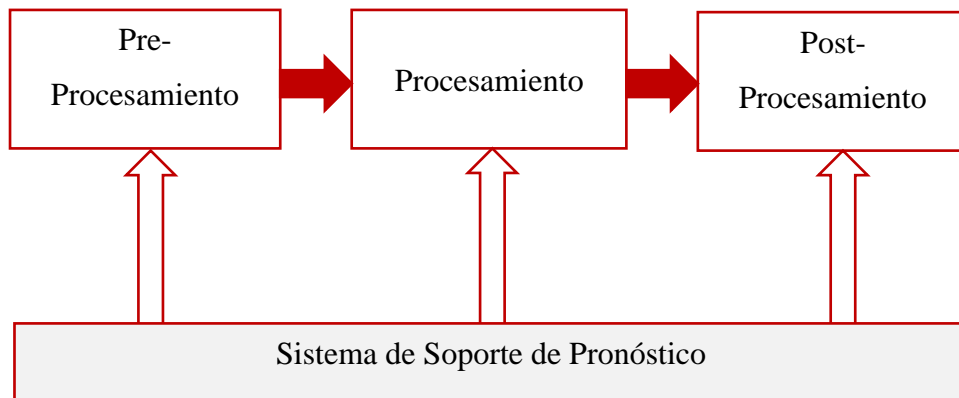
Fuente: Armenzoni et al., (2015)

De la misma forma, según Ballou (2014) es complicado estimar valores en el futuro de una demanda de un producto, cuyos registros cuenta con valores iguales a cero, o con demanda nula durante algunos períodos. Es por lo que, para tener éxito en la planificación de inventarios es necesario saber el tipo de comportamiento que sigue la demanda del producto, en especial cuando se trata de piezas de repuesto, ya que estos siguen un patrón de demanda intermitente; tal y como se muestra en el siguiente aporte:

“Un adecuado planeamiento de inventarios debe conocer las características de la demanda de los productos para los que se utiliza. Si estos productos cuentan con patrones de demanda intermitentes o de lento movimiento se debe establecer un modelo que se adapte a sus características.” (Babiloni et al., 2007).

En función de esa particularidad, es necesario complementar las técnicas de pronóstico y de planificación de inventarios para poder abastecer oportunamente productos las piezas de repuesto. Ante ello, durante las últimas décadas varios métodos y modelos fueron propuestos en la literatura para auxiliar la previsión y la planificación de demanda intermitente. Uno de ellos es de los autores Boylan & Syntetos, (2010), en su investigación proponen un modelo para desarrollar el proceso de pronóstico de piezas de repuesto. Pues proponen clasificar todas las fases del pronóstico en 3 etapas: preprocesamiento, procesamiento, post-procesamiento. A esta estrategia los autores lo denominan Sistema de Soporte de Pronóstico (FFS siglas en inglés), la estructura es como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 7: Sistema de Soporte de Pronóstico



Fuente: Boylan & Syntetos, (2010)

- **Preprocesamiento:** En esta etapa se realiza la clasificación de la demanda de las piezas de repuesto como intermitente y no intermitente y se determina su grado de

intermitencia. Para este último se consideran dos variables 1) el coeficiente de variación de tamaño de la demanda y 2) tiempo promedio entre demandas.

- **Procesamiento:** En esta etapa se aplica el método de pronóstico apropiado para la demanda. Cabe indicar que esta etapa es crucial para lograr la eficiencia del proceso, es así como otros autores han intentado proponer métodos de bootstrapping no paramétrico, el intercambio de información, etc. Sin embargo, el rendimiento de estas ha sido cuestionadas por lo que requieren más investigación.
- **Post-procesamiento:** En esta última etapa se realiza ajustes o modificaciones de las previsiones estadísticas basado en el mercado u otra información como la base instalada de los equipos, el movimiento del inventario, etc.

El modelo propuesto por los autores Boylan & Syntetos, (2010) abarca gran parte del proceso de pronóstico; sin embargo, en ninguna de las etapas considera clasificar la demanda de los productos de acuerdo a su importancia. Ya que para los productos como las piezas de repuestos (con demanda intermitente) su importancia para la organización puede variar y se podría enfocar esfuerzos en aquellos productos que representan mayores ingresos para una empresa. Asimismo, el sistema no abarca el posterior tratamiento del pronóstico de la demanda como la determinación de una política de inventario.

Por otro lado, los autores Santa Cruz & Corrêa, (2017) indican que la sobreestimación de la demanda puede originar niveles de “sobreproducción”, riesgos de ocasionar volúmenes indeseables de inventarios, lo que puede desencadenar elevar costos. También, el subestimar la demanda puede traducirse en incumplimiento de compromisos, posibles pérdidas de oportunidades de negocios, y ventas futuras comprometidas.

Por otro lado, los autores Van der Auweraer et al., (2019) en su investigación indican que la información de base instalada reúne una gran cantidad de información útil para la toma de decisiones. Sin embargo, a medida que la base instalada puede constar de equipos complejos con subconjuntos y diferentes partes, hacer el seguimiento de estos podría demandar softwares sofisticados, pero resultaría de gran utilidad para predecir la demanda de los repuestos con gran precisión. Mientras tanto los autores Dekker, Pinçe, Zuidwijk, & Jalil, (2013) sostienen que la demanda de las piezas sigue la demanda del producto

instalado por lo que es dependiente del ciclo de vida del producto. Asimismo, indican que la obtención de la información de base instalada que es necesaria para los pronósticos puede ser muy difícil y requiere mucho tiempo. El uso de la información de base instalada para la predicción requiere una enorme cantidad de datos que deben estar disponibles y ser analizados en tiempo real por lo que la información de base instalada de menor proporción como son de las pequeñas empresas se podría utilizar para realizar ajustes a la demanda pronosticada. De esta manera se reduce la necesidad de un método de pronóstico complejo.

Los autores Babiloni et al., (2007) para complementar con el posterior tratamiento de la demanda pronosticada realizaron el análisis de 10 sistemas de revisión de inventario y llegaron a la conclusión de que los sistemas de revisión continua son los más eficientes para artículos con demanda baja e intermitente. Hasta el momento los modelos revisados en la literatura tratan de modelar la demanda con una distribución que se ajuste lo más posible al comportamiento de esta y cuyos parámetros han de ser estimados, en función de los datos históricos que se poseen.

1.3.1. Limitaciones

Una de las limitaciones que se ha encontrado en la revisión de la literatura es que se debe contar con datos históricos reales de los tiempos promedios de fallas entre reparaciones de la máquina para poder realizar el pronóstico de los repuestos correspondientes. Así como, se debe contar con información actualizada en tiempo real de la base instalada.

1.3.2. Pasos de la Metodología

Luego de haber analizado más de 20 artículos de investigación de distintos autores especialistas en el tema materia de este trabajo, se llegó a la conclusión de que los pasos a seguir para realizar el diseño del sistema de pronóstico de la demanda de piezas de repuesto son los siguientes:

- I. Clasificación de los repuestos:** Por familias y categorías según máquinas vendidas.
- II. Análisis de la criticidad de los repuestos:** Priorizar los repuestos de mayor rotación.
- III. Realizar el pronóstico de la demanda:** En base al ciclo de vida de los repuestos y con los registros de la base instalada.

- IV. Aplicar modelo de Sistema de Revisión:** En esta etapa se busca el momento en el que se debe aplicar la orden de compra de los repuestos como la determinación del punto de abastecimiento.
- V. Validar el Sistema:** Mediante la aplicación real o un prototipo.

1.4. Casos de éxito

1.4.1. Metodología para el control y la gestión de inventarios en una empresa minorista de electrodomésticos

La demanda en el sector de los electrodomésticos se caracteriza por ser dinámica, lo que implica la necesidad de tener un adecuado abastecimiento. El tener que contar con un diseño para este sector tiene aspectos particulares, a raíz del volumen de elementos y a la complejidad de administrar las líneas. Por lo tanto, esta metodología sugiere un enfoque multicriterio para clasificar o dividir las líneas de productos. Después se lleva a cabo un análisis de series de tiempo con el fin de lograr una evaluación a los sistemas de control de inventarios, llegando a minimizar el costo de inventario.

Descripción del Problema: Las empresas que comercializan son parte importante del canal de distribución de productos electrodomésticos, debido a que permiten que los consumidores tengan acceso a estos productos. El abastecimiento se lleva a cabo según una ruta y periodo fijo, que generalmente es de forma semanal. Es por esto, que las empresas requieren establecer un control correcto de activos con el fin de evitar rupturas de inventario, antes de que llegue periodo de abastecimiento e incurrir en costos por pérdida de ventas o faltantes. Por otra parte, la variedad alta de artículos significa que el sistema de gestión de inventarios deba establecer la cantidad que se tiene que ordenar de cada ítem. Según lo expuesto, se puede evidenciar la necesidad de definir un proceso de administrativo idóneo, el cual lleve el control de inventarios, con la finalidad de lograr tomar decisiones que se enfoquen en la resolución de problemas ocasionados por la dificultad que significa los periodos de venta y así como la cantidad de productos, como la existencia de variables externas las cuales benefician la variación en gustos y preferencias de los consumidores. En conclusión, la exigencia del diseñar un sistema que gestione los activos o inventarios, que defina la cantidad óptima a ordenar para propiciar el control de las cantidades que están en almacén debe garantizar la satisfacción de la demanda, así

como un óptimo nivel de servicio al cliente. De este modo, esta metodología está dividido en las siguientes etapas:

- I. Análisis de la Demanda:** Su finalidad es caracterizar el patrón que tiene la demanda de una serie de artículos. Para estos vital analizar las series de tiempo con el objetivo de definir el modelo matemático que se adapte mejor.
- II. Clasificación de Artículos:** se dividen las líneas de artículos conforme al método multicriterio, este paso es muy importante, puesto que un eficiente sistema de gestión de inventario no maneja el mismo para todas las existencias, si no que utiliza un método de control y análisis como los es el de la clasificación ABC.
- III. Gestión de Inventarios:** En esta fase se da a través de sistemas de pronósticos, en cual se explora la política óptima de inventario que ayude a reducir la totalidad de los costos que involucre el de las ventas perdidas. Gracias a la simulación se obtiene la evaluación del impacto económico de la metodología, puesto que se determina una disminución de los costos por ruptura de inventarios en un 50%. La metodología que se plantea significa una oportunidad de mejora para el proceso de gestión de activos; debido a que esta reducción produce un aumento en la utilidad obtenida. También, se logra garantizar la satisfacción de la demanda que pronostica, así como el óptimo nivel de servicio brindado al cliente.

1.4.2. Metodología para la previsión de demanda intermitente basado en métodos de series de tiempo en una industria de sistemas de refrigeración

El prever la demanda es una de las funciones más esenciales en la gestión y toma de decisiones en las empresas. Particularmente, las áreas de producción y operaciones usan la previsión como fundamento para tomar decisiones, de manera continua, respecto a los recursos requeridos en todo el proceso operativo.

Las industrias comercializadoras como el de sistemas de refrigeración y sus respectivos componentes exportan a mercados de todo el mundo productos tales como piezas de reposición, por lo que deben contar con el stock necesario para poder satisfacer el mercado, debido al tiempo que representa exportar estos productos. En ese sentido, la estimación de la demanda futura de este producto encierra cierta dificultad, ya que la demanda presenta

un comportamiento intermitente en el tiempo. En resumen, estimar los valores futuros de demanda de un producto que presenta valores demanda nula o iguales a cero durante algunos períodos, es una actividad complicada.

Descripción del problema: La sobre estimación de la demanda puede ocasionar niveles de “sobreproducción”, riesgos de indicios de volúmenes no deseables de inventarios, y en consecuencia, generar costos elevados. De igual forma, no considerar la demanda puede se traduce en incumplir compromisos, así como posibles perder oportunidades de negocios y futuras ventas comprometidas. En estos dos casos, la competitividad de la empresa se verá afectada de manera significativa. El nivel de precisión de los pronósticos de la demanda tiene un alto impacto en todas las fases de la cadena de suministro de las empresas. Por esto, el análisis está enfocado en prever la demanda intermitente de piezas de repuesto de sistemas de refrigeración. Las etapas a seguir son:

- I. Método de clasificación:** Se seleccionó 10 clientes que pertenecen a la clase A de la curva de Pareto y que tienen en conjunto, los más altos volúmenes de la demanda.
- II. Recolección de datos:** De cada uno de los clientes se recolectó las demandas de manera mensual (en unidades) de los últimos cinco años y medio. Para la estimación de la muestra se usó 66 observaciones. Para la previsión fuera de la muestra las series se dividieron en dos grupos, el primero con 54 valores para estimar la previsión y el segundo, con 12 datos para efectos de validación y control de errores.
- III. Análisis de la demanda:** este análisis es realizado en tres fases, inicialmente son caracterizadas las series de tiempo en intermitente, atenuada, errática o granulada de acuerdo con los coeficientes CV2 y ADI. Para la previsión de la demanda se utiliza el enfoque: i) métodos probabilísticos para previsión intermitente.
- IV. Validación:** Para la validación y control de la previsión en todos los casos se usan como estadísticos de ajuste los dos más recurrentes en la literatura: el error cuadrático medio (RMSE) y el error medio absoluto (MAE)

Resultados: Los resultados mostraron que el 80% de las demandas son intermitentes, y que el 20% presentan menor grado de intermitencia y variabilidad. Esta particularidad ayudó a que se logre catalogar como demandas suaves. Del mismo modo, los resultados

mostraron que la previsión usando métodos clásicos son términos de razón “demanda / período” y, de cierta manera, constantes durante el horizonte de previsión. Esto ayudará a tener una gestión y conciliación óptima entre la cantidad demandada y producida.

1.4.3. Pronóstico de la demanda de piezas de repuesto de automóviles bajo la política de mantenimiento preventivo

En la práctica del mantenimiento, hay una situación donde la sustitución de piezas de repuesto debe ser llevada a cabo en el momento de la programación de calendario o el uso de lo que ocurra primero. Es necesario el pronóstico de la demanda de las piezas, así como de una política preventiva de dos dimensiones, donde las sustituciones de piezas de repuesto se basan tanto en tiempo transcurrido y en el tiempo de uso.

Descripción del problema: El problema principal en esta investigación es establecer un vínculo entre las máquinas instaladas, la política de mantenimiento, y la demanda de piezas de repuesto. Esto es particularmente importante en las primeras etapas del ciclo de vida del producto, cuando se dispone de pocos datos sobre la demanda histórica. Además, en la fase final de su vida útil, el uso de la información de la base instalada permite la reducción o incluso la eliminación de existencias obsoletas. De este modo, las sustituciones preventivas de muchos componentes y partes del automóvil, por ejemplo, neumáticos, filtros de aceite, bujías, y así sucesivamente, se basan en tanto el tiempo transcurrido y el tiempo de uso. La mayoría de los automóviles son accionados a una tasa de uso constante durante un período de tiempo, y luego el kilometraje acumulativo pueden expresarse como una ecuación lineal creciente del tiempo del calendario.

Para realizar el desarrollo de la metodología se siguió los siguientes pasos:

- I.** Se analiza el comportamiento de la demanda
- II.** Se agrega la información de la base instalada como entrada a los métodos tradicionales de pronóstico
- III.** Se verifica la validación a través del control de la previsión como estadísticos de ajuste: el error cuadrático medio (RMSE) y el error medio absoluto (MAE).

Resultados: Se demostró que el modelo presentado se puede utilizar para pronosticar la demanda de piezas de repuesto en un 80%, así como para optimizar repuestos y el

mantenimiento preventivo de forma conjunta cuyos resultados fueron un grado de 85% de eficientes.

1.4.4. Pronóstico con el uso de información de base instalada de piezas de repuesto en una empresa de servicio logístico

La demanda de piezas de repuesto es a menudo difícil de pronosticar usando sólo datos históricos. Por otra parte, las piezas de repuesto suelen llevar un alto riesgo de obsolescencia debido a sus funcionalidades específicas. En consecuencia, las empresas de logística de servicios a menudo tienen dificultades en el justo equilibrio entre la explotación de inventario, falta de existencias y costos de obsolescencia al tiempo que ofrece contratos de servicios competitivos.

Descripción del problema: Mucho se podría ganar si la demanda de piezas de repuesto podría ser mejor pronosticada. Aunque existe una amplia literatura en predicción de series de tiempo, estos métodos no siempre tienen éxito. En primer lugar, las partes y los productos exhiben un patrón de ciclo de vida con un crecimiento inicial, la madurez y una fase de descenso final. En segundo lugar, la demanda del cliente real puede depender del contexto específico, incluyendo el que emplea los sistemas del cliente, el tipo de contratos que tiene, cómo se han mantenido los productos y lo que los estados reales de sus sistemas son. Como resultado de ello, tiene sentido considerar previsión de la demanda utilizando toda la información disponible en la base instalada y nos referiremos a esto con el término de previsión de base instalada. Se analiza el valor de predicción de base instalada de la siguiente manera:

- I.** Primero se hace una comparación con la previsión de datos históricos
- II.** En segundo lugar, se evalúa el valor de la instalación de la base de previsión en caso de una caída de la demanda prevista.
- III.** Se procede a realizar el pronóstico con la base instalada
- IV.** Se considera el efecto de los errores en los datos de base instaladas.

Resultados: Las previsiones de la demanda de piezas de repuesto y el retorno se puede hacer considerablemente más oportuna y precisa utilizando información de la base instalada hasta un 75% de fiabilidad. Se concluyó que existen otras posibilidades de

utilizar los datos de la base instalada para mejorar la fiabilidad de las previsiones. Cuando se pueden prever el tiempo y el tamaño de una caída de la demanda, teniendo en cuenta esta información en las decisiones de almacenamiento y utilización de la política proactiva puede conducir a un significativo ahorro de costos de 15%.

1.4.5. Modelo de pronóstico con serie de tiempo para predecir las fallas de repuesto de cajeros automáticos

La predicción de piezas de repuesto defectuosas es un tema interesante en la gestión de inventario. Por ello, la metodología desarrollada pretende determinar un modelo de pronóstico que le permita determinar con exactitud el tipo de pieza a ser mantenido o necesita ser reemplazado.

Descripción del problema: El fracaso repentino puede ser causada por la expiración de piezas o componentes. La gran cantidad de casos incidentes de los equipos se considera como un gran problema al departamento de mantenimiento. Estos datos de registro de incidentes son unas series de datos temporales que registran los datos de mantenimiento varias veces en un día. Por ello, se utiliza muchas técnicas para pronosticar la demanda y reducir el nivel de inventario en la venta de las piezas. Los autores del presente artículo como parte de su estudio se centraron en el uso de series temporales de datos de los registros de incidentes. Asimismo, el trabajo aplicó analítica predictiva para pronosticar la cantidad futura de piezas de repuesto defectuosas basada en los siguientes pasos:

- I.** Se utilizó datos de series de tiempo de mantenimiento desde el año 2013 hasta el 2016 para entrenar y probar datos para un modelo de predicción.
- II.** En el paso de preprocesamiento, se examinó nuevas características basadas en el conjunto de datos históricos.
- III.** Luego, se agregó la función del día de la semana en el ejemplo del conjunto de datos. La característica del día de la semana tuvo un impacto en el modelo de predicción de piezas de repuesto.
- IV.** Para validar la propuesta de solución al problema identificado se analizó el comportamiento de la demanda a través de los indicadores estadísticos y se seleccionó un modelo que se ajusta a la naturaleza de la demanda.

Resultados: Los experimentos demostraron la exactitud promedio de fallas de repuesto para su predicción. Como resultado del análisis de los modelos de series de tiempo, los autores realizaron la predicción de series temporales de datos el cual arrojó resultados más exactos en comparación con otros modelos de predicción, cuya variabilidad fue de tan solo 5%.

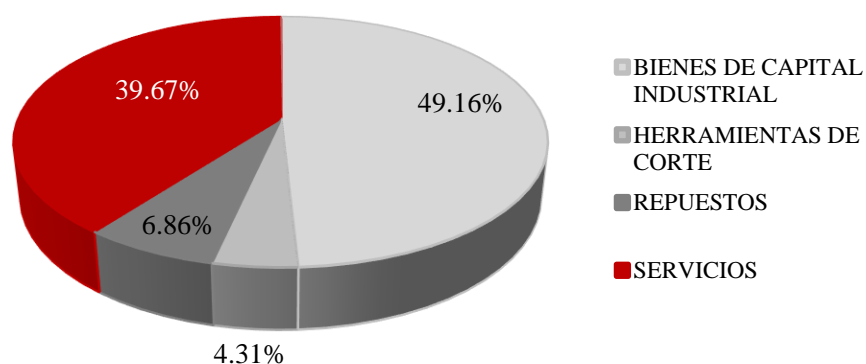
2. CAPITULO 2: DIAGNÓSTICO

2.1. Caso de estudio

2.1.1. Presentación de la empresa

Andes Technology es una empresa con más de 10 años en el mercado que tiene fuertes alianzas con empresas líderes de tecnología en el mundo. La empresa nace en un contexto de alta exigencia y competitividad, teniendo en cuenta que la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías van en ascenso. Esta organización pertenece al sector comercio y de servicios (postventa) de la economía peruana. Su actividad principal es comercializar bienes de capital industrial (máquinas CNC, máquinas de corte láser, robots industriales, etc.) que va acompañado de soluciones tecnológicas completas para empresas del sector industrial e instituciones educativas con el objetivo de mejorar la eficiencia y productividad de sus procesos. Los productos y servicios que ofrece se dividen en 4 grandes unidades de negocio y el ingreso de sus ventas proviene principalmente de dos sectores del mercado, siendo estos la industria y la educación. Según el análisis de los ingresos por cada grupo de negocio, se evidencia que, en las ventas registradas en el año 2018, el ingreso por la venta de bienes de capital industrial representa el 49.16%, por servicios el 39.67% por la venta de repuestos el 6.86%, y herramientas de corte 4.31%. Cabe mencionar, que la venta de repuestos es dependiente de la venta de bienes de capital industrial (Máquinas CNC, Robots industriales, etc.) y de la venta de los servicios de mantenimiento. En la siguiente gráfica se observa los resultados:

Gráfica 6: Representación porcentual del ingreso por ventas del 2018



Fuente: Adaptado de Andes Technology

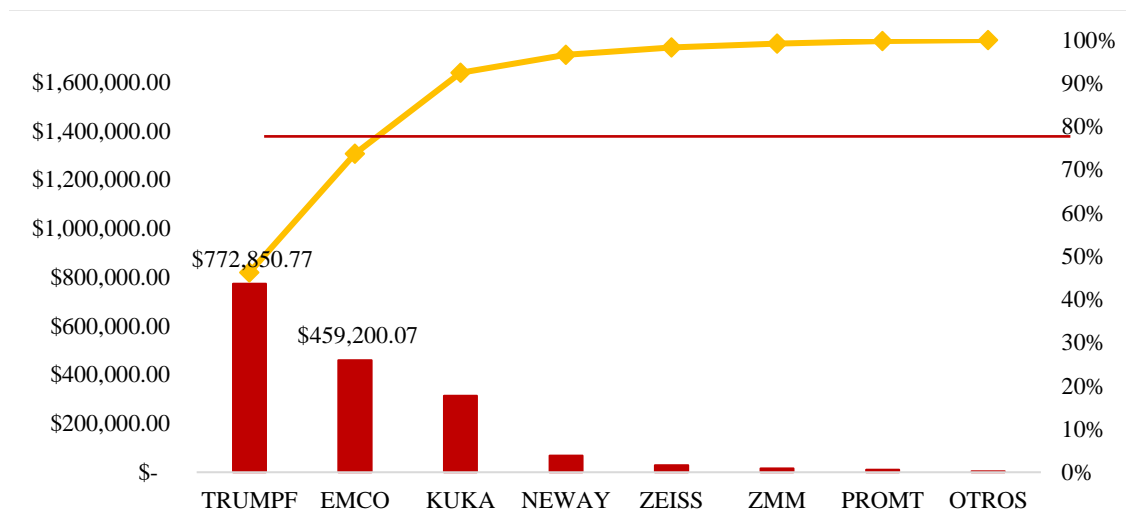
El mercado de la empresa son las industrias del sector manufacturero, tales como minería, metalmecánicas, empresas de producción masiva e instituciones educativas privadas y públicas. Estos sectores de la economía peruana representan un mercado importante para la empresa, dado que ellos apuestan por la adopción de nuevas tecnologías en busca de la mejora de la productividad de sus procesos. Para satisfacer la demanda de los sectores mencionados, la empresa en estudio tiene como principales proveedores a empresas europeas líderes en tecnología, los cuales se detallan a continuación:

Principales marcas representadas

- **Emco:** es uno de los principales fabricantes de máquinas herramienta para el torneado y fresado del mundo.
- **Trumpf:** es una empresa alemana que ofrece soluciones tecnológicas en el campo de las máquinas herramientas para el procesamiento de chapa metálica.
- **Kuka:** ofrece numerosas variantes de robots industriales con las capacidades de carga más diversas y distintos alcances.
- **Zeiss:** es fabricante líder mundial en soluciones de metrología dimensional.

En el análisis de los ingresos de la empresa durante el 2018 se observa que más del 95% de los ingresos proviene de la venta de productos de sus principales representadas.

Gráfica 7: Pareto del ingreso por ventas del 2018



Fuente: Adaptado de Andes Technology

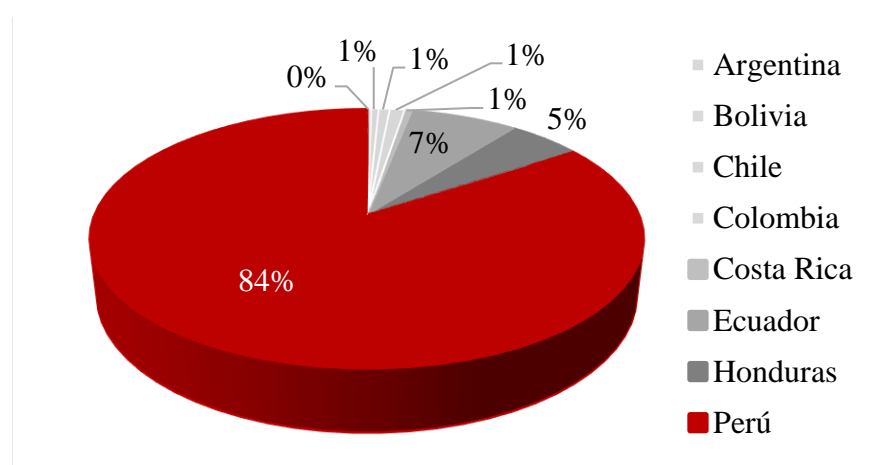
En la gráfica se puede observar que, durante el 2018, el 80% de los ingresos de la empresa en estudio provinieron de la venta de equipos de las marcas Trumpf, Emco y Kuka. El resto del ingreso se registró por la venta de otras marcas que también forman parte de su cartera de productos.

Como se mencionó líneas arriba, la empresa también tiene en su portafolio de productos la venta de repuestos principalmente para los equipos que comercializa, ya que por acuerdos comerciales tiene que brindar soporte técnico (servicio postventa) como garantía por un periodo de un año. Sin embargo, el equipo puede presentar fallas que no se pueden atender como parte de la garantía o cuando ya haya culminado su periodo de garantía, es en estas situaciones que la empresa también provee repuestos a sus clientes. Asimismo, la empresa ofrece a sus clientes, paquetes de servicio de mantenimiento que involucra actividades de mantenimiento correctivo y preventivo.

Análisis de la base instalada

Dado que la empresa es una distribuidora de la tecnología de países de Europa en países de Latinoamérica es importante revisar los registros de la venta e instalación de equipos de diferentes marcas. Este registro se conoce como la base instalada. Según el análisis de la base instalada notamos que el porcentaje de equipos vendidos por marca desde sus inicios de operación hasta la actualidad se ha ido incrementando de manera significativa. Por otro lado, notamos que el mercado de la empresa abarca a varios países de Latinoamérica siendo el principal Perú, más del 80%, tal como se observa en la siguiente gráfica.

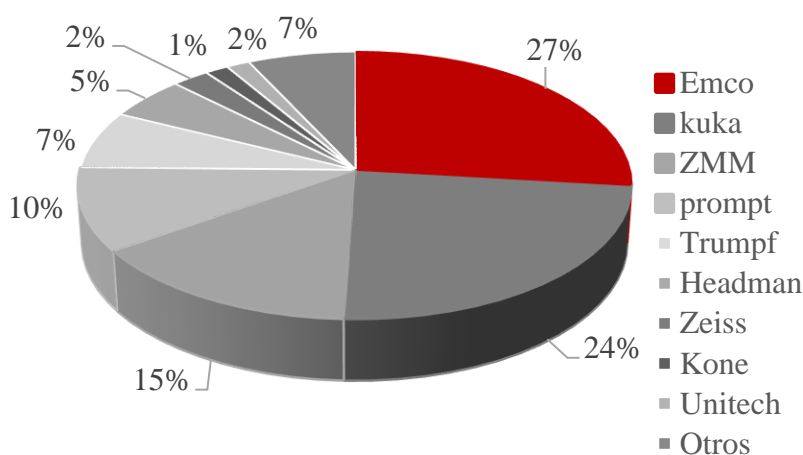
Gráfica 8: Distribución porcentual de equipos vendidos en países de Latinoamérica



Fuente: Adaptado de Andes Technology

A demás, se evidencia que en el Ecuador se tiene más del 7%, en Honduras más de 5% de equipos instalados. Cabe indicar que el análisis se centrará en los equipos instalados en Perú ya que estos representan un porcentaje mayor para la empresa.

Gráfica 9: Distribución de productos vendidos en Perú por marca



Fuente: Adaptado de Andes Technology

En la gráfica 9, se observa que del 84% de equipos instalados en Perú, el 27% pertenecen a la marca Emco, el 24% al de Kuka, el 15% al de ZMM, el 10% al de Prompt, y el 7% al de Trumpf y entre otras marcas. Esta información nos permite evidenciar que existe una relación directa de los ingresos anuales de la empresa. Pues, en el 2018, los mayores ingresos provinieron de la venta de equipos de la marca Trumpf, Emco y Kuka. Cabe indicar que los productos de la marca Trumpf son nuevos para el mercado por lo que en unidades físicas representan un porcentaje reducido pero que en valor monetario significa mucho para la empresa.

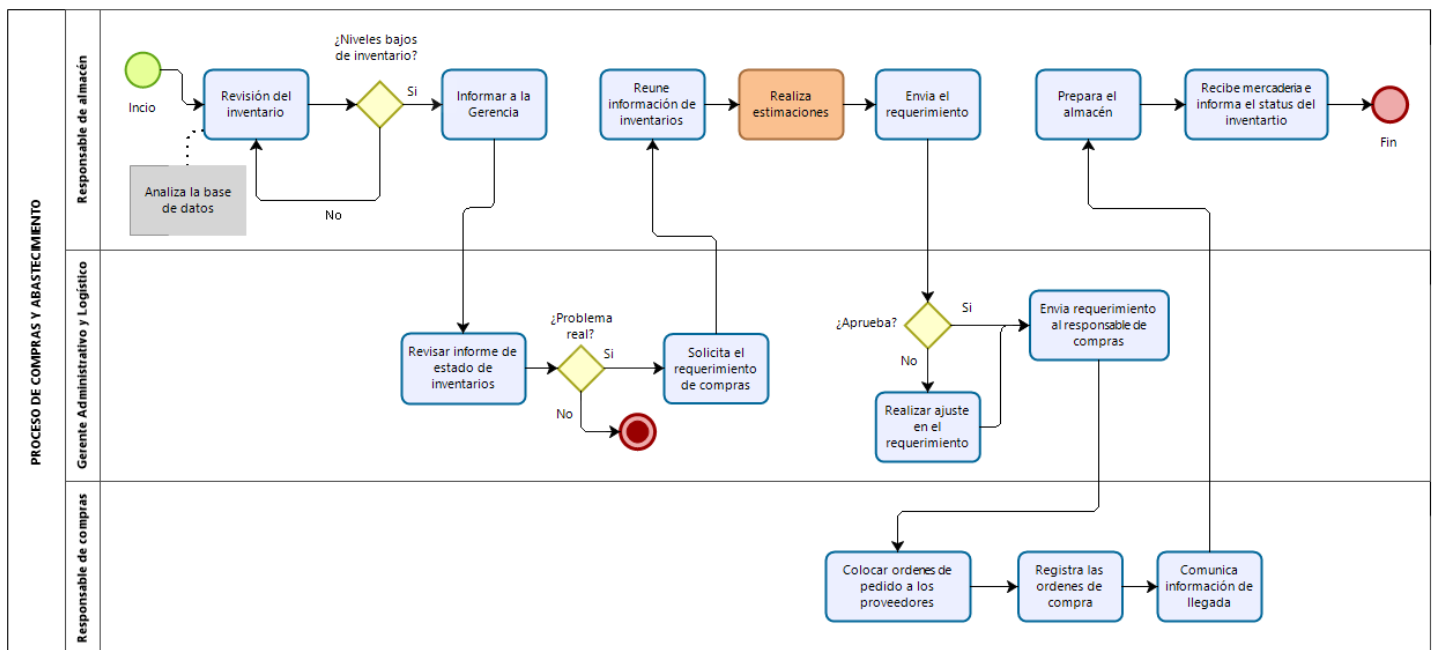
2.1.2. Proceso de compras de la empresa

Una vez analizado el mapa de procesos de la empresa, se ha determinada que los procesos que generan valor son los procesos de compra y venta. Por ello, se profundizará su análisis a fin de determinar mayores detalles de los procesos indicados.

La empresa, como se mencionó líneas arriba, maneja 4 unidades de negocio todos orientados al sector manufacturero y educación. La presente investigación se centrará en la

unidad venta de repuestos pues ésta depende de dos unidades de negocio (la venta de bienes de capital industrial y de la venta de servicios de mantenimiento) que sumados representan más del 95% de los ingresos anuales de la empresa. El campo de estudio es el proceso de compras y abastecimiento de inventarios que, de acuerdo con el mapa de procesos, corresponde el proceso logístico. El proceso de compras y abastecimiento involucra otras actividades que corresponden al proceso logístico de la empresa, pues el responsable de almacén antes de solicitar la compra de los repuestos solicita la aprobación del Gerente Administrativo y Logística y posterior a ello deriva el requerimiento de compra al responsable de compras como se puede apreciar en el siguiente flujograma:

Ilustración 8: Flujograma del proceso de compras y abastecimiento de inventario



Fuente: Adaptado de Andes Technology

En la ilustración 8, se observa que el proceso de compra y abastecimiento se realiza basado en la experiencia y criterio del responsable de almacén careciendo de un sistema de planificación que permita prever con un mínimo error las cantidades a comprar, situación que ha originado problemas para el abastecimiento oportuno de las piezas de repuestos cuando ingresa un requerimiento del cliente. Ya que la estimación de las cantidades a comprar se realiza basándose solo en el criterio y la necesidad del momento.

2.2. Identificación del problema

2.2.1. Problema: Incumplimiento del servicio postventa

El área de Operaciones es la que se encarga de responder por la garantía de los equipos vendida a los clientes. Las garantías consisten en realizar visitas de técnicos de Andes Technology (pagadas anticipadamente) hasta 2 veces al año al cliente, en el que se le hace la revisión de los equipos (preventivo) o algún tipo de reparación y/o recambio de repuesto por fallas.

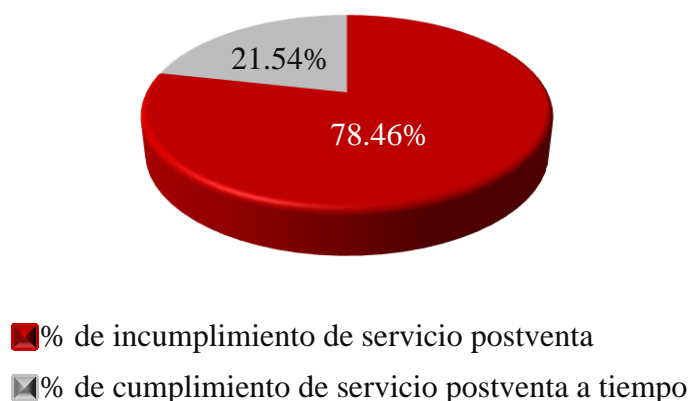
Asimismo, para realizar este servicio postventa el área administrativa es la que se encarga del abastecimiento de los repuestos. Sin embargo, el requerimiento inicial para la solicitud de compra lo hace el encargado de almacén, quien prepara el pedido en base a su experiencia y criterio, ya sea revisando el stock o teniendo en cuenta lo que el área de ventas proyecta vender, situación que genera una alta variación entre la venta estimada y el registro real. Se evidenció que el encargado de almacén genera requerimientos a destiempo y que las cantidades que solicita son insuficientes para abastecer la demanda.

En el análisis se ha diagnosticado que en varias oportunidades los pedidos del cliente ingresan cuando no se cuenta con stock suficiente para atender al cliente. Es en ese momento en el que se solicita la compra del repuesto. Cabe precisar que este proceso demora, ya que los repuestos tienen que ser importados desde Europa, lo cual hace que la atención al cliente demore entre 1 a 2 semanas en promedio. Esto ocasiona pérdidas tanto para el cliente como para la empresa, ya que el cliente no puede hacer funcionar su maquinaria hasta que se le atiende con los repuestos, por lo que la empresa en su afán de atenderlo tiene que tomar acciones para importar el producto en el menor tiempo incurriendo de esta forma en altos costos logísticos y/o tiene que pagar penalidades por incumplimiento del servicio.

Asimismo, se ha identificado que se ha reportado en varias oportunidades que el área de Operaciones se compromete con un pedido sin verificar si tiene stock de repuestos y consumibles. De la misma forma, en este caso, al no contar con stock se coloca la orden de compra a último momento, lo que conlleva a la demora en la entrega de algunas piezas al cliente. En consecuencia, no se cumple a tiempo con el servicio postventa vendido. Cabe resaltar que en un mismo pedido del cliente pueden existir diferentes tipos de repuestos.

Por lo que algunos repuestos del mismo pedido sí se atienden a tiempo, mientras que otros no. De esta forma, se revisó los registros del servicio postventa durante el 2018 y se evidenció que el 78.46% de las veces se completó el servicio fuera de tiempo, tal como se evidencia en la siguiente gráfica.

Gráfica 10: Distribución porcentual del cumplimiento del servicio Postventa

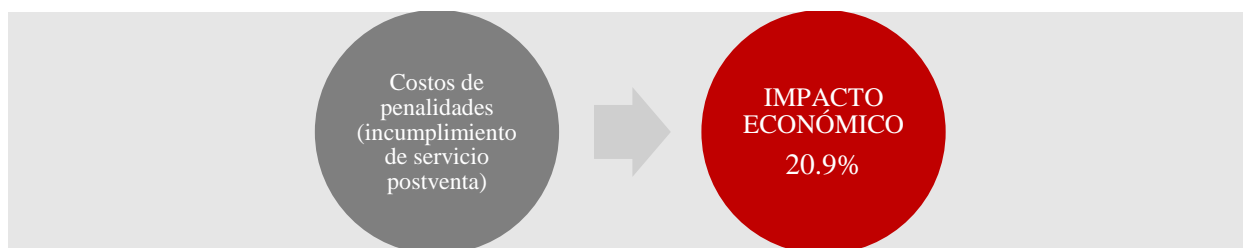


Fuente: Recopilado de Andes Technology.

2.3. Impacto económico del problema: Incumplimiento del servicio postventa

Dado que el principal problema para Andes Technology es el incumplimiento del servicio postventa, el cual se ve afectada en el aspecto económico impuesta por los clientes. Es decir, al responder fuera de tiempo al cliente la empresa tiene que pagar penalidades por el incumplimiento, ya que, al no contar con el repuesto necesario para realizar el mantenimiento correctivo, el cliente se ve perjudicado al parar su producción, lo que significa pérdidas económicas para este. De esta forma, con el objetivo de no verse perjudicada, en demasía, el cliente aplica penalidades a la empresa Andes Technology SAC.

Gráfica 11: Impacto económico



Fuente: Recopilado de Andes Technology

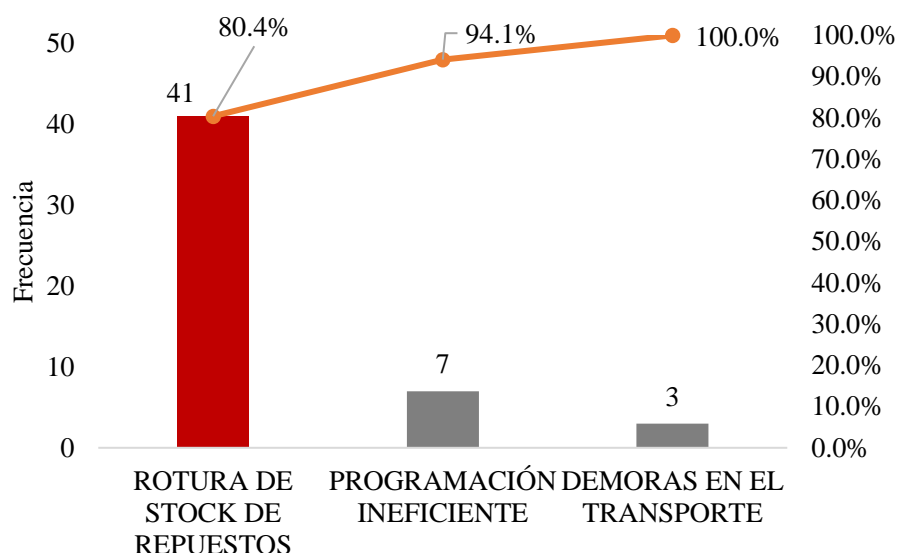
Luego de haber analizado los datos correspondientes, se evidenció que en el 2018 el ingreso por el servicio postventa fue de \$778 087.00, que va ligado con un costo por penalidad de \$162 616.00, siendo así que representa un 20.9 % de costo de penalidad, el cual se pudo haber evitado.

2.4. Análisis de las causas

2.4.1. Causas del problema

Se identificó que, para la empresa en estudio, el principal problema es el incumplimiento de los servicios postventa que se ve afectado con el incremento de piezas de repuesto entregadas fuera de tiempo, es por lo que se realizó un análisis profundo para identificar cuáles serían las principales causas del problema, obteniendo el siguiente Pareto de primer Nivel.

Gráfica 12: Pareto de primer nivel de motivos



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 12, se puede apreciar del total de observaciones o frecuencia de casos por las cuales se presentó el incumplimiento de los servicios postventa, el 80.4% se debe a la rotura de stock de repuestos, seguido de la programación ineficientes con un valor acumulado de 94.1%. Por lo tanto, solucionar la rotura de stock, el cual representa el 20% de las causas, solucionará el 72.5% del problema.

- **Rotura de Stock**

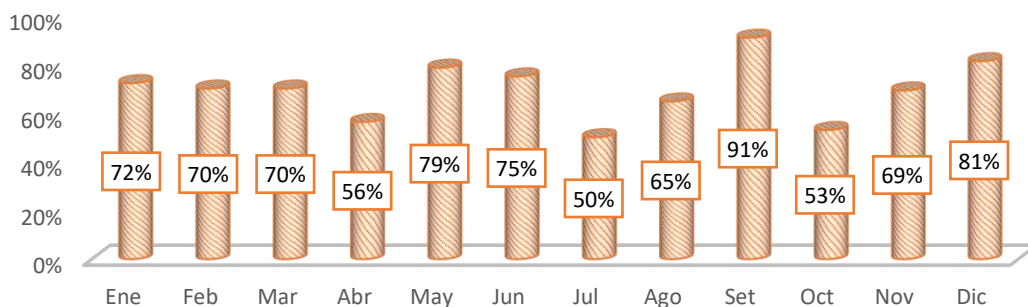
Si bien es cierto, la rotura de stock (o ruptura de stock) puede presentarse cuando la organización se desabastece y como resultado de ello no cuenta con la cantidad suficiente de un producto o una línea de productos, razón por la cual la demanda de los clientes es desatendida. Como ya se mencionó, la empresa en estudio no tiene establecido métodos de reposición de inventario por lo que el abastecimiento de las piezas de repuesto se realiza en base a la experiencia.

Asimismo, en la empresa se identificó lo siguiente:

- 1) No tienen definido el lead time para los artículos a importar, es decir, es variable.
- 2) No se tiene previsto con exactitud las cantidades a comprar por cada tipo de pieza de repuesto.
- 3) No se tiene definido el stock de seguridad que se debe mantener en almacén como una especie de colchón para responder a los requerimientos urgentes de los clientes, por ejemplo, cuando se presenta un mantenimiento correctivo donde se debe sustituir un componente del equipo.

A continuación, se analiza el porcentaje de rotura de stock mensual. Como se aprecia los valores están por encima de 50%, llegando a niveles superiores de 90% en setiembre.

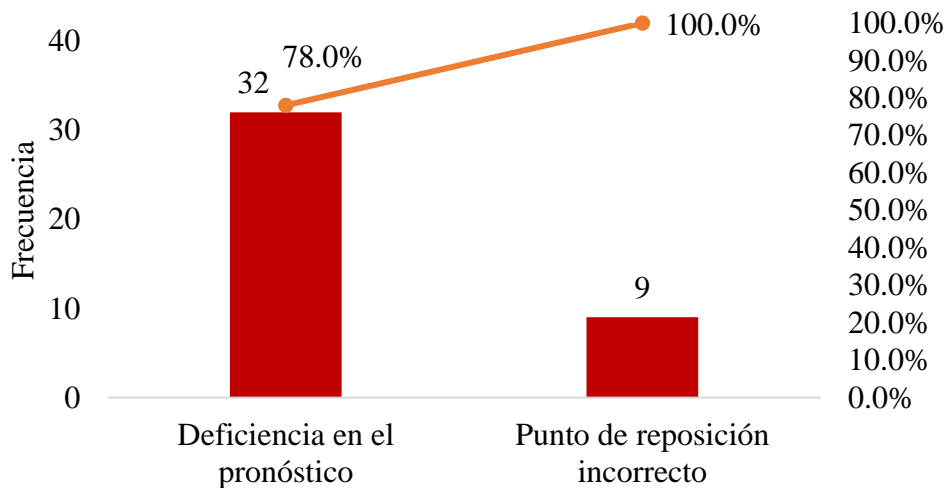
Gráfica 13: Rotura de Stock



Fuente: Recopilado de Andes Technology

Los resultados de rotura de stock evidencian que la empresa no cuenta con un sistema de reposición de inventario de repuestos, ya que no están asignando una política de gestión de inventario considerando el patrón de la demanda de los productos tales como el de sistemas de revisión periódica o continua. De igual manera se realizó el siguiente Pareto de segundo nivel.

Gráfica 14: Pareto de las causas raíz de Rotura de Stock



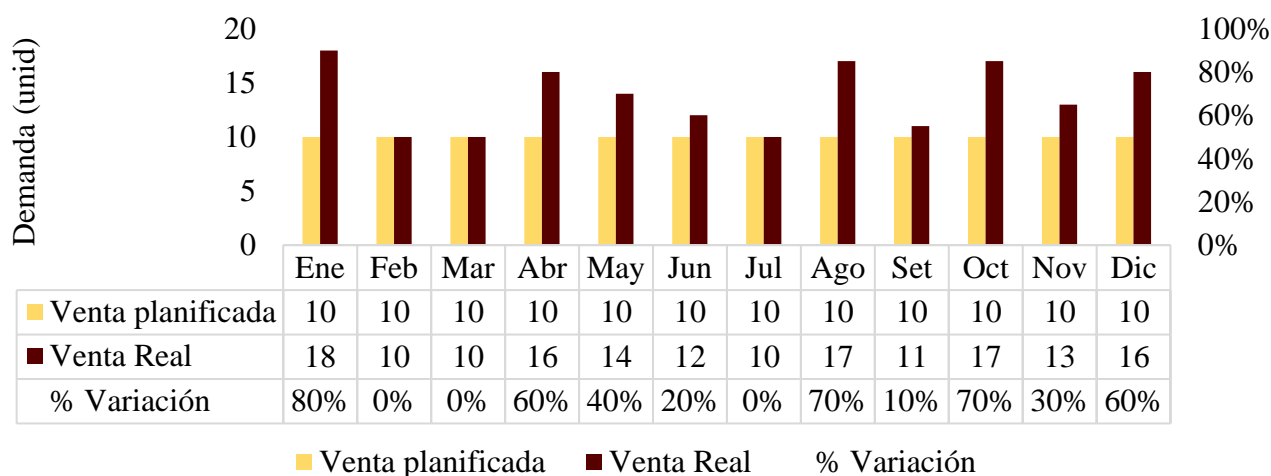
Fuente: Recopilado de Andes Technology

Según el gráfico, se observa del total de casos por las que se presentaron las roturas de stock, el 78.0% se debe a la deficiencia en el pronóstico, seguido del tiempo de revisión incorrecto. Ya que de las 51 veces que se dio una rotura de stock, 32 fueron por deficiencia en el pronóstico.

a. Evidencias de deficiencia en el pronóstico

A continuación, se muestra las deficiencias en el pronóstico realizado en el año 2018 versus la venta real de repuestos. Como se aprecia las ventas estimadas son menores a la venta real a lo largo del 2018. Esto se debe a que la estimación que realizan es de acuerdo con la percepción o lo que cree que venderán según periodo.

Gráfica 15: Venta planificada vs venta real (unidades)

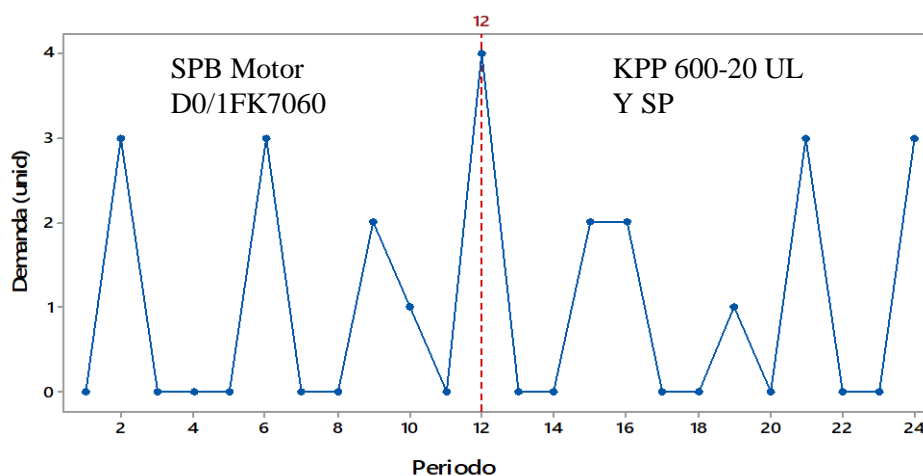


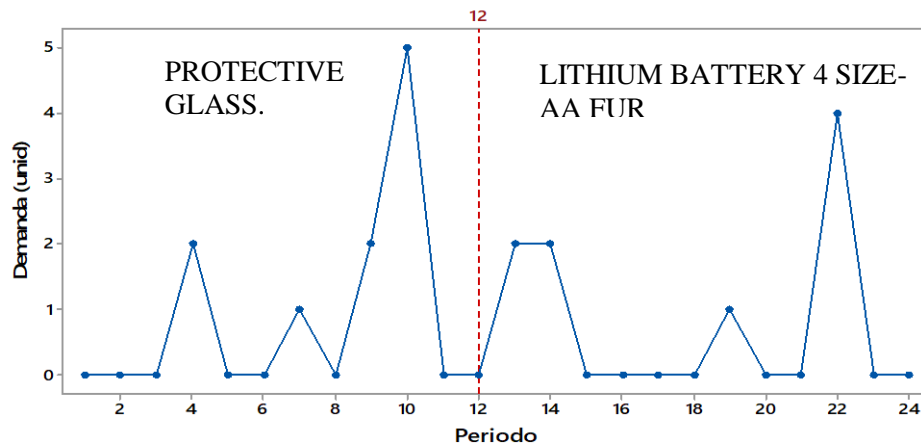
Fuente: Recopilado de Andes Technology

En la gráfica 15, se observa que existe una alta variación en cada periodo siendo el promedio de variación de 37.00%. Es preciso mencionar que las altas variaciones en el pronóstico son debido a que no se están considerando un modelo adecuado según el patrón de la demanda.

No obstante, al verificar el patrón de la demanda de las piezas de repuesto se ha identificado que estas representan un patrón de demanda aleatoria o intermitente como se aprecia en la siguiente gráfica.

Gráfica 16: Patrón de demanda de repuestos





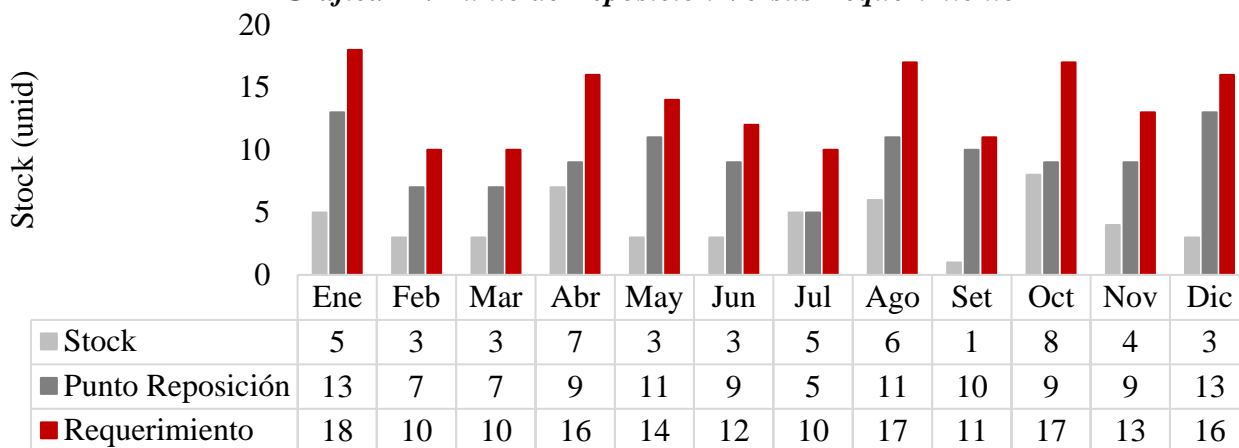
Fuente: Adaptado de Andes Technology

Como se aprecia en el gráfico anterior el comportamiento de los repuestos es de tipo intermitente, lo cual presenta una variabilidad significativa. Sucede que en algunos meses la demanda es nula, es decir se presentan periodos con valores de demanda cero, motivo por el cual requiere de un método especial que se adecue a sus características para obtener una predicción más acertada.

b. Evidencias de Punto de Reposición Incorrecto

Para poder determinar el nivel de participación de las causas indirectas al problema principal se ha realizado el análisis del punto de reposición determinado por la empresa, esto teniendo en cuenta que no se tiene políticas de reabastecimiento. En el análisis se ha determinado que los puntos de reposición se establecen cuando llega un pedido o requerimiento del cliente. Es decir, se acelera el proceso de reabastecimiento de las piezas de repuesto.

Gráfica 17: Punto de Reposición Versus Requerimiento



Fuente: Adaptado de Andes Technology

Según el gráfico anterior, significa que cuando llegó la orden del cliente, existía una cantidad menor a lo requerido por lo que en ese mismo instante se realizó la reposición, generando de esta forma la rotura de stock, así como el retraso en la entrega del repuesto y por ende el retraso en el tiempo de entrega de los servicios.

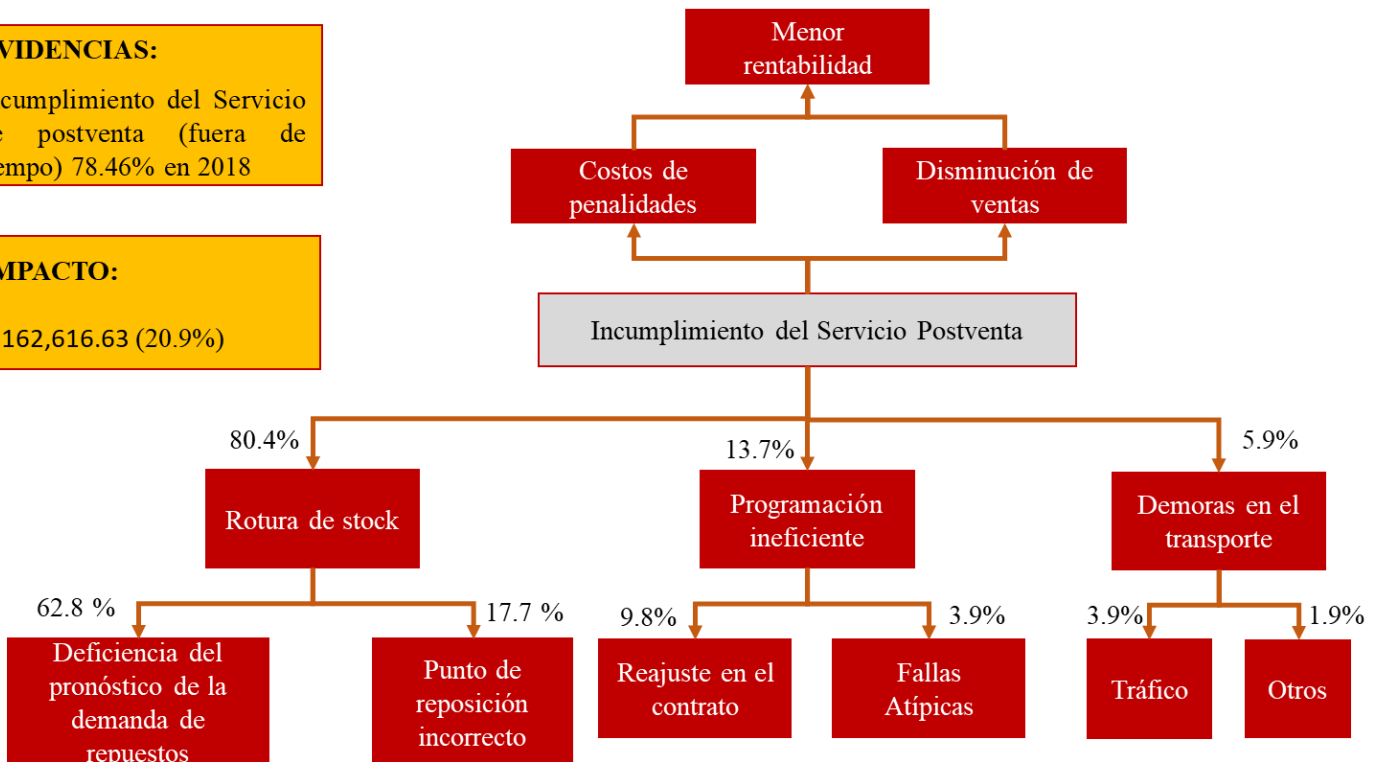
2.4.2. Vinculación de problemas y consecuencias

Según el análisis realizado de las principales causas del problema, se tiene el esquema de vinculación de problemas y efectos, donde se evidencia que el problema principal es el “incumplimiento de los servicios postventa” que se debe principalmente a las siguientes causas directas: i) rotura de stock, ii) programación ineficiente y iii) demoras en el transporte. El efecto directo del problema identificado son los altos costos por penalidades y la disminución de ventas que se traducen en la obtención de una menor rentabilidad. El esquema de la problemática se observa en la siguiente ilustración.

Ilustración 9: Árbol de problemas

EVIDENCIAS:
Incumplimiento del Servicio de postventa (fuera de tiempo) 78.46% en 2018

IMPACTO:
\$ 162,616.63 (20.9%)



Fuente: Elaboración propia

2.5. Hipótesis

El Diseño de un Sistema de Abastecimiento de repuestos basado en algoritmo de pronóstico de fallas y revisión continua permitirá entregar los servicios Postventa a tiempo logrando reducir los costos de penalidades en una Pymes del sector servicios.

3. CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA

Finalizado el diagnóstico de la situación actual de la empresa en estudio, en este capítulo se va a desarrollar la propuesta de mejora con la finalidad de eliminar la causa raíz del problema identificado.

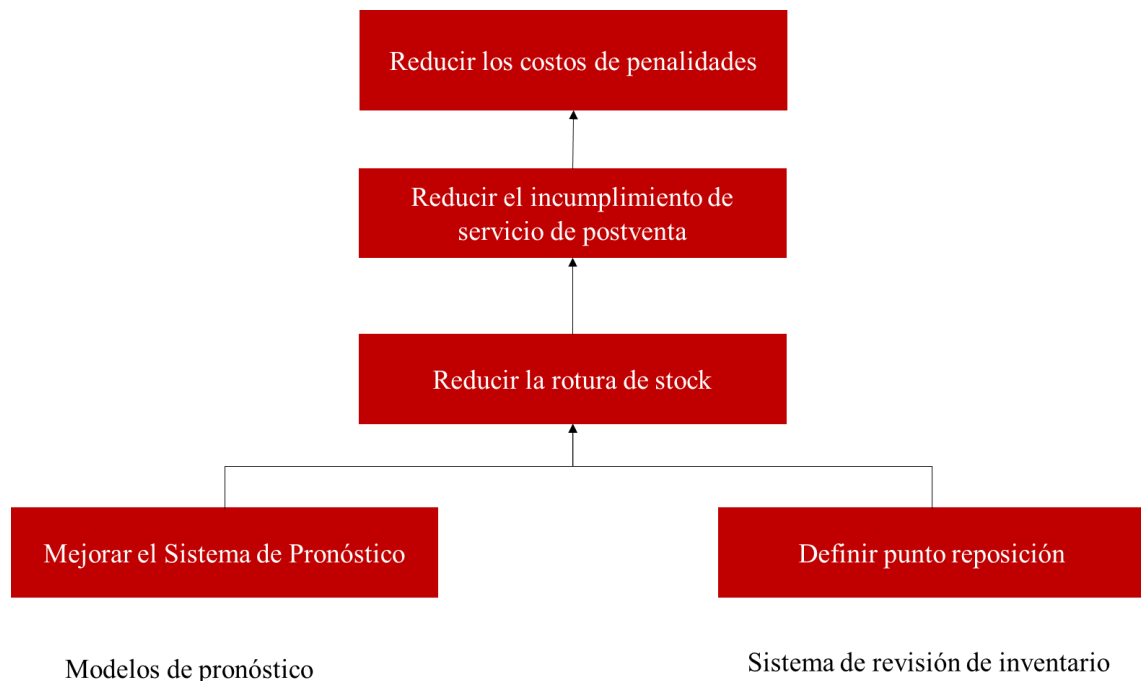
Cabe precisar que en el presente estudio nos enfocaremos en el estudio de un sistema de abastecimiento de piezas de repuesto teniendo en cuenta la información del ciclo de vida de los equipos y se propondrá un método de pronóstico considerando que el patrón de la demanda de los repuestos presenta un comportamiento intermitente.

3.1. Diseño del modelo

En el diagnóstico (capítulo anterior) se verificó que la empresa en estudio, Andes Technology SAC, viene gastando cerca de \$ 162 616.63 dólares en costos de penalización debido al incumplimiento de los servicios postventa. Pues, los registros del último año evidencian que el incumplimiento del servicio postventa supera el 78.46% siendo permitido solo de 20 a 25 % en el sector.

El incumplimiento de los servicios postventa se debe principalmente a la rotura de stocks, a la programación ineficiente de los servicios y a las demoras en el transporte que son causados por la deficiencia del proceso de pronóstico de la demanda de repuestos, la fijación de un punto de reposición incorrecto, los constantes reajustes en el contrato de prestación de los servicios, fallas atípicas, las horas punta de tránsito (tráfico) y entre otras que dificultan el transporte. En tal sentido, el objetivo de la propuesta es reducir los costos de penalidades. Por ello, se presenta el árbol de objetivos que nos permite determinar qué técnicas a utilizar para solucionar la causa raíz del problema.

Ilustración 10: Árbol de Objetivos



Fuente: *Elaboración propia*

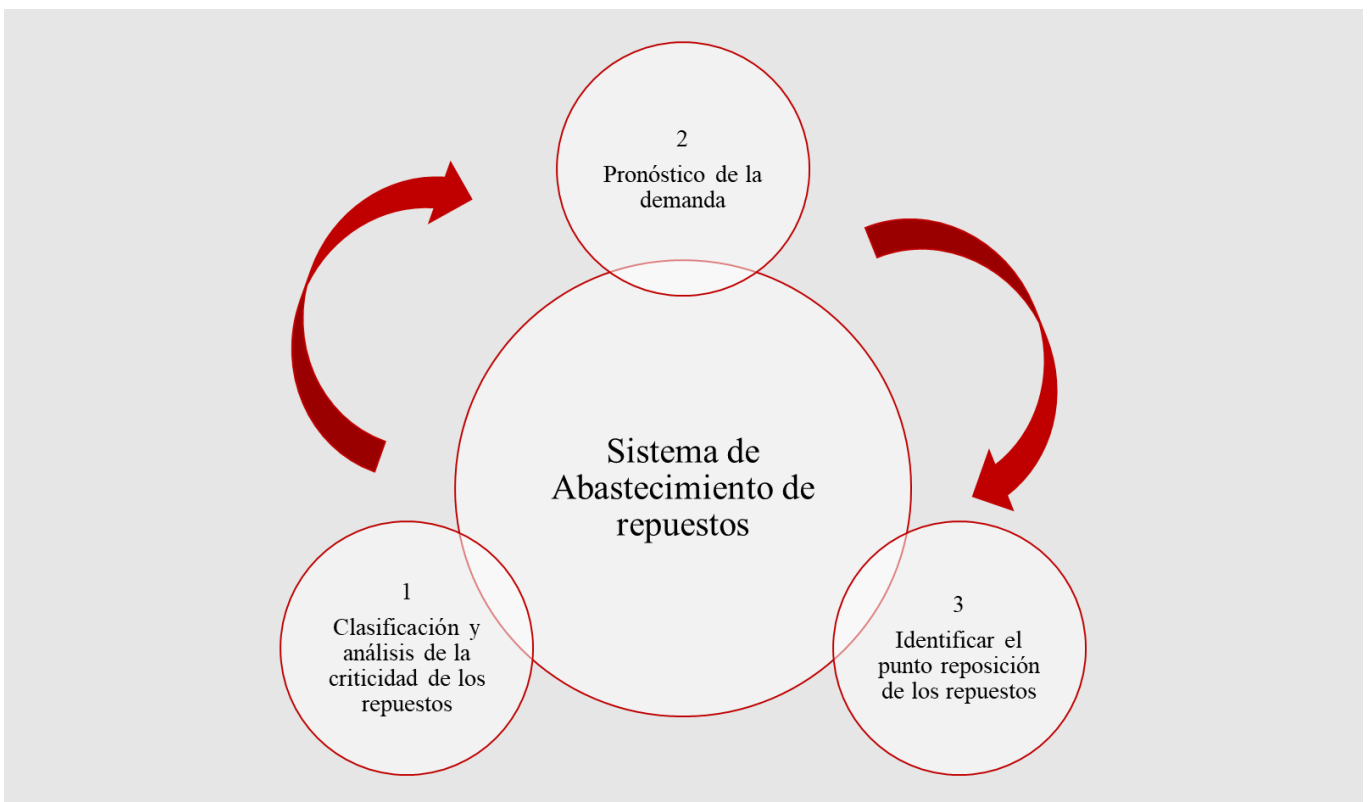
Del árbol de objetivos presentado, se identifica que las técnicas a utilizar para solucionar la causa raíz del problema consistente en la aplicación de los modelos matemáticos de pronósticos, análisis de criticidad y la aplicación de sistema de revisión de inventario de repuestos.

Tomando en cuenta los aportes hallados en el estado del arte, se ha diseñado un modelo de Sistema de Abastecimiento de Repuestos como se observa en la **ilustración 11**. Cabe señalar que el modelo propuesto por los autores Boylan & Syntetos, (2010) es el núcleo del nuevo modelo. Pues, este modelo principalmente fue desarrollado para realizar el pronóstico de una demanda por lo que presenta una deficiencia, ya que no se sabe con exactitud la criticidad de los elementos y/o repuestos y no se considera que en el contexto de las piezas de repuestos el surtido de los elementos presenta un comportamiento heterogéneo por lo que un análisis ABC simple (de un solo criterio) no se considera como el más adecuado. Por ello, proponemos añadir el uso de otras técnicas de clasificación que permita considerar múltiples criterios como el tiempo de abastecimiento, la probabilidad de fallo de la máquina, la fiabilidad del proveedor, entre otros. Es decir, un análisis de

criticidad de control que permita la posibilidad de controlar la disponibilidad de las piezas de repuestos (Molenaers et al., 2012).

Por otro lado, se propone utilizar la información de la base instalada tal como lo indican los autores Van der Auweraer et al., (2019). Sin embargo, se ha identificado que existe una deficiencia ya que esta información se incrementa a medida que va aumentando la venta de equipos y se hace complejo por lo que resulta necesario utilizar softwares sofisticados. No obstante, se utilizará la base instalada para obtener la información para realizar la previsión de la demanda de las piezas de repuesto. Esto debido a que la empresa en estudio lleva el registro completo de las ventas de las máquinas y sus componentes. Asimismo, proponemos emplear los modelos presentados por los autores Mattia et al., (2013) en su primer estudio y en sus siguientes publicaciones que nos permite realizar la previsión de las fallas durante la vida útil de una máquina que posteriormente se convierte en la demanda pronosticada de los componentes (repuestos). Finalmente, proponemos identificar el punto de reposición para cada componente aplicando un sistema de revisión continua.

Ilustración 11: Modelo de Sistema de Abastecimiento de Repuestos



Fuente: Adaptado de Boylan & Syntetos, (2010)(Santa Cruz & Corrêa, 2017)(Santa Cruz & Corrêa, 2017)(Santa Cruz & Corrêa, 2017), René Santa Cruz & Corrêa, (2017), Van der Auweraer et al., (2019), Dekker et al., (2013) y Armenzoni et al., (2015)

El primer paso del modelo propuesto indica la clasificación y análisis de la criticidad de los repuestos. Pues, en este paso primeramente se realiza la clasificación de los equipos vendidos por la empresa en estudio en base a los registros de la base instalada. La clasificación se realiza en base a dos criterios: marca y modelo. Es decir, se obtiene una clasificación de los equipos vendidos por familia. Luego, se determina la lista de repuestos para la familia de equipos y se realiza el análisis la criticidad de estos teniendo en cuenta como criterio las condiciones logísticas, tipo de mantenimiento, probabilidad de fallo y criticidad de los equipos que finalmente se clasifican los repuestos en cuatro categorías: artículos no críticos (nivel 4), artículos estratégicos (nivel 3), artículos críticos (nivel 2) y artículos especiales (nivel 1)

Posterior a la clasificación y análisis de la criticidad de los repuestos, se pasa a realizar la previsión de la demanda a través de la aplicación del algoritmo de pronóstico de fallas propuesto. Cabe precisar que, como información de entrada se considera el ciclo de vida de los equipos. Ya que las condiciones del ciclo de vida nos permiten realizar la previsión de la demanda de los repuestos.

Finalmente, los datos de demanda estimada se usan para determinar una política óptima de reordenamiento; es decir, una política que busca determinar el tiempo ideal para colocar la orden compra.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo general

Reducir el incumplimiento de los servicios postventa mediante la aplicación del algoritmo de pronóstico de fallas basado en el ciclo de vida de los productos y revisión continua para una mejor gestión del inventario de repuestos.

3.2.2. Objetivos específicos

- 1) Reducir la rotura del stock de inventario de piezas de repuesto.

- 2) Mejorar el sistema de pronóstico a través de la aplicación del algoritmo de pronóstico de fallas basado en el ciclo de vida de los productos.
- 3) Establecer una política óptima de gestión de inventario de piezas de repuesto.

3.3. Indicadores

1) Porcentaje de cumplimiento de servicios postventa (eficiencia)

Como primer indicador para medir la eficacia y eficiencia del modelo propuesto se medirá el porcentaje de cumplimiento de los servicios postventa. Ya que con la adecuada previsión de la demanda y abastecimiento de los repuestos se espera incrementar la eficiencia de los servicios postventa. A continuación, se detalla la fórmula matemática que nos permitirá obtener los resultados esperados:

$$\frac{\text{Nº servicios postventa realizados a tiempo en el periodo}}{\text{Total de servicios postventa atendidos en el periodo}} \quad \text{Ecuación 12}$$

2) Porcentaje de rotura de stock

Otro indicador que se utilizará es el porcentaje de rotura de stock de repuestos. Ya que se espera reducir las constantes roturas de inventario. La fórmula matemática que nos permitirá medir se describe en la ecuación 9.

3) Tiempo promedio entre reparaciones

El tiempo promedio entre reparaciones es un indicador internacional que nos permitirá medir la efectividad de restituir el equipo (máquina) a sus condiciones iniciales. De esta manera, se espera reducir el tiempo de espera de los clientes. A continuación, se detalla la fórmula matemática que nos permitirá obtener los resultados esperados:

$$\frac{\text{Tiempo total empleado en restaurar la operación de una máquina}}{\text{Número de fallas en el periodo}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

3.4. Diseño de la propuesta

A continuación, se desarrolla el diseño del modelo propuesto, como primer paso se debe desarrollar una clasificación de los equipos vendidos, determinar la lista de repuestos y determinar la criticidad de cada repuesto.

3.4.1. Clasificación de los equipos vendidos

Dado que la empresa en estudio maneja una gran variedad de marcas en su portafolio de productos y su administración requiere de esfuerzos para la importación y su posterior entrega al cliente, la gestión de los servicios postventa resulta ser crítica, ya que los servicios dependen de la disponibilidad de los repuestos y los costos de penalización por falta de existencias resultan importante para la empresa.

Teniendo en cuenta los criterios de clasificación y los objetivos del modelo propuesto se realizará la clasificación de los equipos vendidos en base a dos factores: marca y modelo. Cabe precisar que se priorizará las principales marcas que representa la empresa en estudio como son Emco, Kuka, Trumpf y Zeiss. Además, se tomará en cuenta la cantidad de equipos vendidos hasta la actualidad.

- **Criterio marca, equipo y modelo**

Como se ha mencionado anteriormente, la empresa en estudio tiene una amplia cartera de productos, así como una diversidad de marcas. En tal sentido, la primera clasificación se realizará teniendo en cuenta el número de equipos vendidos y puestos en marcha por marca. La segunda clasificación de los equipos vendidos se realiza por modelo. Mediante este análisis se logra clasificar como una familia de productos.

Una vez que se ha determinada la familia de equipos vendidos (por marca, equipo y modelo) se realiza el listado de repuestos pertenecientes a cada familia de equipos. De esta manera se logra identificar cada uno de los repuestos para un grupo determinado de equipos, ya que un mismo repuesto es compatible para otros modelos de equipo.

3.4.2. Análisis de la criticidad de los repuestos

Luego de haber realizado una simple clasificación de los equipos vendidos e instalados, se procede a analizar la criticidad de los repuestos para cada familia de equipos identificados.

Pues, tratándose de las piezas de repuestos se debe tener en cuenta que las características de estos hacen que el proceso de clasificación no es una tarea fácil por lo que es necesario analizar a través de múltiples criterios debido a que el surtido de las piezas de repuestos es más heterogéneo. Es por esta razón, tomaremos el aporte de los autores Molenaers et al., (2012), desarrollados en el capítulo 1, pues se debe clasificar las piezas de repuestos de acuerdo a un sistema de clasificación de múltiples criterios que se expresa a través de un diagrama de decisión lógica y la técnica de atributos múltiples (AHP). Para el análisis de la criticidad se debe tener en cuenta que existen muchos criterios, así por ejemplo se debe considerar que la criticidad de una pieza de repuestos está en función a su fallo o mal funcionamiento o a la facilidad de sustitución, entre otros. Por ello, teniendo en cuenta el impacto de los criterios a considerar para el análisis de las piezas de repuesto en estudio se utilizará los siguientes criterios de criticidad.

Tabla 1: Lista de criterios de criticidad

Criterio de Criticidad	Descripción
Criticidad del equipo	El criterio de criticidad de equipos hace referencia a la clase de criticidad de los equipos vendidos e instalados. Pues, la empresa en estudio clasifica sus equipos vendidos en tres clases A, B y C según su análisis de riesgos.
Probabilidad de fallo del repuesto	La probabilidad de fallo se entiende como la probabilidad de fracaso o avería del repuesto.
Tiempo de reposición	Se toma en cuenta el tiempo total transcurrido desde que se coloca la orden de pedido hasta que el repuesto es recibido, comprobado y almacenado para su uso.
Número potencial de proveedores	Hace referencia al número de proveedores disponibles que cuentan con la capacidad para entregar un pedido de repuesto.
Disposición de recursos técnicos	Hace referencia a la disposición de las especificaciones técnicas como el listado de material, dibujo CAD-CAM, etc.
Tipo de mantenimiento	Se considera el tipo de mantenimiento que se realiza al equipo.

Fuente: Molenaers et al., (2012)

Una vez que se haya definido los criterios a utilizar es necesario establecer los puntos o escalas de corte. Pues, se establece 3 escalas de criterios que son deseable, esencial y vital. Cada una de estas escalas de corte tiene valores definidos que se indican en la tabla 3. Cabe precisar que la escala de corte “deseable” indica que el repuesto dispone de los resultados más preferibles al evaluar en términos de criticidad. Mientras tanto la escala de corte “esencial” indica el término medio de los criterios establecidos; en cambio, si los resultados superan esta escala las piezas de repuesto se clasifica como “vital”. Asimismo, es importante recalcar que para el criterio “tipo de mantenimiento” solo existen dos posibles alternativas distintas mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo. Por eso, cuando se trata de este último, la pieza de repuesto se considera que es de un nivel de criticidad baja en comparación con la pieza de repuesto que se considera el mantenimiento correctivo.

Tabla 2: Escala de corte para los criterios de criticidad

Criterios de criticidad	Escala de corte		
	Vital	Esencial	Deseable
Criticidad de equipos	Criticidad de clase A	Criticidad de clase B	Criticidad de clase C
Probabilidad de fallo del repuesto	$\geq 80\%$ / año	$\geq 20\%$ a $< 80\%$	$< 20\%$
Tiempo de reposición	> 1 mes	> 2 días ≤ 1 mes	≤ 2 días
Número potencial de proveedores	Solo 1 proveedor	> 1 y ≤ 3 proveedores	> 3 proveedores
Disponibilidad de recursos técnicos	No disponible	Especificaciones generales disponibles	Especificaciones generales disponibles

Fuente: Molenaers et al., (2012)

Luego de haber establecido las escalas de corte para cada uno de los criterios de criticidad, se establece la secuencia de la evaluación. Como primer punto se evalúa la criticidad de los equipos, seguido de la probabilidad de fallo. Los tres criterios siguientes, tiempo de reposición, número potencial de proveedores y disponibilidad de los recursos técnicos, son evaluados como las características logísticas. Cabe precisar que para obtener los límites para

las características logísticas se realizó un previo análisis de jerarquización de la evaluación de cada uno de los criterios como deseable, esencial y vital como se observa en el anexo 1.

Tabla 3: Pesos para la evaluación de las características logísticas

Criterios	Peso establecido para las características logísticas		
	Vital	Esencial	Deseable
Tiempo de reposición	0.046	0.104	0.519
Número potencial de proveedores	0.005	0.018	0.041
Disponibilidad de recursos técnicos	0.015	0.079	0.173
Características logísticas	[0.066 – 0.260]	[0.261 – 0.602]	[0.603 – 0.734]

Fuente: Molenaers et al., (2012)

Para completar el análisis de la criticidad de los repuestos es necesario establecer también los niveles de criticidad que consiste en clasificar en cuatro niveles de acuerdo con la evaluación de los criterios establecidos líneas arriba. En ese sentido, los niveles de criticidad en que se clasificaran las piezas de repuesto se describe en la siguiente tabla.

Tabla 4: Niveles de criticidad

Nivel	Descripción
1: Alta	La ausencia o la No disponibilidad de una pieza de repuesto genera una condición inaceptable por parte de los clientes ya que implica tener un largo tiempo de parada de la operación de la planta. Por ello, se requiere el suministro inmediato de las piezas de repuesto.
2: Medio	La ausencia o la No disponibilidad de una pieza de repuesto genera una condición inaceptable, pero las consecuencias pueden ser corregidos o controlados. Se requiere que el suministro de las piezas de repuesto sea dentro de un corto periodo de tiempo.
3: Baja	La ausencia o la No disponibilidad de las piezas provocan una condición aceptable. Se requiere que el suministro de las piezas de repuesto sea después de un periodo de tiempo más largo.

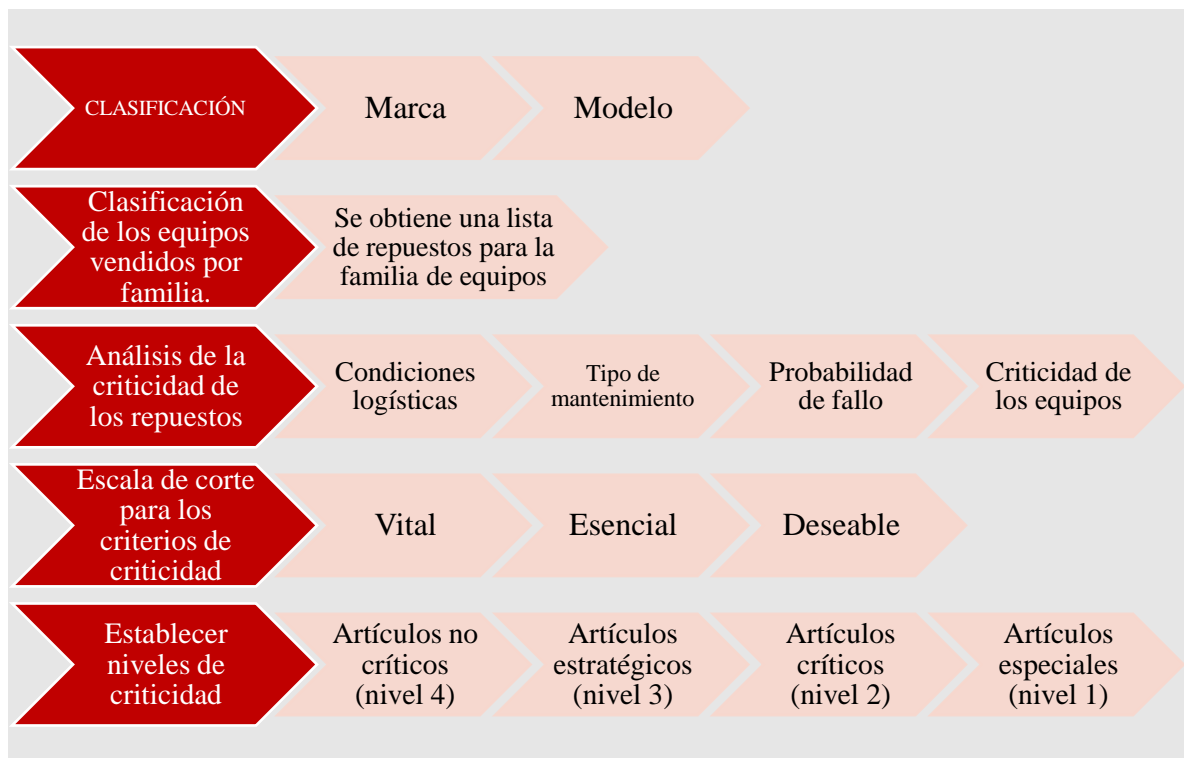
4: Nula	La No disponibilidad de las piezas de repuesto no causa ningún efecto negativo en los procesos por lo que el suministro debe ser después de un largo periodo de tiempo.
---------	---

Fuente: Molenaers et al., (2012)

Finalmente, se debe realizar el análisis de la criticidad para cada pieza de repuesto teniendo en cuenta el diagrama de clasificación de la criticidad de los repuestos que recopila todos los criterios de evaluación y en base a los puntos de corte permite identificar la criticidad para cada repuesto. Es preciso, indicar que el diagrama es un algoritmo para obtener la criticidad de los repuestos. Pues, con ello se logra obtener una clasificación acertada para cada artículo. El análisis de la criticidad inicia evaluando la criticidad de los equipos vendidos, que previamente la empresa en estudio lo realiza en base al análisis de los riesgos. Luego, analiza la probabilidad de fallo, las características logísticas y el tipo de mantenimiento como se aprecia en la siguiente gráfica.

En resumen, la primera etapa del modelo propuesto consiste en realizar un análisis de clasificación y posterior evaluación del nivel de criticidad de las piezas de repuesto. Las actividades que se deben seguir se resumen en la ilustración 13, siendo el primer paso realizar la clasificación de la base instalada por marca y modelo. La cual nos permite preparar una lista de piezas de repuesto por cada familia de equipos. El segundo paso consiste en establecer los criterios de evaluación, luego establecer los niveles de corte. Finalmente, se debe definir los niveles de criticidad.

Ilustración 13: clasificación y análisis de criticidad



Fuente: Adaptado de Castro Zuluaga et al., (2011) y Molenaers et al., (2012)

3.4.3. Pronóstico de la demanda

Finalizado el análisis de clasificación de la criticidad de cada pieza de repuesto se pasa a realizar la previsión de la demanda de estos. Para realizar el pronóstico de la demanda de las piezas de repuesto se debe emplear el algoritmo de pronóstico de fallas que emplea como datos de entrada la información de la base instalada de la empresa y proporciona como resultado la demanda de las piezas de repuesto que la empresa debe suministrar durante la vida útil de las máquinas vendidas. Cabe precisar que el pronóstico se realiza en base al ciclo

de vida de los productos. En ese sentido, se debe conocer el ciclo de vida comercial del producto, así como su vida útil. Pues, el ciclo de vida comercial consiste en 4 etapas como se indica en el capítulo 1 (introducción, crecimiento, madurez y declive). Por el contrario, la vida útil hace referencia a las horas (años) de operatividad de la máquina.

Teniendo en cuenta los conceptos indicados líneas arriba, es necesario tener en cuenta las siguientes premisas:

- Una máquina industrial es un equipo complejo formado por un conjunto de componentes mecánicos incluyendo las piezas de repuestos.
- Para cada máquina industrial se conoce los datos de su vida útil como la fecha de inicio de operación que se expresa en escala absoluta (La máquina se vende, instala y comienza a trabajar en el tiempo $t=0$).
- El tiempo final de trabajo de la máquina indica el valor final de la vida útil del producto.
- Se conoce el ciclo de vida comercial de cada equipo, así como la cantidad total de máquinas instaladas (con vida útil vigente).
- De cada pieza de repuesto, así como el propio equipo se tiene el registro del tiempo promedio entre fallas (MTBF) o el tiempo promedio entre reparaciones (MTTR).

En base a las premisas antes indicadas, a través de los valores del MTBF y el MTTR como primer punto se calcula la primera tasa de fracaso (fallo) del componente instalado. Es decir, el primer tiempo transcurrido desde la fecha de instalación de la máquina (t_i) y el primer fallo del componente se calcula con la siguiente ecuación:

$$t_i = - \frac{1}{\lambda * \ln(rnd)} + S_t \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

$\text{rnd} = \text{Número aleatorio } [0; 1]$

S_t : Indica el tiempo de inicio de funcionamiento (a partir de la vida útil de la máquina)

Cabe precisar que:

- MTBF es el tiempo promedio que transcurre entre dos fallas de la máquina
- MTTR indica el tiempo requerido para reemplazar una pieza de repuesto una vez que se produce el fallo.

Una vez que se ha calculado la primera falla se procede a calcular la probabilidad de fallo durante la vida útil total de la máquina teniendo en cuenta que el tiempo promedio entre reparación sigue una distribución estadística lognormal y empleando la siguiente formula:

$RT \sim \log N(\mu; \sigma^2)$

$$t_i = -\frac{1}{\lambda * \ln(rnd)} + S_t + RT + t_{i-1} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

t_i : Es la semana de ocurrencia de la ruptura i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

t_{i-1} : Es la semana donde ocurre la ruptura $i-1$

El cálculo de la ocurrencia de la ruptura se repite para cada nueva máquina vendida e instalada por la empresa en estudio siempre considerando el ciclo de vida comercial del producto y los registros del comportamiento de las fallas en tiempo, así como el tiempo de demora para reponer un repuesto.

El resultado que se obtiene representa la demanda de las piezas de repuestos. Es decir, el valor medio resultante de todas las operaciones se interpreta como la demanda de las piezas de repuestos, los cuales se emplearán para determinar la política óptima de gestión de inventario.

Sin embargo, se debe realizar la “medición del error del pronóstico” a través de los 3 indicadores que se mencionan en el capítulo 1: error del pronóstico, desviación media absoluta (MAD) y error porcentual absoluto medio (MAPE). Pues estos indicadores nos permitirán evaluar la efectividad de la previsión de los valores de la demanda de piezas de repuesto.

3.4.4. Determinación del punto reposición

Luego de haber realizado la previsión de la demanda se realiza el cálculo del stock de seguridad, el punto de reposición y el lote óptimo, según las ecuaciones 9, 10 y 11.

Para el cálculo de lo indicado líneas arriba se debe considera un nivel de servicio de 95% ($Z= 1.93$)

3.5. Consideraciones para la Implementación

Las consideraciones para tener en cuenta es que la entidad debe estar comprometida con la propuesta de solución, ya que se necesita del apoyo y colaboración para la implementación de la propuesta, así como para brindar información respecto a la base instalada de las maquinarias según cliente. Por otro lado, es necesario llevar a cabo un plan de “gestión de cambio y transferencia de conocimiento” para poder asegurar la adecuada implementación y eficacia de la propuesta.

De la misma forma, el personal involucrado para ejecutar el proyecto debe estar comprometido con la implementación. Para ello, se propone realizar un programa de sensibilización y capacitación, cuyo contenido involucre las principales definiciones del diseño propuesto. Así como, una explicación del flujograma de funcionamiento del diseño, con la finalidad, de que los colaboradores puedan entender con mayor facilidad el sistema propuesto.

4. CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA

Habiendo realizado la propuesta de mejora a las operaciones de la empresa Andes Technology SAC que principalmente consiste en obtener mejoras en su proceso logístico de abastecimiento de las piezas de repuesto para la prestación de los servicios postventa. Pues, hay que recordar que los servicios postventa van acompañados por la venta de piezas de repuestos, así como de consumibles. En ese sentido, es necesario realizar la evaluación del impacto de la propuesta desarrollada tanto en los costos internos como en la mejora de la atención a tiempo de los servicios postventa. El impacto de la propuesta puede ser económica, que se traduce en una serie de ahorros en costos para la empresa o ser un beneficio potencial, es decir, mejorar la entrega de servicios postventa y generar mayores ingresos para la empresa en estudio.

4.1. Validación

Teniendo en cuenta el posible impacto de la propuesta, se realizará la validación de la efectividad de esta a través de mecanismos que nos permita evaluar su comportamiento en escenarios diferenciados. Por ello, para la validación de la propuesta desarrollada en el capítulo 3, se plantean dos escenarios: 1) situación actual y 2) situación mejorada.

- **Situación actual**

El entorno de análisis como situación actual mapea el proceso estándar de la empresa, es decir, la previsión o estimación de la demanda de las piezas de repuesto basado en la experiencia. Es preciso indicar que, la validación abarcará la base instalada desde el año 2015 en adelante.

- **Situación mejorada**

El entorno de validación como situación mejorada considera la información de la base instalada de la empresa, lo cual nos permite evaluar el ciclo de vida actual de los equipos vendidos e instalados, así como su vida útil operacional.

Para este escenario también el enfoque de validación abarca solo para los equipos vendidos a partir del año 2015, esto debido a que los equipos tienen un corto ciclo de vida.

4.1.1. Tipo de validación

El tipo de validación que se utiliza para validar la eficiencia de la propuesta es por simulación empleando el “software arena simulation”. Para esta validación se ha establecido dos escenarios como se menciona en el punto anterior.

Por otro lado, se ha definido las variables que se emplean en la simulación del proceso de abastecimiento de las piezas de repuesto para la prestación de los servicios postventa. Asimismo, se realiza el tratamiento de los datos de entrada para el escenario simulado a través del complemento del software arena “simulation input analyzer”. Cabe precisar que se ha determinado el tipo de distribución estadística de cada variable. Por ejemplo, se ha determinado la distribución estadística que presenta la demanda de cada una de las piezas de repuesto.

4.1.2. Descripción del proceso

El proceso de validación de la propuesta desarrollada consiste en:

- 1) Determinar las variables
- 2) Realizar el tratamiento del comportamiento de las variables
- 3) Construcción de los escenarios planteados
- 4) Determinar el horizonte de simulación
- 5) Recopilar y analizar los datos de salida
- 6) Presentar las conclusiones.

De esta manera se realizó la construcción del escenario simulado obteniéndose la secuencia de actividades para determinar las existencias y en caso no existir, se determina los puntos de reposición.

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Presentación de resultados

Tras habiéndose realizado el desarrollo de la propuesta de mejora se ha obtenido los siguientes resultados:

I. Clasificación y análisis de criticidad

En la primera etapa de la propuesta se realizó la clasificación de la base instalada en base a dos criterios: marca y modelo formando la familia de productos, tal como se observa en el anexo 2. Luego, se realizó el listado de repuestos que pertenecen a cada familia de productos determinados en el paso anterior. El resultado de este análisis se presenta en el anexo 3. Una vez que se tiene la clasificación de la información de la base instalada de la empresa, se realizó el análisis de criticidad de cada pieza de repuesto que la empresa en estudio tiene en su cartera de productos. Así se obtuvo que el 40.82% de las piezas de repuesto pertenecen al nivel criticidad 1, el 26.53% al nivel 2, el 12.24% al nivel 3 y el 20.41% al nivel 4.

Tabla 5: Repuestos de alta criticidad

LISTA DE REPUESTOS	Criterios de criticidad					Tipo de mantenimiento	CRITICIDAD
	Criticidad del equipo	Probabilidad de fallo	Tiempo de reposición	# potencial de proveedores	Disp. Espec. Técnicas		
Rodamiento de Puerta	A	0.5	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Lithium Battery	A	0.8	17	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Batterie Steuerung Fanuc 0i	A	0.5	20	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Cobertor de botones y llave para ajuste	A	0.89	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Válvula hidráulica 4/2	A	0.7	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Patron de 34 cm	A	0.8	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
Válvula electroneumática	A	0.5	16	1	NO	PREVENTIVO	ALTO
SP AC servomotor I2/1FK7101	A	0.7	19	2	NO	CORRECTIVO	ALTO
SP AC servomotor K2/1FK7103	B	0.8	20	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
SP AC servomotor D01/1FK7063	B	0.8	18	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
SP counterbalancer heavy	A	0.4	20	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
SP AC servomotor G1/1FK7100	B	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO
SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	B	0.9	30	2	NO	PREVENTIVO	ALTO
SmartPAD Screen Protector	B	0.89	30	1	NO	CORRECTIVO	ALTO

Fuente: Elaboración propia

Según el gráfico anterior, se puede decir que gran parte de las piezas de repuesto son críticos para la organización por lo que es de vital importancia priorizar su tratamiento. Para ver el resultado completo de la aplicación de la primera etapa consultar el anexo 4.

Por otro lado, se entiende que las piezas de repuesto pertenecientes al nivel 1 y 2 al No estar disponibles (en Stock) cuando el cliente lo solicita se genera una condición inaceptable, ya

que esto implica para el cliente tener un largo plazo de parada de operación de la planta. Por lo que, las piezas de repuesto perteneciente al nivel 1 deben ser abastecidas de inmediato; mientras que el abastecimiento de las piezas de repuesto pertenecientes al nivel 2 puede ser toleradas por un corto tiempo. Por ello, en el análisis de las siguientes etapas se debe priorizar aquellos elementos pertenecientes al nivel 1 y 2. Cabe precisar, que para las piezas de repuesto pertenecientes al nivel 3 y 4, el tratamiento se mantendrá (situación actual) debido a que no generan mayor impacto para la organización.

II. Pronóstico de la demanda

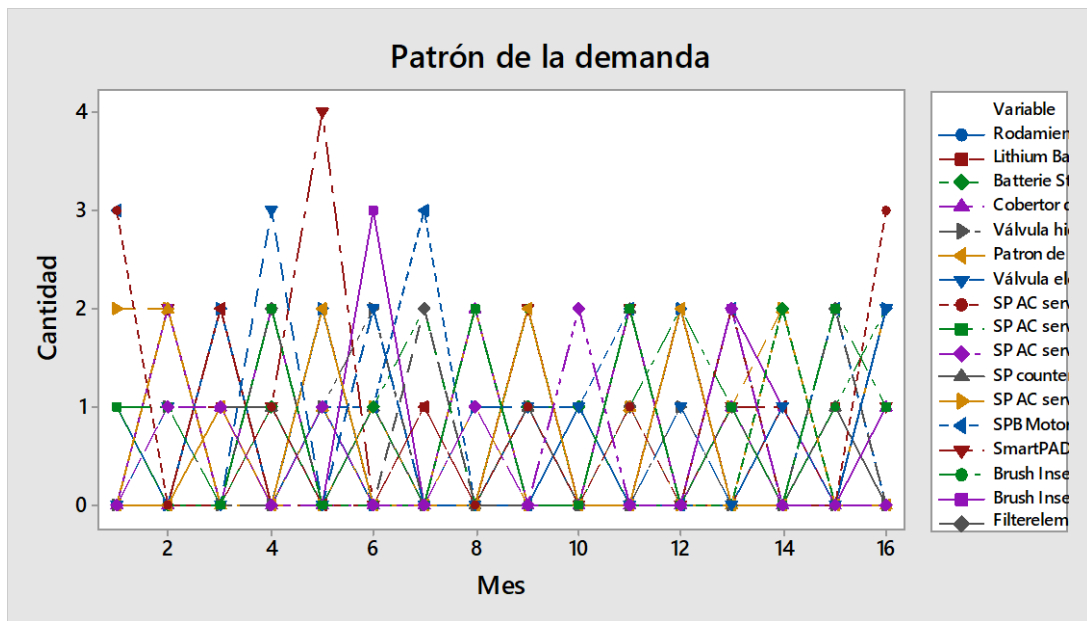
Una vez realizado el análisis de criticidad se aplicó el algoritmo de pronóstico de fallas, presentado en el capítulo 3, para todos los equipos de la base instalada. Cabe recalcar que la data que se ha considera para el análisis es desde 2015 en adelante, ya que el ciclo de vida de los productos que comercializa la empresa en promedio es de 6 años por lo que el horizonte del pronóstico es a mediano plazo. A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la aplicación del pronóstico de la demanda para las piezas de repuesto que pertenecen al nivel de criticidad 1, ya que estas piezas son de mayor importancia.

- **Para las piezas de repuesto del nivel 1**

a) Análisis del patrón de la demanda

Para realizar el análisis del patrón de la demanda de las piezas de repuesto que pertenecen al nivel de criticidad 1 se ha considerado el dato de la venta real de los 16 meses. En la gráfica se observa la serie de tiempo de cada uno de los ítems respectivamente.

Ilustración 14: Análisis de la demanda para el nivel 1



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se observa, que el patrón de la demanda de las piezas de repuesto presenta un comportamiento intermitente. Es decir, en varios periodos la demanda de estas piezas de repuesto presenta valores igual a cero, el cual es un comportamiento típico en este tipo de productos. Por lo tanto, se debe tener especial atención.

b) Análisis de la distribución de la demanda

Como parte del proceso de análisis de los datos de entrada para determinar la demanda de las piezas de repuesto se realizó el análisis de distribución de la demanda empleando el input analyzer. El análisis realizado se detalla en la sección de la simulación en arena.

c) Pronóstico de la demanda

Finalmente, se realizó el pronóstico de la demanda de las piezas de repuesto que pertenecen al nivel 1 empleando las ecuaciones 14 y 15; y teniendo en cuenta la etapa del ciclo de vida de los productos, su vida útil, su tiempo promedio entre fallas y reparaciones. Cabe precisar, que para determinar el pronóstico de la demanda de las piezas de repuestos se realizó el pronóstico de falla de cada equipo como se observa en la tabla 6. Mientras que en la tabla 7, se presenta el pronóstico de la demanda, el error de pronóstico, la desviación media absoluta y el error porcentual medio absoluto.

Tabla 6: Pronóstico de fallas de los equipos

Marca	Equipo	Modelo	Pronóstico para 9 fallas								
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Emco	Fresa	Concept Mill 260	33	69	107	140	210	317	457	667	983
Emco	Fresa	Concept Mill 55	78	164	254	332	495	749	1080	1576	2324
Emco	Fresa	Emcomill E1200	45	95	146	191	286	432	623	909	1341
Emco	Fresa	Emcomill E600	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Emco	Fresa	Emcomill E900	37	77	119	156	232	351	507	739	1090
Emco	Fresa	Emcomill E900	22	46	72	94	140	211	305	444	656
Emco	Fresa	PC Mill 125	23	48	75	98	146	221	319	465	685
Emco	Fresa	Concept Mill 55	76	160	247	323	483	730	1053	1535	2265
Emco	Fresa	CONCEPT MILL 250	43	90	140	183	273	413	596	869	1281
Emco	Fresa	EMCOMILL E750	25	53	81	106	159	240	346	505	745
Emco	Fresa	MAXXMILL 500	28	59	91	119	178	269	388	566	834
Emco	Fresa	Concept Mill 55	33	69	107	140	210	317	457	667	983
Emco	Fresa	Concept Mill 55	23	48	74	96	144	217	314	457	675
Emco	Fresa	MAXXMILL 500	67	141	218	285	425	643	928	1353	1997
Emco	Fresa	EMCOMILL E1200	67	141	218	285	425	643	928	1353	1997
Emco	Torno	PC Turn 125	68	143	221	289	432	653	942	1374	2026
Emco	Torno	CONCEPT TURN 260	52	109	169	221	330	499	720	1050	1550
Emco	Torno	CONCEPT TURN 250	67	141	218	285	425	643	928	1353	1997
Emco	Torno	CONCEPT TURN 450	45	95	146	191	286	432	623	909	1341
Emco	Torno	Emcoturn E45	75	158	244	319	476	720	1039	1515	2235
Emco	Torno	PC TURN 55	30	63	98	128	191	288	416	606	894
Kuka	Brazo Robótico	KR 6-3	23	48	75	98	146	221	319	465	685
Kuka	Brazo Robótico	KR 210 R3100 Ultra	43	90	140	183	273	413	596	869	1281
Kuka	Brazo Robótico	KR 210 R3100 Ultra	43	90	140	183	273	413	596	869	1281
Kuka	Brazo Robótico	KR6 R900 sixx	76	160	247	323	483	730	1053	1535	2265
Kuka	Brazo Robótico	KR6 R900 sixx	28	59	91	119	178	269	388	566	834
Kuka	Brazo Robótico	KR 5 ARC	28	59	91	119	178	269	388	566	834
Kuka	Brazo Robótico	KR 5 ARC	27	57	88	115	171	259	374	545	805
Kuka	Brazo Robótico	KR 5 ARC	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 3030 Fiber	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 3040 Fiber	36	76	117	153	229	346	499	727	1073
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 3040 Fiber	52	109	169	221	330	499	720	1050	1550
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	29	60	94	122	183	276	399	582	858
Trumpf	Laser	TruLaser 5030 Fiber	30	62	97	126	189	285	411	600	885
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	43	90	140	183	273	413	596	869	1281
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	56	118	182	238	356	538	776	1131	1669
Trumpf	Laser	TruLaser 3030 Fiber	25	53	81	106	159	240	346	505	745
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	27	57	88	115	171	259	374	545	805
Trumpf	Laser	TruLaser 5030 Fiber	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	76	160	247	323	483	730	1053	1535	2265
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	45	95	146	191	286	432	623	909	1341
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	30	62	97	126	189	285	411	600	885
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Trumpf	Laser	TruLaser 2030	24	50	78	102	152	230	332	485	715
Trumpf	Laser	TruLaser 1030 Fiber	56	118	182	238	356	538	776	1131	1669
Trumpf	Laser	TruLaser 5030 Fiber	27	57	88	115	171	259	374	545	805
Trumpf	Laser	TruLaser 3030 Fiber	56	118	182	238	356	538	776	1131	1669
Trumpf	Laser	TruLaser 2030 Fiber	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Laser	TruLaser 3040 Fiber	68	143	221	289	432	653	942	1374	2026
Trumpf	Plegadora	TruBend 3066	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Plegadora	TruBend 3180	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Plegadora	TruBend 7036	32	67	104	136	203	307	443	646	954
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 2000	45	95	146	191	286	432	623	909	1341
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 2000	56	118	182	238	356	538	776	1131	1669
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 1000	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 1000	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 1000	66	139	215	281	419	634	914	1333	1967
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 2000	65	137	211	276	413	624	900	1313	1937
Trumpf	Punzonadora	TruPunch 2000	43	90	140	183	273	413	596	869	1281
Zeiss	CMM	Contura G2	34	71	111	145	216	326	471	687	1013
Zeiss	CMM	Contura G2	75	158	244	319	476	720	1039	1515	2235
Zeiss	CMM	DuraMax	45	95	146	191	286	432	623	909	1341
Zeiss	CMM	DuraMax	27	57	88	115	171	259	374	545	805

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se presentan los resultados de la aplicación del algoritmo de pronóstico de fallas aplicada a cada modelo de equipo. En la cual se evidencia que en el horizonte del pronóstico las fallas que se van a presentar durante el ciclo de vida de cada equipo. Por ejemplo, para la fresadora “Concept Mill 260” de la marca Emco se tiene que la primera falla, tras su puesta en marcha, se presentará en la semana 33, luego en la semana 69 y así sucesivamente.

Tabla 7: Demanda de las piezas de repuestos de nivel de criticidad 1

REPUESTO	Dt	Prev.	Et	MAD	MAPE
Rodamiento de Puerta	4	5.00	-1	0.0833	2.08%
Lithium Battery	3	5.00	-2	0.1667	5.56%
Batterie Steuerung Fanuc Oi	4	5.00	-1	0.0833	2.08%
Cobertor de botones y llave para ajuste	4	3.00	1	0.0833	2.08%
Válvula hidráulica 4/2	2	3.00	-1	0.0833	4.17%
Patrón de 34 cm	2	3.00	-1	0.0833	4.17%
Válvula electroneumática	2	3.00	-1	0.0833	4.17%
SP AC servomotor l2/1FK7101	7	10.00	-3	0.2500	3.57%
SP AC servomotor K2/1FK7103	8	10.00	-2	0.1667	2.08%
SP AC servomotor D01/1FK7063	8	10.00	-2	0.1667	2.08%
SP counterbalancer heavy	7	10.00	-3	0.2500	3.57%
SP AC servomotor G1/1FK7100	7	10.00	-3	0.2500	3.57%
SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	8	10.00	-2	0.1667	2.08%
SmartPAD Screen Protector	9	10.00	-1	0.0833	0.93%
Brush Insert medium length	15	16.00	-1	0.0833	0.56%
Brush Insert	15	16.00	-1	0.0833	0.56%
Filterelement Polyglas	9	16.00	-7	0.5833	6.48%
Spring pin	15	16.00	-1	0.0833	0.56%
Polyester swab gestrickt	10	16.00	-6	0.5000	5.00%
Ceramic Part	8	4.00	4	0.3333	4.17%
Total	147	181	-1.7	0.1833	2.98%

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 7, notamos que existe solo una ligera variación entre la demanda real como la demanda pronosticada utilizando el modelo propuesto. En cuanto a los indicadores notamos que la desviación de la demanda real con la pronosticada es mínima. Es decir, para todos los artículos con nivel de criticidad 1 el error porcentual medio absoluto

(MAPE) es solo 2.98%, el cual indica que el modelo propuesto es eficiente y refleja el comportamiento real del tipo de producto. El mismo proceso se ha realizado para las piezas de repuesto que pertenecen al nivel de criticidad 2, 3 y 4.

III. Política óptima de inventario de piezas de repuesto.

Con los resultados obtenido de la demanda, se pasó a calcular la cantidad óptima de orden de compra para cada uno de los repuestos de criticidad 1 (total 20) tal como se aprecia a continuación:

Tabla 8: Comparación del desempeño de la política de inventario

	Costo Ordenar	Costo Mantener	Costo Total
Propuesta	S/. 789	S/. 789	S/. 1,579
Actual	S/. 1,760	S/. 1,100	S/. 2,860
Diferencia	S/. 971	S/. 311	S/. 1,281
%	55%	28%	45%

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 8, al aplicar la propuesta de mejora en el mismo periodo de evaluación se obtenido una reducción del costo total en el abastecimiento de las piezas de repuesto en un 45% logrando reducir el costo de ordenamiento en un 55% y el costo de mantener en un 28%. El detalle del análisis se presenta en la tabla 9, pues se consideró un nivel de servicio de 95% y los costos logísticos establecidos en el anexo 5.

Tabla 9: Política de inventario por pieza de repuesto

Equipo	Fresa			Torno				Brazo Robótico						Láser				Plegado		
Repuesto	Rodamiento de Puerta	Lithium Battery	Batterie Steuerung Fanuc Oi	Cobertor de botones y llave para ajuste	Válvula hidráulica 4/2	Patron de 34 cm	Válvula electroneu mática	SP AC servomotor I2/1FK7101	SP AC servomotor K2/1FK7103	SP AC servomotor D01/1FK7063	SP counterbalancer heavy	SP AC servomotor G1/1FK7100	SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	SmartPAD Screen Protector	Brush Insert medium length	Brush Insert	Filterelement Polyglas	Spring pin	Polyester swab gestrickt	Ceramic Part
Demanda promedio (d)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
Desviación estándar σ_d	0.49	0.49	0.49	0.55	0.55	0.55	0.55	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.58
Tiempo de entrega (L)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Demanda anual (D)	5.00	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	3.00
Costo de ordenar (S)	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20	S/20
Porcentaje de costo de mantener (I)	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%
Costo de mantener (H)	S/15	S/15	S/14	S/19	S/39	S/8	S/10	S/17	S/19	S/16	S/25	S/8	S/23	S/40	S/18	S/27	S/27	S/16	S/10	S/22
Costo Unitario (Cu)	S/ 455.00	S/ 450.00	S/ 430.00	S/ 600.00	S/1,200.00	S/ 235.00	S/ 311.00	S/ 527.00	S/ 593.00	S/ 499.00	S/ 789.00	S/ 241.00	S/ 721.00	S/1,234.00	S/ 564.00	S/ 843.00	S/ 844.00	S/ 500.00	S/ 324.00	S/ 672.00
Nivel de servicio	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Desviación estándar durante P+L ($\sigma P+L$)	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
Z	1.644853627	1.644853627	1.644853627	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536	1.6448536
Punto de reorden Q^*	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	2
Inventario de seguridad (IS) = $Z^* \sigma (P+L)$	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
Número óptimo de unidades por lote Q^*	4	4	4	2	2	4	3	5	5	5	4	7	4	3	6	5	5	6	8	2
Número esperado de ordenes (N)	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	3	1	2	3	3	3	3	3	2	1
Tiempo entre pedidos (P) = Q/d	38	39	39	43	30	69	60	25	24	26	21	37	22	16	19	16	16	20	25	41
stock en un año total	5	5	5	3	3	3	3	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	3
Costo total (CT)	S/1,733	S/54	S/53	S/48	S/68	S/30	S/35	S/83	S/88	S/80	S/101	S/56	S/97	S/126	S/108	S/132	S/132	S/102	S/82	S/51
Costo de ordenar	S/27	S/27	S/26	S/24	S/34	S/15	S/17	S/41	S/44	S/40	S/50	S/28	S/48	S/63	S/54	S/66	S/66	S/51	S/41	S/26
Costo de mantener	S/27	S/27	S/26	S/24	S/34	S/15	S/17	S/41	S/44	S/40	S/50	S/28	S/48	S/63	S/54	S/66	S/66	S/51	S/41	S/26
Costo Producto	S/1,678	S/1,669	S/1,632	S/1,493	S/2,111	S/934	S/1,075	S/2,555	S/2,710	S/2,486	S/3,126	S/1,728	S/2,988	S/3,909	S/3,343	S/4,087	S/4,089	S/3,148	S/2,534	S/1,580

Fuente: Elaboración propia

Posterior al establecimiento de la política de inventarios, se desarrolló un cuadro comparativo que nos permite determinar y/o establecer el sistema de revisión continua tal como se observa a continuación.

Tabla 10: Resumen del sistema de inventario

Resumen Sistema de inventario de revisión continua-Andes Technology						
Año 2018-2019						
N°	Repuesto	Punto de reorden	Inventario de seguridad (IS')=Z*σ (P+L)	Tamaño de lote Q	Stock objetivo (en un año)	Semana a compra
1	Rodamiento de Puerta	2	2	4	5	38
2	Lithium Battery	2	2	4	5	39
3	Batterie Steuerung Fanuc Oi	2	2	4	5	39
4	Cobertor de botones y llave para ajuste	2	2	2	3	43
5	Válvula hidráulica 4/2	2	2	2	3	30
6	Patron de 34 cm	2	2	4	3	69
7	Válvula electroneumática	2	2	3	3	60
8	SP AC servomotor I2/1FK7101	5	4	5	10	25
9	SP AC servomotor K2/1FK7103	5	4	5	10	24
10	SP AC servomotor D01/1FK7063	5	4	5	10	26
11	SP counterbalancer heavy	5	4	4	10	21
12	SP AC servomotor G1/1FK7100	5	4	7	10	37
13	SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	5	4	4	10	22
14	SmartPAD Screen Protector	5	4	3	10	16
15	Brush Insert medium length	3	2	6	16	19
16	Brush Insert	3	2	5	16	16
17	Filterelement Polyglas	3	2	5	16	16
18	Spring pin	3	2	6	16	20
19	Polyester swab gestrickt	3	2	8	16	25
20	Ceramic Part	2	2	2	3	41

Fuente: Elaboración propia

Según el resumen en el cuadro anterior, se puede apreciar las semanas en que se va a realizar los pedidos determinados, por lo que es más fácil detectar en que tiempo se debe realizar la orden de compra para de esta forma responder en menor tiempo a las solicitudes de los clientes.

IV. Simulación en Arena

Una vez aplicado la propuesta de mejora en los ítems anteriores se procede a realizar la simulación a través del Arena Simulation Software considerando los resultados obtenidos de la propuesta.

Cabe precisar que las variables de entrada para el escenario construido, que se observa en la ilustración 15, son la distribución de probabilidad de la demanda de las piezas de repuesto, el lote de compra, punto de reposición y stock objetivo. Todas estas variables son resultado de la aplicación de la propuesta. Asimismo, para el modelo construido se ha considerado como variables el tiempo para realizar el proceso de compra y el tiempo de llegada de la demanda, es decir, el tiempo de llegada de los clientes. Las cuales son: UNIF (10,20) y UNIF (3, 7) respectivamente.

Para el caso del análisis de la distribución de probabilidad de la demanda se emplea el input analyzer (complemento del Arena Simulation Software). El análisis de la distribución de probabilidad de la demanda se realizó para cada una de las piezas clasificadas en el nivel 1, según el análisis de criticidad. En la siguiente tabla se observa los tipos de distribuciones de probabilidad que siguen las demandas respectivamente.

Tabla 11: Análisis de la Distribución de probabilidad de la demanda

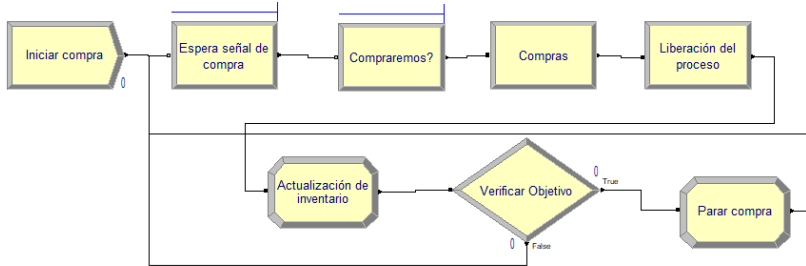
N°	Repuesto	Distribución de probabilidad	Error cuadrado	Test de chi cuadrado
1	Rodamiento de Puerta	POIS(0.452)	0.000725	p-value = 0.113
2	Lithium Battery	-0.5 + WEIB(1.13, 1.76)	0.000046	p-value < 0.005
3	Batterie Steuerung Fanuc 0i	POIS(0.413)	0.00115	p-value = 0.104
4	Cobertor de botones y llave para ajuste	EXPO(0.815)-0.5	0.001998	p-value = 0.0772
5	Válvula hidraulica 4/2	POIS(0.375)	0.000261	p-value = 0.0892
6	Patron de 34 cm	EXPO(1.01)-0.5	0.03715	p-value < 0.005
7	Válvula electroneumática	-0.5 + LOGN(1.25, 0.997)	0.002235	p-value < 0.005
8	SP AC servomotor I2/1FK7101	EXPO(1.25)-0.5	0.008148	p-value < 0.005
9	SP AC servomotor K2/1FK7103	-0.5 + 3 * BETA(0.908, 1.27)	0.010953	p-value < 0.005
10	SP AC servomotor D01/1FK7063	EXPO(1)-0.5	0.001912	p-value < 0.005
11	SP counterbalancer heavy	-0.5 + WEIB(1.13, 1.76)	0.000167	p-value < 0.005
12	SP AC servomotor G1/1FK7100	-0.5 + 3 * BETA(0.907, 1.27)	0.010932	p-value < 0.005
13	SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	-0.5 + 4 * BETA(0.865, 1.35)	0.012038	p-value < 0.005
14	SmartPAD Screen Protector	EXPO(1.38)-0.5	0.009326	p-value < 0.005
15	Brush Insert medium length	UNIF(-0.5, 2.5)	0.002604	p-value = 0.0168
16	Brush Insert	-0.5 + 4 * BETA(0.89, 1.59)	0.047046	p-value < 0.005
17	Filterelement Polyglas	EXPO(1.06)-0.5	0.011735	p-value < 0.005
18	Spring pin	EXPO(1)-0.5	0.025027	p-value < 0.005
19	Polyester swab gestrickt	-0.5 + 3 * BETA(0.701, 1.17)	0.036501	p-value < 0.005
20	Ceramic Part	-0.5 + 3 * BETA(0.555, 1.11)	0.071324	p-value < 0.005

Fuente: Elaboración propia

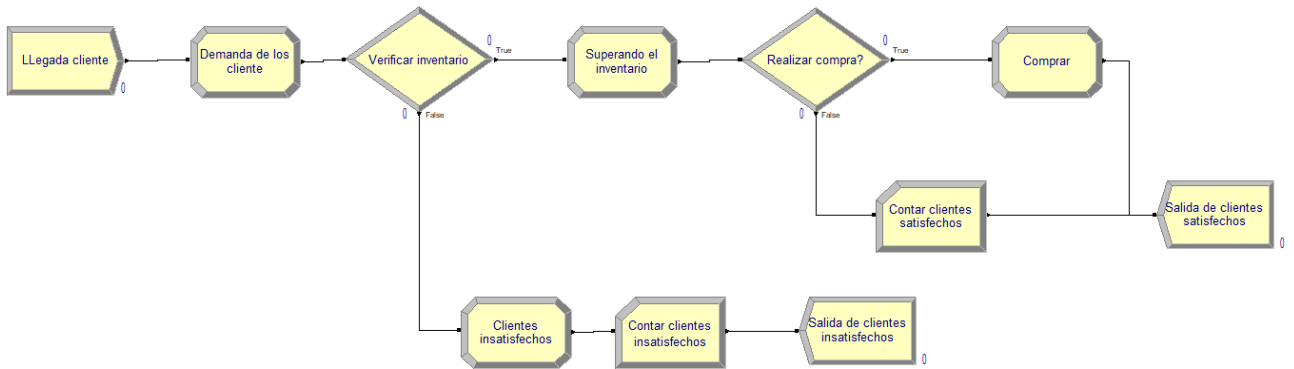
Cabe mencionar, que se realizó una simulación para cada repuesto, es decir para los 20 repuestos críticos (nivel 1) identificados. De esta forma se obtuvo para el primer repuesto “rodamiento de puerta” los siguientes resultados.

Ilustración 15: Escenario de validación

Gestión de compra



Gestión de demanda



Fuente: Elaboración propia

Tras es diseño de escenario de simulación de la entrega o cumplimiento de los servicios postventa que tiene como variables la demanda de los repuestos, el tiempo de llegada de los clientes, el tiempo en que se demora realizar la compra, así como la política de gestión de inventario. Para simular el escenario: se toma los datos obtenidos en la tabla 10 y 11, donde el punto de reordenamiento es 2, stock objetivo 5 y tamaño de lote es 4. Una vez ingresada los valores de las variables indicadas, se realiza 10 réplicas para obtener el pre-muestreo como se puede observar en la tabla 12.

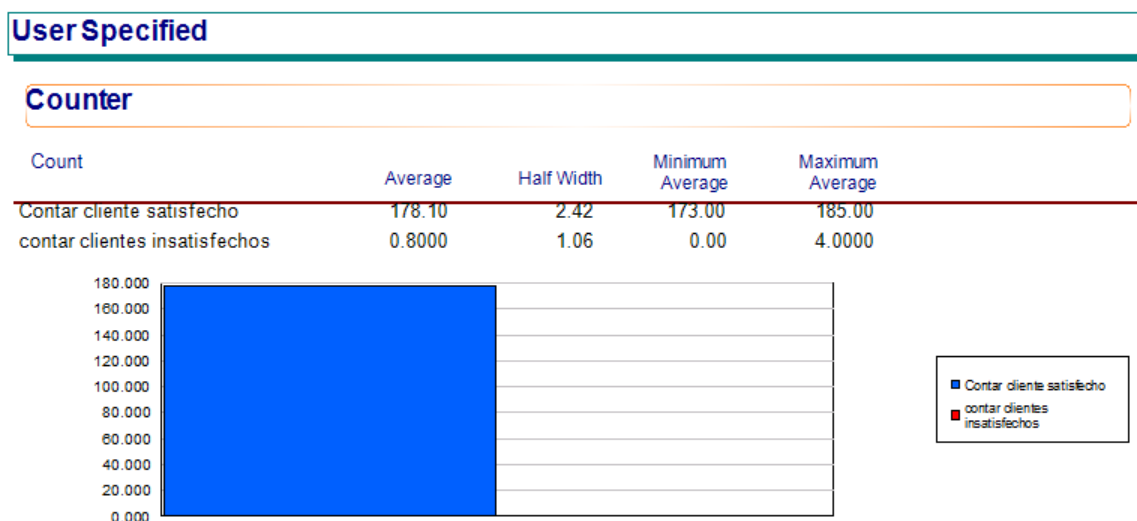
Tabla 12: Resultado de la simulación

Réplica	Cliente satisfecho	Cliente insatisfecho
1	167	0
2	175	0
3	181	0
4	177	4
5	180	3
6	185	0
7	173	0
8	178	0
9	177	1
10	179	0

Fuente: Elaboración propia

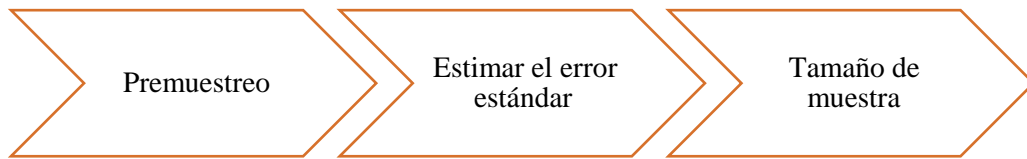
En el consolidado del reporte de la simulación también se puede observar el resultado promedio de las 10 réplicas, en la cual se observa que 178 clientes resultan satisfechos y solo 1 cliente resulta insatisfecho, la cual se observa en la siguiente ilustración:

Ilustración 16: Reporte consolidado de la simulación



Por otro lado, se procede a calcular la cantidad óptima de replicas para el escenario construido (tamaño de muestra), para el cálculo se sigue los pasos indicados en la siguiente ilustración:

Ilustración 17: Pasos para el cálculo de la cantidad óptima de réplicas



En la etapa del Pre-muestreo, se ha realizado 10 corridas a fin de obtener los primeros resultados. Posterior a ello, se calcula el error estándar para el escenario y finalmente el tamaño de muestra que vendría a ser la cantidad óptima de réplicas a realizar para garantizar el menor error estándar en el modelo propuesto. En la siguiente ilustración se presenta los resultados obtenidos:

Ilustración 18: Análisis del tamaño de muestra óptimo

Réplica	VA time (Average) horas
1	35.1193
2	35.0563
3	44.2293
4	39.3569
5	52.3531
6	40.4612
7	33.2882
8	39.43
9	48.8169
10	39.3137

Estimar el error estándar	
n	10
desv. Estandar	6.1232047
t	2.2621572
e	4.3802768 Horas

Definir tamaño de muestra	
n	41.50746253
desv. Estand	6.123204697
t	2.262157163
e	2.15 horas

← Se requiere 42 muestras
← Se reduce el error al 50%

Fuente: Elaboración propia

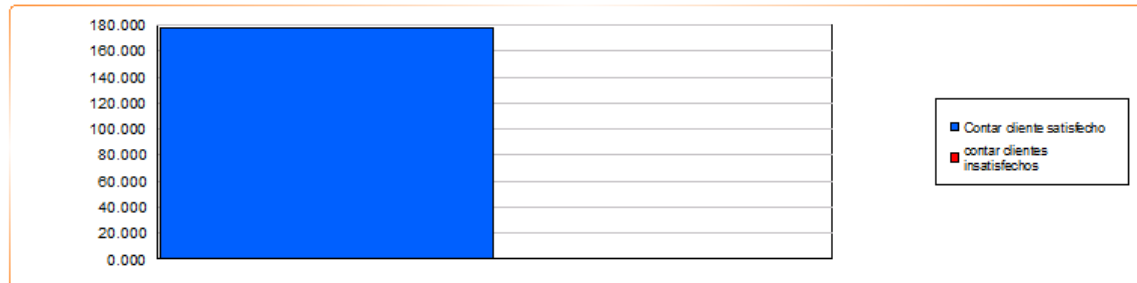
En la ilustración 18, al realizar las 10 primeras réplicas los resultados obtenidos presentan un error de 4.38 horas. Por ello, se reduce el error al 50% y se obtiene que el tamaño de muestra óptimo o el número de réplicas necesarias para tener un error de 2.15 horas es de 42 réplicas.

Una vez definido el número óptimo de réplicas se procede a realizar la simulación y se obtiene el siguiente resultado:

User Specified

Counter

Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Contar cliente satisfecho	177.74	1.23	168.00	185.00
contar clientes insatisfechos	0.2857	0.26	0.00	4.0000



Del cual se concluye que el 99.84% de los clientes resultan satisfechos, ya que cuando realicen sus pedidos se podrá contar con el repuesto solicitado y por ende se podrá atender de inmediato a su requerimiento. Por ello, se puede afirmar que la propuesta es viable y eficiente.

Cabe precisar que este análisis se ha realizado para cada uno de los repuestos clasificados en el nivel 1, los resultados se presentan en el anexo 6.

4.2.2. Indicadores

El indicador global que se propone para garantizar la sostenibilidad de la propuesta de mejora es el porcentaje de cumplimiento de los servicios postventa. Este indicador nos permite evaluar la eficiencia de los servicios postventa. Pues, cuando se logra pronosticar la demanda de los repuestos según las fallas que presentarán los equipos durante su vida útil, con anticipación se contará con los repuestos que los clientes solicitarán. Sumado a este indicador se ha propuesto otros indicadores más que nos permitirán evaluar la eficiencia de la propuesta como es el Riesgo de Quiebre de Stock, Riesgo de Pérdida de Stock y el Periodo de Rotación de Inventario. Pues estos indicadores permitirán tomar mejores decisiones para asegurar la adecuada gestión de las existencias, ya que la primera brinda información sobre el porcentaje riesgo que representa un Quiebre de stock, es decir, el stock que se encuentra por debajo del stock de seguridad. El segundo indicador brinda información sobre el porcentaje de stock que se encuentra por encima de inventario máximo que vendría a representar un sobre stock. Finalmente, tendremos también información sobre el periodo de rotación de inventario.

Tomando como referencia los resultados de la simulación del escenario para cada uno de los repuestos, se obtuvo el siguiente resultado global:

1) Porcentaje de cumplimiento de servicios postventa (eficiencia)

$$\frac{\text{Nº servicios postventa realizados a tiempo en el periodo}}{\text{Total de servicios postventa atendidos en el periodo}} = 174/176 = 98.86\%$$

El cumplimiento del servicio postventa es de 98.86%, por lo tanto, se puede afirmar que la propuesta es eficiente y en todos los ámbitos de su aplicación.

4.3. Procesos adicionales tras la propuesta de mejora

Una vez validada la eficiencia de la propuesta de mejora aplicada en el caso de estudio, es preciso indicar que como consecuencia de la aplicación de la mejora se ha identificado nuevos procesos a implementar en el caso de estudio. Los procesos adicionales que permitirán garantizar la sostenibilidad de la propuesta son: proceso de análisis de datos y proceso de revisión del inventario.

Los procesos adicionales indicados son en parte como resultado de la propuesta, pues el proceso de análisis de datos permitirá realizar periódicamente el estudio y/o análisis de la base instalada del caso de estudio para identificar nuevos equipos vendidos y puestos en marcha y posteriormente hacer cuenta de los repuestos que esta puede demandar durante su vida útil, por otro lado, permitirá hacer un análisis de la criticidad de cada repuesto identificado considerando los diferentes factores que se indican en la propuesta de mejora.

Asimismo, el proceso de revisión del inventario permitirá establecer la dinámica de verificar frecuentemente el stock de repuestos, así como determinar el punto de reordenamiento considerando la demanda y la base instalada. Cabe indicar que este proceso se encargará de optimizar los costos asociados a la gestión de inventarios y de esa manera hacer que sea sostenible la propuesta de mejora.

4.4. Evaluación económica

Los costos proyectados de inversión (año 0) se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 13: Inversión requerida para la implementación del proyecto

PERSONAL	Costos Unitario (S/-Hora Hombre)	Cantidad Requerida (Horas-Hombre)	Costo Total (S/)
Responsable de Almacén	S/ 13.00	200	S/ 2,600.00
Personal Administrativo	S/ 10.00	200	S/ 2,000.00
Asesor Experto	S/ 15.00	200	S/ 3,000.00
			S/ 7,600.00
SOTFWARES	Costos Unitario (S/-Unidad)	Cantidad Requerida (unidad)	Costo Total (S/)
Office 365	S/ 495.00	3	S/ 1,485.00
Minitab	S/ 350.00	1	S/ 350.00
Arena	S/ -	1	S/ -
			S/ 1,835.00
INFRAESTRUCTURA	Costos Unitario (S/-Unidad)	Cantidad Requerida (unidad)	Costo Total (S/)
Computadora	S/ 4,500.00	3	S/ 13,500.00
Licencia de Windows	S/ 655.00	3	S/ 1,965.00
Instalación de las PC	S/ 385.00	3	S/ 1,155.00
Escritorio (Mesa + Silla)	S/ 450.00	3	S/ 1,350.00
			S/ 17,970.00
TOTAL INVERSION			S/ 27,405.00

Fuente: Elaboración propia

Los costos operación para el año 1 al 3 son los siguientes:

Tabla 14: Costos de operación

PERSONAL	Costos Unitario (S/-Año)	Cantidad Requerida (1)	Costo Total (S/)
Responsable de Almacén	S/ 30,000.00	1	S/ 30,000.00
Analista de Comercio Exterior	S/ 26,400.00	1	S/ 26,400.00
			S/ 56,400.00
SOTFWARES	Costos Unitario (S/-Unidad)	Cantidad Requerida (unidad)	Costo Total (S/)
Office 365	S/ 495.00	3	S/ 1,485.00
TOTAL COSTO OPERACIÓN ANUAL			S/ 57,885.00

Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Flujo de Fondos

El proyecto requiere un monto de inversión de 27 405 soles: S/ 17 970 para activos fijos depreciables y el resto para activos no depreciables. La inversión se efectúa en el periodo 0. La vida útil del proyecto es de 3 años y los activos fijos depreciables no tienen valor de salvamento. La pérdida en la venta de los demás activos alcanza a 5 mil soles y se carga al último periodo. La inversión se financia con el 100% de capital propio. Los ingresos por ahorro en pago de penalidades son de 80 000 mil soles por año y los gastos de operación sin incluir gastos financieros, ni depreciación, son de 57 885 soles por año.

- La tasa de impuesto a la renta es del 20%
- La depreciación se realiza sobre el 100% del valor de adquisición de los activos depreciables, en un periodo de dos años, con el método lineal.

A continuación, se presenta la estructura del flujo de costos para el proyecto con los datos mencionados.

Tabla 15: Estructura de flujo de fondos

RUBROS	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3
INGRESOS	S/ -	S/ 80,000.00	S/ 80,000.00	S/ 80,000.00
COSTOS DE OPERACION		S/ 57,885.00	S/ 57,885.00	S/ 57,885.00
DEPRECIACION		S/ 5,990	S/ 5,990	S/ 5,990
GANANCIAS GRAVABLES	S/ -	S/ 16,125.00	S/ 16,125.00	S/ 16,125.00
IMPUESTOS		S/ 3,225	S/ 3,225	S/ 3,225
VENTA DE ACTIVO GRAVABLE				S/ 5,000
IMPUESTOS A LA UTILIDAD				S/ 1,000
VENTA DE ACTIVOS				
GANANCIAS NETAS CONTABLES	S/ -	S/ 12,900	S/ 12,900	S/ 6,900
-DEPRECIACION		S/ 5,990	S/ 5,990	S/ 5,990
-COSTOS DE INVERSION	S/ 27,405.00			
FLUJO DE FONDOS NETO	-S/ 27,405.00	S/ 18,890	S/ 18,890	S/ 12,890

Fuente: Elaboración propia

De esta forma al calcular el VAN y TIR se obtiene lo siguiente:

	0	1	2	3
FLUJO DE FONDOS	-S/ 27,405.00	S/ 18,890.00	S/ 18,890.00	S/ 12,890.00
SALDO ACTUALIZADO (20%)	-S/ 27,405.00	S/ 15,741.67	S/ 13,118.06	S/ 7,459.49
SALDO ACUMULADO	-S/ 27,405.00	-S/ 11,663.33	S/ 1,454.72	S/ 8,914.21

TASA	20%
VNA	S/ 36,319.21

VAN	S/ 8,914,21
TIR	41%
PERIODO DE RECUPERACIÓN	1,89

Para calcular el costo de capital propio, utilizaremos el modelo CAPM.

$$CAPM(COK) = Rf + \beta \times (Rm - Rf) + Rp$$

Considerando los siguientes datos:

Precio Inicial (hace 3 años) 25 de enero 2017	2288,88
Precio Final (hace 3 años) 25 de enero 2020	3295,47
Rendimiento	43,98%
Rm Rendimiento de mercado	14,66%

Riesgo País (Rp)	2,69%
Re (EEUU)	0,73%
Re (Perú)	3,43%

Finalmente, al realizar los cálculos se obtiene el valor del COK=16,80%

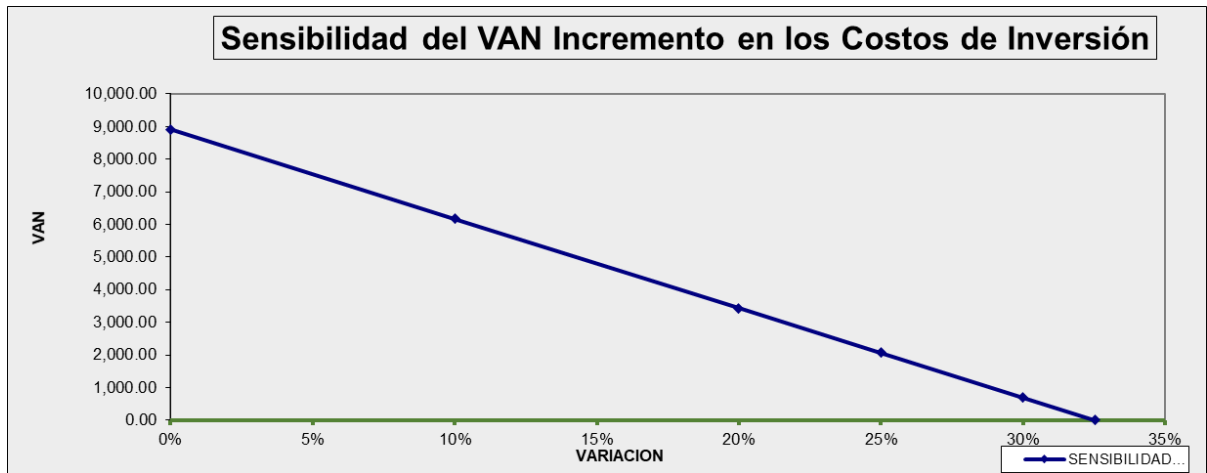
MODELO CAPM - Costo de capital propio (COK)	16,80%
Tasa libre de Riesgo (Rf)	0,73%
Beta despalancada (maquinaria) (B)	0,96
Rendimiento de mercado (Rm)	14,66%
Riesgo País (Rp)	2,69%

- Por lo tanto, como el VAN es mayor a 0 el proyecto es rentable.
- Asimismo, como el TIR es > al COK, el proyecto de inversión es rentable y atractivo para la inversión.
- Del mismo modo, el periodo de recuperación de la inversión es en menos de 2 años.

Análisis de sensibilidad:

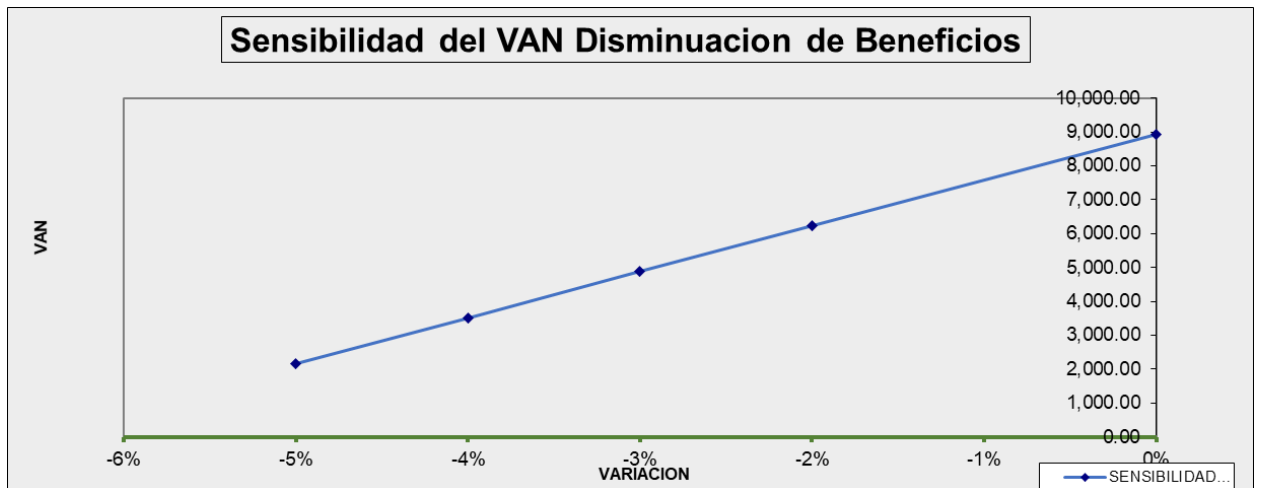
Para identificar cuál es la variable que más afecta al proyecto, se realizó el siguiente análisis de sensibilidad.

1. SENSIBILIDAD DE LA RENTABILIDAD POR INVERSION		
VARIACION	VAN	TIR
0.00%	8,914.21	41.28%
10.00%	6,173.71	33.55%
20.00%	3433.21	26.98%
25.00%	2,062.96	24.05%
30.00%	692.71	21.31%
32.53%	0.00	20.00%



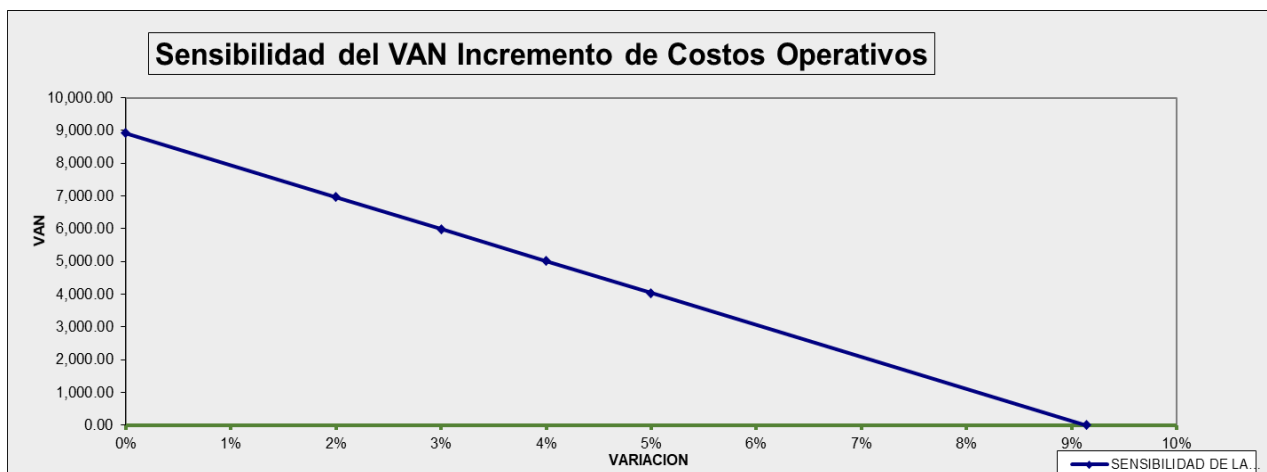
2.SENSIBILIDAD DE LA RENTABILIDAD POR DISMINUCION DE BENEFICIOS (INGRESOS)

VARIACION	VAN	TIR
0.00%	8,914.21	41.28%
-2.00%	6,217.92	35.06%
-3.00%	4869.77	31.89%
-4.00%	3,521.62	28.67%
-5.00%	2,173.47	25.40%
-6.61%	0.00	20.00%



3. SENSIBILIDAD DE LA RENTABILIDAD POR INCREMENTO DE COSTOS OPERATIVOS

VARIACION	VAN	TIR
0.00%	8,914.21	41.28%
2.00%	6,963.27	36.80%
3.00%	5987.80	34.52%
4.00%	5,012.34	32.23%
5.00%	4,036.87	29.90%
9.14%	0.00	20.00%



En síntesis, con los resultados obtenidos para el análisis de variable se tiene lo siguiente:

- Cuando el incremento de la Inversión es superior a 32.53% el proyecto deja de ser rentable, ya que el van es menor a 0.
- Cuando la disminución de los Beneficios o ingresos es superior a 6.61% el proyecto deja de ser rentable, ya que el van es menor a 0.
- Cuando el incremento de los Costos Operativos es superior a 9.14% el proyecto deja de ser rentable, ya que el van es menor a 0.

De este modo, las variables que tienen mayor impacto en el proyecto son el ingreso (ganancias) y los costos operativos, ya que no se pueden controlar en su totalidad. Por lo que, en caso de que exista cambios (variación) el proyecto se verá afectado, llegando incluso a no ser rentable.

4.5. Evaluación del impacto ambiental

Para analizar el impacto ambiental resultado de la propuesta en la presente investigación se realizó una matriz de aspectos e impactos ambientales por cada proceso de la empresa Andes Technology SAC, tal como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 16: Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD		IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES			ACCIONES DE CONTROL
PROCESO	ACTIVIDAD / SUBPROCESO	ASPECTOS AMBIENTALES	IMPACTOS AMBIENTALES	CLASE DE IMPACTO	
Gestión de Recursos Humanos	Selección y contratación de personal	Consumo de útiles de oficina: Papel, lapiceros, etc.	Agotamiento de recursos naturales (destrucción de bosques para la fabricación de papel)	Alto	Sustituir el uso del papel por medios digitales. Es decir, promover la cultura de prevención del uso de papeles para impresión. / Fomentar el uso de material reciclado.
		Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
	Capacitaciones y concientización del personal	Consumo de útiles de oficina: Papel, lapiceros, etc.	Agotamiento de recursos naturales (destrucción de bosques para la fabricación de papel)	Alto	Sustituir el uso del papel por medios digitales. Es decir, promover la cultura de prevención del uso de papeles para impresión.
		Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
		Generación de residuos sólidos (basura)	Contaminación del suelo	Medio	Reducir la generación de los residuos sólidos
Logística	Gestión de compras	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
		Generación de residuos sólidos	Contaminación del suelo	Medio	Reducir la generación de los residuos sólidos
	Gestión de almacén	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
		Consumo de útiles de oficina: Papel, lapiceros, etc.	Agotamiento de recursos naturales (destrucción de bosques para la fabricación de papel)	Medio	Fomentar el uso de material reciclado / migrar a la digitalización de los documentos / envío de documentos vía correo electrónico / almacenamiento de documentos en la nube (OneDrive)
Importaciones	Generación de residuos sólidos no peligrosos reaprovechables: papeles, cartones, cintas, etc.	Contaminación del suelo	Medio	Fomentar el reciclaje de los residuos para su posterior disposición / Desarrollar un programa integral de gestión de residuos.	
Gestión comercial	Venta de bienes de capital industrial	Generación de residuos de oficina	Contaminación del suelo	Medio	Fomentar el reciclaje de los residuos para su posterior disposición / Desarrollar un programa integral de gestión de residuos.
		Generación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles (automóvil)	Contaminación atmosférica	Medio	Promover actividades de vista a los clientes sin carro.
Operaciones	Instalación y puesta en marcha / Mantenimientos (preventivos y/o correctivos)	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales		Adquirir equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
		Generación de residuos no peligrosos: papeles, cartones, plásticos sin contaminantes, etc.	Contaminación del suelo	Medio	Promover la cultura de reciclaje. Es decir, los técnicos deben ser conscientes de los residuos que están generando por lo que no deben dejar los residuos en las instalaciones de los clientes.
		Generación de residuos peligrosos: Plásticos, aceites industriales, baterías, etc.	Contaminación del suelo	Medio	Fomentar la práctica del reciclaje. Los técnicos deberán recoger todos los residuos sólidos generados para su posterior disposición.
		Generación de ruidos	Contaminación sonora	Medio	Utilizar equipos de protección de acuerdo con la intensidad del sonido al que están expuestos.

		Generación de virutas por corte de materiales metálicos	Contaminación del suelo	Medio	Desarrollar un plan de gestión de residuos originados en las prestaciones de servicios.
	Capacitaciones	Consumo de materiales de oficina	Agotamiento de recursos naturales (destrucción de bosques para la fabricación de papel)	Medio	Fomentar el reciclaje de los residuos para su posterior disposición / Desarrollar un programa integral de gestión de residuos.
		Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
Tecnología	Gestión de infraestructura / y bienes de la empresa	Consumo de materiales de oficina	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Fomentar el reciclaje de los residuos para su posterior disposición / Desarrollar un programa integral de gestión de residuos.
		Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales	Medio	Utilizar equipos ahorradores de energía / Uso eficiente de la energía
		Generación de residuos sólidos peligrosos (tinta) y no peligrosos.	Contaminación del suelo	Medio	Desarrollar un plan de gestión de residuos originados en las prestaciones de servicios.
		Generación de ruidos	Contaminación sonora	Medio	Utilizar equipos de protección de acuerdo con la intensidad del sonido al que están expuestos.

Fuente: Elaboración propia

Según el análisis en la tabla anterior, se apreció que el impacto ambiental ocurre luego de la implementación del proyecto, ya que para ello se requiere la compra de materiales y equipos de cómputo. Asimismo, se necesita contratar nuevo personal, quienes también impactan en distintos ámbitos debido al uso y consumo de materiales y herramientas.

4.6. Impacto social

El impacto social analizado se muestra en la siguiente tabla, el cual evidencia que tienen mayor incidencia en aquellos colaboradores del proyecto tanto los que gestionan, ejecutan y mantienen la propuesta de investigación. Asimismo, se tiene impacto en otras empresas del mismo rubro o también en la adaptación a otros rubros.

Tabla 17: Análisis de impacto social del proyecto

Variables	Dimensiones	Indicadores
Impacto en los gestores del proyecto	Posibilidad de crecimiento y superación personal del gestor	<ul style="list-style-type: none"> - Fuente de inspiración para los creadores - Generación y mejora de nuevos proyectos - Crecimiento personal y grupal
Impacto en las familias	Impacto en la proyección de los niños hacia las familias	- Influencia de la comunicación en la familia por promover la investigación e innovación
	Transformación de los miembros de las familias a partir del ingreso económico del colaborador del proyecto.	- Motivación y participación en el crecimiento de los miembros de la familia
Impacto en el sector empresarial	Posibilidad de expansión del proyecto en otros rubros	<ul style="list-style-type: none"> - Fuente de referencia e inspiración - Alianzas estratégicas

Impacto en entidades de promoción y desarrollo	Impacto en la divulgación del sistema de abastecimiento propuesto	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora en los procesos de otras empresas mediante el uso del proyecto - Propuestas de mejora al proyecto inicial.
--	---	--

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección presentaremos las conclusiones y recomendaciones resultantes de nuestro proyecto de investigación teniendo como caso de estudio a la empresa Andes Technology SAC.

5.1. Conclusiones

- El presente trabajo de investigación presentó una propuesta para mejorar el abastecimiento de los repuestos empleando un algoritmo de pronóstico de fallas basado en el ciclo de vida de los equipos para determinar la demanda de los repuestos y posteriormente determinar una política de gestión de inventarios estos a través del sistema de revisión continua. En conclusión, esta propuesta nos permitió recuperar los costos de penalidades por incumplimiento de los servicios, ya que se logró un porcentaje de cumplimiento de 98.86%. Es decir, se obtuvo una mejora del 77.32% de cumplimiento de los servicios postventa. De estos resultados y de la inversión requerida se ha determinada un valor de VAN S/ 8914.21 y un TIR de 41% con periodo de recuperación de 2 años, siendo el proyecto económicamente viable y rentable para la empresa.
- Se evidenció que una de las principales causas del problema identificado fue la rotura de stock, esto debido a que la empresa no contaba con políticas de gestión de inventario presentando una variación promedio del 50% en rotura de stock. Con la propuesta desarrollada se logró que dicho porcentaje se reduzca, ya que con el establecimiento del sistema de revisión continua se identificó a tiempo la falta de existencias y por lo tanto se reabasteció los repuestos a fin de cumplir a tiempo con los servicios postventa.
- Las técnicas seleccionadas en función de la naturaleza del problema identificado, para cada máquina industrial permitirá determinar el listado de repuestos clasificándolos en función a su nivel de criticidad, el cual permitirá realizar una mejor planificación de la prestación de los servicios postventa, así como hacer factible el proceso de importación de los repuestos y por ende se tendrá disponible aquellos

repuestos críticos. El cual permitirá obtener mejoras en el tiempo de respuesta ante las incidencias reportadas por los clientes en hasta el 98.86%.

5.2. Recomendaciones

- Si bien, en el presente trabajo se consideró todas las áreas de la empresa en la etapa del diagnóstico y se determinaron problemas de gran impacto. Sin embargo, estos no requerían de herramientas de ingeniería para resolverlos. Así como, el desarrollo de su personal. Además de esto, se identificó que existen deficiencias en su proceso de importaciones las cuales se ven afectadas por la intermitencia de la demanda de los bienes de capital industrial como de los cambios repentinos del tipo de cambio el cual puede tener un alto impacto en la capacidad de compra de la empresa en estudio.
- Se recomienda profundizar la investigación teniendo en cuenta otras herramientas para poder presentar una solución integral a la empresa. Por otro lado, se recomienda revisar a profundidad la aplicación de redes neuronales para la previsión de la demanda de las piezas de repuestos. Ya que en la literatura muchos autores recomiendan que para un producto con demanda aleatoria o intermitente esta es la herramienta adecuada debido a que su implementación presenta menor desviación que con los modelos clásicos de pronóstico.
- Se recomienda tener en cuenta el valor de la información de la base instalada de la empresa ya que de ello depende en gran parte la eficiencia de la primera técnica. Sin embargo, se determinó que la empresa en estudio no tiene bien estructurada su base instalada, al cual es una limitación para realizar un adecuado análisis del pronóstico de fallas de cada equipo industrial vendido. Asimismo, la vida útil de los equipos resulta ser una limitación para el análisis del tiempo promedio entre fallos, ya que de acuerdo con el ciclo de vida de los productos la vida útil de estos en promedio es de 6 años.
- Es preciso indicar también, que se debe tener en cuenta que la vida útil promedio de los equipos (establecido por el fabricante) no necesariamente indica que pasado dicho tiempo los equipos dejaran de funcionar. Pues los equipos pueden seguir operando

con normalidad, pero el fabricante dejará de producir los repuestos o en su defecto se incrementa los costos de adquisición haciendo que la reparación de los equipos resulte cara para el cliente. El cual puede ser una limitación para la sostenibilidad de la propuesta desarrollada en el presente trabajo.

- Finalmente, se recomienda que el control o seguimiento de los pronósticos de las fallas debe ser constante y sostenido en el tiempo para asegurar la eficacia del sistema de abastecimiento propuesto. Por lo tanto, se recomienda para futuras aplicaciones evaluar la posibilidad de contar con información actualizada y ordenada de la base instalada, así como el registro de las atenciones de las incidencias reportadas por los clientes.

6. REFERENCIAS

- Andrea, P., Tamayo, O., Fernando, A., Montoya, M., Alexander, W., & Castro, A. (2011). *El valor agregado de la información de costos como factor para determinar la conveniencia de crecimiento en las empresas*. 147–169.
- Armenzoni, M., Montanari, R., Vignali, G., Bottani, E., Ferretti, G., Solari, F., & Rinaldi, M. (2015). An integrated approach for demand forecasting and inventory management optimisation of spare parts. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 10(3), 233. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2015.071375>
- Babiloni, M. E., Carboneras, M., Guillem, M., & Palmer Gato, M. (2007). Modelos de gestión de inventarios para ítems con demanda intermitente. *International Conference on Industrial Engineering & Industrial Management, I*, 1407–1415.
- Ballou, R. (2004). Logística: Administración de la cadena de suministro. In Q. Edición (Ed.), *Mexico* (Pearson Ed). 2004. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Boylan, J. E., & Syntetos, A. A. (2010). Spare parts management: A review of forecasting research and extensions. *IMA Journal of Management Mathematics*, 21(3), 227–237. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpp016>
- Dekker, R., Pinçe, Ç., Zuidwijk, R., & Jalil, M. N. (2013). On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 536–545. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.025>
- Ghobbar, A. A., & Friend, C. H. (2002). Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations. *Journal of Air Transport Management*, 8(4), 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(01\)00054-0](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00054-0)
- Heizer, J., & Render, B. (2009). Principios de administración de operaciones. In S. Edición (Ed.), *Operations Managment* (Peason Edu).
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA. (2017). Perú: estructura empresarial, 2016. *Perú: Estructura Empresarial*, 135. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1445/1

ibro.pdf

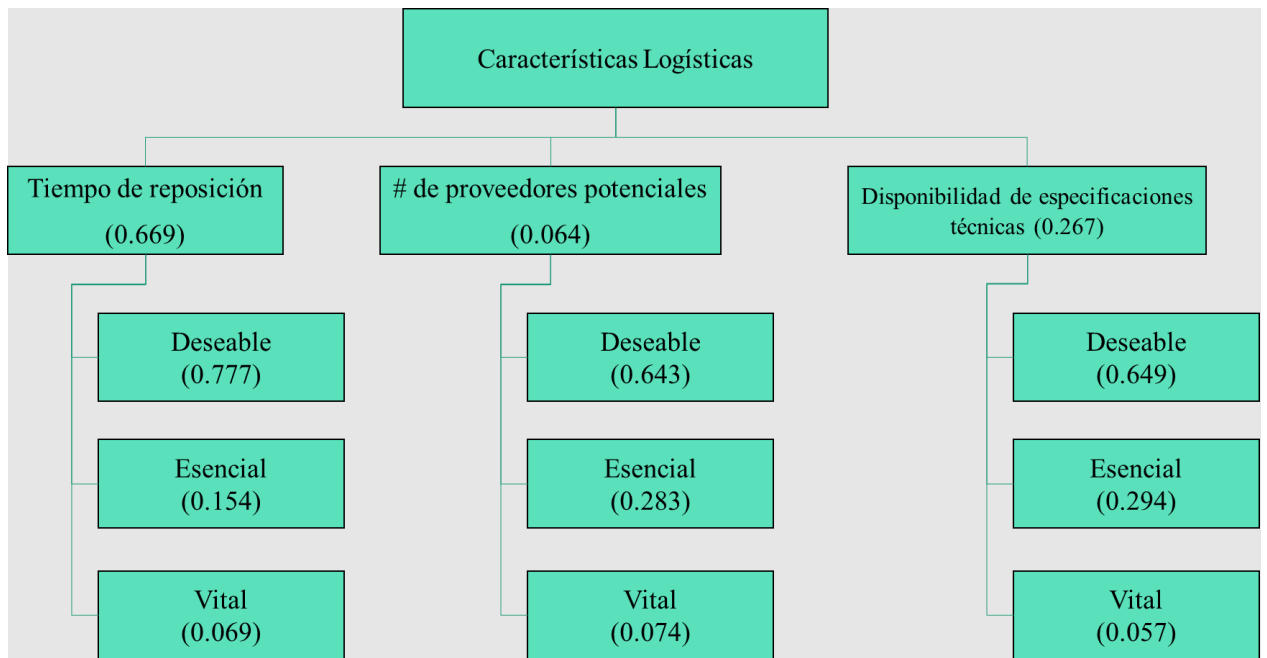
- Kim, T. Y., Dekker, R., & Heij, C. (2017). Spare part demand forecasting for consumer goods using installed base information. *Computers and Industrial Engineering*, *103*, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.014>
- Mattia, A., Roberto, M., Giuseppe, V., Eleonora, B., Gino, F., Federico, S., & Marta, R. (2013). A simulation approach for spare parts demand forecasting and inventory management optimization. *25th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2013*, *c*, 676–684.
- Mesones, A., & Roca, E. (n.d.). *Micro y Pequeñas Empresas en el Perú (MYPES)*.
- Molenaers, A., Baets, H., Pintelon, L., & Waeyenbergh, G. (2012). Criticality classification of spare parts: A case study. *International Journal of Production Economics*, *140*(2), 570–578. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.013>
- Párraga Condezo, J. A. (2011). *INVESTIGACIÓN, ANÁLISIS Y PROPUESTAS DE POLÍTICAS DE PLANEAMIENTO Y CONTROL DE INVENTARIOS PARA EL SECTOR COMERCIAL DE PRODUCTOS SIDERÚRGICOS (Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial. Lima: Perú)*. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1005/PARRAGA_CONDEZO_JOSE_CONTROL_INVENTARIOS_PRODUCTOS_SIDERURGICOS.pdf?sequence=1
- René Santa Cruz, R., & Corrêa, C. (2017). Previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo y redes neuronales artificiales: Estudio de caso. *DYNA (Colombia)*, *84*(203), 9–16. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.63141>
- Santa Cruz, R. R., & Corrêa, C. (2017). Intermittent demand forecasting with time series methods and artificial neural networks: A case study •. *Revista DYNA*, *84*(203), 9–16. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.63141>
- Syntetos, A. A., & Boylan, J. E. (2005). *En la clasificación de los patrones de demanda*. 495–503.
- Van der Auweraer, S., & Boute, R. (2019). Forecasting spare part demand using service

maintenance information. *International Journal of Production Economics*, 213, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.015>

Van der Auweraer, S., Boute, R. N., & Syntetos, A. A. (2019). Forecasting spare part demand with installed base information: A review. *International Journal of Forecasting*, 35(1), 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2018.09.002>

7. ANEXOS

Anexo 1: Puntos de corte para la evaluación de las características logísticas



Anexo 2: Familia de equipos vendidos e instalados

MARCA	FAMILIA	MODELO
EMCO	Centro de Mecanizado	Concept Mill 260
		Concept Mill 55
		Emcomill E1200
		Emcomill E600
		Emcomill E900
	Fresa	CONCEPT MILL 250
		Concept Mill 55
		Emcomill E1200
		EMCOMILL E750
		MAXXMILL 500
	Torno	PC Mill 125
		CONCEPT TURN 250
		CONCEPT TURN 260

		CONCEPT TURN 450
		Emcoturn E45
		PC Turn 125
		PC TURN 55
KUKA	Brazo Robótico	KR 210 R3100 Ultra
		KR 5 ARC
		KR 6-3
		KR6 R900 sixx
TRUMPF	Laser	TruLaser 1030 Fiber
		TruLaser 2030
		TruLaser 2030 Fiber
		TruLaser 3030 Fiber
		TruLaser 3040 Fiber
	Plegadora	TruBend 3066
		TruBend 3180
		TruBend 7036
	Punzonadora	TruPunch 1000
		TruPunch 2000
Zeiss	CMM	Contura G2
		DuraMax
Headman	Torno	HCL 400
Intelitek	Brazo Robótico	SCORBOT-ER 4u
	Estación de almacenamiento	ASRS-36x2 Arm
Mello	Rectificadora	AMY-15
Motoman	Brazo Robótico	MH5F
Neway	Centro de Mecanizado	VMC-11035
	Erosionadora	VMC-11035
	Fresa	VMC-11035
	Torno CNC	NL2015A
Prompt	Erosionadora	EDM 432 CS
		EDM 542 CS

Fuente: Adaptado de Andes Technology SAC

Anexo 3: Listado de repuestos pertenecientes a cada familia de equipos identificados

MARCA	FAMILIA	LISTA DE REPUESTOS
EMCO	Fresa	Rodamiento de Puerta
		Lithium Battery
		Batterie Steuerung Fanuc Oi
	Torno	Cobertor de botones y llave para ajuste
		Válvula hidraulica 4/2
		Patrón de 34 cm
		Válvula electroneumática
KUKA	Brazo Robótico	SP AC servomotor I2/1FK7101
		SP AC servomotor K2/1FK7103
		SP AC servomotor D01/1FK7063
		SP counterbalancer heavy
		SP AC servomotor G1/1FK7100
		SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)
		Optigear Olit (grease water res)(5Kg)
		Grease LGEP2 (0.4Kg-Gibinde)
TRUMPF	Láser	Brush Insert medium length
		Brush Insert
		Filterelement Polyglas
		Supporting ring
		Spring pin
		Filter unit
		Polyester swab gestrickt
	Plegado	Protection sleeve w. prote glass LLK-DK
		Protection sleeve w. prote glass LLK-DK
		Adhesive tape Scotch Magic 810 19mm
		Ceramic Part
		Ceramic Part Isolator M12
		High-Pressure Lens 7,5"
		High-Pressure Lens
	Nozzle EAA D 0,8	
	Punzonado	Nozzle Ø 1,7mm
		Nozzle Ø 1,4mm
		Nozzle Ø 1,2mm
		Grease MICROLUBE GB 00 1kg
		Methanol >99.9% 50ml

		Clamping lever
		Manta filtrante EU2-F100 (Rolo 2x20m)
ZEISS	CMM	Slip plate 2.88
		Option VAST-XTG-D2 for C99
		Probe head VAST-XTG-D2
		Dose assembly
		Balance Zylinder 26"
		X drive compl.
		Y drive G2

Fuente: Adaptado de Andes Technology SAC

Anexo 4: Clasificación y análisis de criticidad de las piezas de repuesto

MARCA	FAMILIA	LISTA DE REPUESTOS	Criterios de criticidad							Tipo de mantenimiento	Criticidad del equipo	Probabilidad de fallo	Tiempo de reposición	# potencial de proveedores	Disp. Espec. Técnicas	Características logísticas	CRITICIDAD	Criticidad	Total	%
			Criticidad del equipo	Probabilidad de fallo	Tiempo de reposición	# potencial de proveedores	Disp. Espec. Técnicas													
EMCO	Fresa	Rodamiento de Puerta	A	0.5	30	1	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1	1	20	40.8%		
		Lithium Battery	A	0.8	17	1	NO	CORRECTIVO	vital	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1	2	13	26.5%		
		Batterie Steuerung Fanuc Oi	A	0.5	20	1	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1	3	6	12.2%		
	Torno	Cobertor de botones y llave para ajuste	A	0.89	30	1	NO	CORRECTIVO	vital	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1	4	10	20.4%		
		Válvula hidráulica 4/2	A	0.7	30	1	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1	Total	49	100%		
		Patron de 34 cm	A	0.8	30	1	NO	CORRECTIVO	vital	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		Válvula electroneumática	A	0.5	16	1	NO	PREVENTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
KUKA	Brazo Robótico	SP AC servomotor I2/1FK7101	A	0.7	19	2	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	deseable	VITAL	VITAL	1					
		SP AC servomotor K2/1FK7103	B	0.8	20	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		SP AC servomotor D01/1FK7063	B	0.8	18	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		SP counterbalancer heavy	A	0.4	20	1	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		SP AC servomotor G1/1FK7100	B	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		SPB Motor D0/1FK7060 (KR5R1400)	B	0.9	30	2	NO	PREVENTIVO	esencial	vital	esencial	deseable	VITAL	VITAL	1					
		SmartPAD Screen Protector	B	0.89	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		KVGA 2,0 graphics card	B	0.7	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
Motor cable X20; 15m	C	0.1	15	3	SI	PREVENTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	ESENCIAL	ESENCIAL	4							
TRUMPF	Láser	Brush Insert medium length	B	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		Brush Insert	B	0.9	30	2	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	deseable	VITAL	VITAL	1					
		Filterelement Polyglas	B	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		Supporting ring	B	0.5	16	1	NO	CORRECTIVO	esencial	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Spring pin	B	0.8	19	2	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	deseable	VITAL	VITAL	1					
		Filter unit	B	0.5	20	1	NO	PREVENTIVO	esencial	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Polyester swab gestrickt	B	0.89	18	1	NO	CORRECTIVO	esencial	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
	Plegado	Protection sleeve w. prote glass LLK-DK	C	0.7	3	1	NO	CORRECTIVO	deseable	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Protection sleeve w. prote glass LLK-DK	C	0.8	30	1	NO	CORRECTIVO	deseable	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Adhesive tape Scotch Magic 810 19mm	C	0.5	30	1	NO	CORRECTIVO	deseable	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Ceramic Part	A	0.7	17	1	NO	CORRECTIVO	vital	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	1					
		Ceramic Part Isolator M12	C	0.8	20	1	NO	CORRECTIVO	deseable	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		High-Pressure Lens 7,5"	C	0.8	30	2	NO	CORRECTIVO	deseable	vital	esencial	deseable	VITAL	VITAL	2					
		High-Pressure Lens	C	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	deseable	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Nozzle EAA D 0,8	C	0.9	30	1	NO	CORRECTIVO	deseable	vital	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
		Nozzle EAA D 2,3	B	0.15	16	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3					
		Nozzle Ø 1,7mm	B	0.17	17	1	NO	PREVENTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	2					
	Punzonado	Nozzle Ø 1,4mm	B	0.17	20	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3					
		Nozzle Ø 1,2mm	B	0.17	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3					

		Nozzle Ø 1,0mm	B	0.17	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3
		Nozzle Ø 2,7mm	B	0.17	30	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3
		Nozzle Ø 2,3mm	B	0.17	16	1	NO	CORRECTIVO	esencial	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	3
		Slip plate 2.88	C	0.08	30	1	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	4
		Option VAST-XTG-D2 for C99	C	0.08	30	2	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	deseable	VITAL	VITAL	4
		Probe head VAST-XTG-D2	C	0.34	17	1	NO	CORRECTIVO	deseable	esencial	esencial	vital	VITAL	VITAL	2
		Dose assembly	C	0.08	20	1	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	vital	VITAL	VITAL	4
		Balance Zylinder 26"	C	0.1	30	2	SI	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	deseable	ESENCIAL	ESENCIAL	4
		X drive compl.	C	0.1	30	3	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	VITAL	VITAL	4
		Y drive G2	C	0.16	15	3	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	VITAL	VITAL	4
		Z drive	C	0.16	15	3	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	VITAL	VITAL	4
		Spare part BP26_SE, standard	C	0.21	15	3	NO	PREVENTIVO	deseable	esencial	esencial	esencial	VITAL	VITAL	2
		Standard control panel	C	0.16	15	3	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	VITAL	VITAL	4
		Thermosensor Prismo/Contura, calibrated	C	0.16	15	3	NO	CORRECTIVO	deseable	deseable	esencial	esencial	VITAL	VITAL	4

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Costos logísticos

Costos relacionados

Para determinar la política óptima de gestión de inventario, se calcula todos los costos relacionados implicados para colocar la orden y determinación del punto de reposición. El modelo que se utiliza tiene en cuenta los siguientes costos: el costo de compra por unidad, el costo de posesión de inventarios, costo de revisión y los costos relacionados con la realización de pedidos:

Costo de posesión del inventario

Dado que la empresa, en la actualidad no maneja el concepto de costo de posesión o no se valoriza como tal, se propone calcular de la siguiente manera:

Costo de posesión de inventarios = Costo de instalaciones (alquiler + depreciación) + Gasto de operaciones en almacén + 30% de costos de mantenimiento de inventarios + Gastos administrativos para el manejo de existencias + 50% de Otros (licencia de software, depreciación de equipos empleados, etc.) + 10% del Sueldo del personal + Pérdidas o mermas

Tabla 1: Costo de posesión de inventario

Inventario promedio (S/)	S/ 551,524.00
Costo de posesión de inventario	S/ 125,841.00
Costo de posesión (S/ / año)	S/0.23
Índice de posesión (%)	22.82%

Costo de revisión

Para el calcular del costo de revisión se prorrateó el costo de controlar los inventarios, es decir, el “costo de mantenimiento de inventario”

Al año se realizaron 10 revisiones, en los que se revisaron 120 artículos disponibles en el almacén.

Costo de revisión (S/ / ítem)	S/ 15.00
-------------------------------	----------

COSTO ORDENAMIENTO						
GASTOS		2015	2016	2017	2018	
Comprador		18000	18000	18000	18000	
Operador logístico		1500	1500	1500	1500	
Teléfono		210	210	210	210	
TOTAL (\$)		19710	19710	19710	19710	
Orden compra (O-C)		700	700	700	700	
						Promedio
Soles/O-C		28.16	28.16	28.16	28.16	28.16

COSTO MANTENIMIENTO						
GASTOS		2015	2016	2017	2018	
Gastos financieros		100000	90000	120000	115000	
Merma		78530	90269	113528	103751	
Seguros		45000	45000	50000	50000	
TOTAL (Soles)		223530	225269	283528	268751	
Inversión en existencias (Soles)		6500000	6450000	9320000	9150000	
						Promedio
%		0.034	0.035	0.030	0.029	3.23%

Anexo 6: Resultado del estudio del tamaño de muestra para cada repuesto*.

N°	Repuesto	Error estándar con 10 réplicas	Error deseado	Tamaño de muestra óptimo	Cientes Satisfechos	Cientes Insatisfechos
1	Rodamiento de Puerta	4.380276767	2.19013838	42	177.74	0.2857
2	Lithium Battery	2.269757029	1.13487851	40	176.58	1.625
3	Batterie Steuerung Fanuc Oi	2.44916955	1.22458478	40	179.78	0.175
4	Cobertor de botones y llave para ajuste	2.849014048	1.42450702	40	172	5.35
5	Válvula hidraulica 4/2	1.290395324	0.64519766	40	162.98	0.225
TOTAL PROMEDIO					174	2

*Se presenta el resultado del estudio realizado para cada uno de los repuestos clasificados como nivel 1 según el análisis de la criticidad, en el anexo 6 se presentan el resultado de 5 repuestos, para ver la tabla completa consultar los registros de los análisis.

Anexo 7: Cronograma tentativo de implementación de las herramientas

La implementación del proyecto tendrá una duración de 4 meses. Entre las actividades más importantes se llevará a cabo la capacitación del personal encargado del almacén y se realizará la actualización de la información con la ayuda de los responsables.

Cronograma de implementación

ACTIVIDADES	IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA											
	JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4
Análisis Interno de la empresa	■											
Determinación de los Inputs y outputs de los procesos		■										
Actualización de la data de los repuestos		■	■									
Capacitación de los colaboradores involucrados			■	■								
Desarrollo De la clasificación de los repuestos			■	■	■							
Análisis de criticidad						■	■					
Pronósticos							■	■	■	■		
Establecer el sistema de reposición periódica							■	■	■	■		
Mejora al método de trabajo actual						■	■	■	■	■		
Implementación de la prueba de validación						■	■	■	■	■		
Realizar seguimiento de la aplicación del modelo propuesto									■	■	■	■
Análisis de Impacto de la propuesta											■	■
Evaluación de las mejoras obtenida											■	■