

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Estudio y caracterización de indicadores como medida de rendimiento en procesos logísticos

Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE
INDICADORES COMO MEDIDA DE RENDIMIENTO
EN PROCESOS LOGÍSTICOS**

Autor

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2023



Universidad
Zaragoza

TESIS DOCTORAL

“Estudio y caracterización de indicadores como medida de rendimiento en procesos logísticos”.

Autor:

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Directores:

Dra. María Pilar Lambán Castillo

Dr. Jesús Antonio Royo Sánchez

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2022



Universidad
Zaragoza

Estudio y caracterización de indicadores como medida de
rendimiento en procesos logísticos

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

TESIS DOCTORAL

Zaragoza, 2022



**Universidad
Zaragoza**

**Estudio y caracterización de indicadores como
medida de rendimiento en procesos logísticos**

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Dirigida por:

Dra. María Pilar Lambán Castillo

Dr. Jesús Antonio Royo Sánchez

Para la obtención del Título de Doctor por la Universidad de
Zaragoza

Zaragoza, 2022

A mi hijo Aarón y a mi esposo por su
compañía, cariño, amor y comprensión.
Sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mis padres por su amor, escucha y
consejos que siempre me dieron. Por
educarme y guiarme en cada etapa.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis es el fruto de muchos esfuerzos y sacrificios, me llena de satisfacción el estar escribiendo estas líneas de agradecimiento a tantas personas que me han apoyado incondicionalmente. Hace un poco más de cuatro años llegue a España con mi esposo e hijo con la ilusión de cumplir esta meta y llevar a mi país nuevos conocimientos.

Quiero agradecer por el apoyo recibido de todo el personal del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, el cual me acogió durante mi estancia. En especial agradecimiento a mis directores María Pilar Lambán y Jesús Royo por su apoyo, guía y disposición que siempre mostraron durante todos estos años. También mencionar a José Antonio Albajez por su guía la cuál ha sido muy valiosa.

Infinitas gracias a mi esposo Mario Hernandez que me ha acompañado en esta travesía. Gracias por ser el soporte en los momentos más difíciles, por tu comprensión, paciencia, amor y por todo el apoyo brindado para poder terminar esta etapa. Muchas gracias a mi motor a mi hijo Aarón Enrique que con sus abrazos y besos me transmitió la energía necesaria para culminar.

Agradezco profundamente a mis padres por su infinito amor y apoyo incondicional. A pesar de estar lejos siempre los sentí muy cerca, gracias por escucharme, acompañarme a celebrar los triunfos y a consolarme en las decepciones. Mis hermanas Yanzely y Diana ambas con diferentes roles, siempre estuvieron para brindarme su apoyo y animarme a seguir. Gracias a mi familia panameña sobrinos (Henry, Emilio y Camila), tías, primas, primos y amigas, que con sus llamadas y mensajes siempre sentí el cariño. También especiales gracias a la Sra. Daira, Tía Nilka y a mi primo Daniel personas que me ayudaron grandemente.

Gracias a la familia que elegimos, amistades de España, algunos ya de mucho tiempo, con quien compartimos momentos especiales y siempre contando con el apoyo de ellos. A la nueva familia que hemos ganado en estos cuatro años, quisiera mencionar a cada uno (padres y madres del colegio de Aarón). Gracias por todo el apoyo y por abrirnos las puertas de sus hogares y hacernos sentir sobre todo a mi hijo parte de sus familias. Elena muchas gracias por tu tiempo y disposición.

Agradezco el apoyo financiero que me otorgo Panamá para realizar mis estudios, a través de SENACYT e IFARHU. Y a la Universidad Tecnológica de Panamá especialmente a la Facultad de Ingeniería Industrial por respaldar mi estancia de estudios.

Finalmente, y no menos importante, mi agradecimiento eterno a Dios y a la Virgen porque me dieron fuerza en mis peores momentos.

RESUMEN

“Estudio y caracterización de indicadores como medida de rendimiento en procesos logísticos”

Autor:

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Directores:

Dra. María Pilar Lambán Castillo

Dr. Jesús Antonio Royo Sánchez

En esta investigación se han caracterizado indicadores como medida de efectividad en procesos logísticos. Como primer paso se ha realizado una revisión sistemática de la literatura para identificar las brechas que existen e intentar cerrarlas en este trabajo. Términos como sistemas de medición, indicadores de rendimiento y efectividad global del equipo por sus siglas en inglés OEE fueron revisados. Se ha notado un creciente interés en la aplicación del OEE en diferentes ámbitos como medida de efectividad. Minería, recursos humanos, puertos y transporte son algunos ámbitos desarrollados por diferentes autores. También se encontró en la literatura un interés en la adaptación del indicador en el ámbito logístico y el sector servicios sin ser explorado a profundidad dando paso a esta investigación.

Los objetivos alcanzados con el desarrollo de esta tesis son: 1) comprender la importancia en la medición del rendimiento de las operaciones, analizar el indicador OEE y su implementación en la industria. 2) plantear nuevos indicadores en procesos logísticos basados en el OEE. 3) validar el indicador en la industria para comprobar su efectividad en los procesos logísticos.

Se han planteado tres modelos del indicador de efectividad para el ámbito logístico, en un proceso, en un equipo y en un almacén. El primero ha sido propuesto para el proceso de descarga de un camión de transporte de mercancías. En este modelo se han definido las pérdidas y los factores que intervienen en el proceso, teniendo como novedad, la inclusión del factor puntualidad como parte de la medición. El segundo modelo se ha planteado para un equipo de movimiento autónomo (AGV) tiene como objetivo medir y cuantificar el rendimiento del equipo, la evolución de la utilización y su efectividad. Por último, se ha desarrollado el indicador para medir la efectividad en un almacén tomando en consideración las diferentes áreas que lo componen. Todos estos modelos han sido implementados y validados en diferentes empresas, teniendo como resultado medidas

fiables e iniciativas de mejoras a los procesos logísticos. Ofreciendo la suficiente flexibilidad para adaptar el indicador a las necesidades de medición de las empresas.

Con la validación de los modelos se ha logrado, comprobar la efectividad del uso del indicador OEE en procesos logísticos. También han permitido la recolección de datos y la detección de actividades que influyen en los procesos/sistemas que las empresas no habían considerado con anterioridad. A través de la validación, se ha promovido la identificación activa de las pérdidas y cuellos de botella integrando el análisis del rendimiento con el entorno de la organización.

De este trabajo se ha derivado como futura línea de investigación el estudio y medición del indicador en tiempo real con equipos sensorizados en el ámbito logístico. Otra propuesta de investigación futura es repetir la validación en otras empresas para convenir rangos o resultados óptimos de OEE en procesos logísticos.

ABSTRACT

“Study and characterization of indicators as a performance measure in logistics processes”

Author:

Lisbeth del Carmen Ng Corrales

Directors:

Dra. María Pilar Lambán Castillo

Dr. Jesús Antonio Royo Sánchez

In this research indicators have been characterized as an effectiveness measure in logistics processes. As a first step, gaps have been identified through a systematic literature review. Terms like measurement systems, performance indicators, and overall equipment effectiveness (OEE), have been reviewed. Findings shows that the application of the OEE indicator is of a great interest and is increasing over the years. Different authors used the OEE as a measure of the effectiveness in different sectors, such as mining, human resources, ports, and means of transport. Although was found in the literature a specific interest in the OEE adaptation in the service sector and logistics, finding a gap for this research.

The following objectives were accomplished through this thesis: 1) understand the importance of the operational performance measurement, analyze the OEE, and how it is applied. 2) development of a new OEE indicator applied to logistics processes based on the OEE. 3) validate the indicator and its effectiveness on the logistics processes, through the implementation in the operation management.

Three effectiveness indicators models have been developed for logistics operations, for a process, in a logistics equipment, and in a warehouse. The first one has been proposed for the unloading process of a truck. For this model, losses and intervenient factors were defined. As a novel factor, punctuality have been included for the overall measurement. The second model has been developed for an autonomous guided vehicle (AGV) to measure and quantify the equipment performance, the utilization, and the effectiveness. The last model, has been developed to measure the warehouse performance, taking into consideration the different section that comprise it. Every model has been applied and validated in different companies, having reliable results that promotes process improvements. Offering sufficient flexibility to adapt the indicator to enterprises measurements needs.

With the validation of the three models achieved, it has been possible to verify the effectiveness of the OEE indicator applied to logistics processes. Moreover, through the model validation, data collection and the activities involved in the processes / system were not identified before. Promoting the losses identification and bottle necks integrating the performance analysis with the organization environment.

From this thesis future research lines can be highlighted. The study and measure of the performance indicator in real time using logistics equipment furnished with sensors. Moreover, validate the OEE indicator in various logistics process to agree a range or ideal value.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xiii
ÍNDICE	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xxi
1. Introducción	25
1.1. Justificación de la tesis.....	25
1.2. Objetivos y alcance de la tesis	27
1.3. Estructura de la tesis.....	28
2. Estado del arte	33
2.1. Procesos logísticos	33
2.2. Sistemas de medición del rendimiento	36
2.3. Indicadores clave de desempeño (KPI).....	39
2.4. Efectividad Global del Equipo (OEE).....	42
2.4.1. Definición de las preguntas de investigación.....	43
2.4.2. Selección y tratamiento de datos	44
2.4.3. Modelos de OEE existentes	50
2.5. Consideraciones Finales	56
3. Modelos del indicador de efectividad desarrollados en varios ámbitos	61
3.1. Definición OEE de partida	61
3.2. Marco general para los modelos propuestos.....	65
3.3. Modelo de un proceso de descarga	67
3.3.1. Alcance del modelo de un proceso de descarga	67
3.3.2. Marco del modelo de un proceso de descarga.....	69

3.4.	Modelo de equipo en sistema logístico.....	75
3.4.1.	Alcance del modelo de un equipo AGV.....	75
3.4.2.	Marco del modelo de un equipo AGV.....	76
3.5.	Modelo en el funcionamiento del almacén.....	80
3.5.1.	Alcance del modelo de un almacén.....	80
3.5.2.	Marco del modelo de un almacén.....	81
4.	Validación de los modelos desarrollados.....	87
4.1	Caso A (Descarga).....	87
4.1.1	Descripción del Caso A.....	87
4.1.2	Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso A.....	90
4.1.3.	Resultados del Caso A.....	93
4.2	Caso B (Equipo logístico).....	96
4.2.1.	Descripción del Caso B.....	96
4.2.2.	Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso B.....	97
4.2.3.	Resultados del Caso B.....	99
4.3	Caso C (Almacén).....	102
4.3.1.	Descripción del Caso C.....	102
4.3.2.	Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso C.....	103
4.3.2.1.	Caracterización de pérdidas y parámetros de cada estación de trabajo.....	105
4.3.2.1.1.	Estación de trabajo 1 y 2 (Automáticas).....	105
4.3.2.1.2.	Estación de trabajo 3 (Manual).....	107
4.3.2.1.3.	Estación de trabajo 4 (Manual).....	108
4.3.2.1.4.	Estación de trabajo 5 (Manual).....	111
4.3.2.1.5.	Estación de trabajo 6 (Automática).....	112
4.3.3.	Resultados del Caso C.....	114
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	123
5.1.	Conclusiones.....	123
5.2.	Trabajos futuros.....	127
5.3.	Divulgación de resultados.....	127
6.	Referencias.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos clave de la gestión logística.....	34
Figura 2. Niveles de organización de las PMS	37
Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses).....	45
Figura 4. Red de co-ocurrencia de las palabras clave de los autores.	50
Figura 5. Parámetros de la OEE definidos por (Nakajima, 1988)	62
Figura 6. Marco general para los modelos del indicador de rendimiento.....	66
Figura 7. Proceso de Descarga de Mercancía.	68
Figura 8. Marco del modelo, proceso logístico de descarga de camiones. (adaptado de L. D. C. Ng Corrales et al., 2022).....	69
Figura 9. Factores interrelacionados en el proceso de descarga.	70
Figura 10. Esquema demostrativo de rutas y función del AGV.	75
Figura 11. Marco del modelo, equipo en sistema logístico. (adaptado L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)	77
Figura 12. Variables para considerar como entrada en el indicador.....	78
Figura 13. Flujo horizontal del funcionamiento del almacén.....	80
Figura 14. Marco del modelo, funcionamiento del almacén. (adaptado L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)	81
Figura 15. Distribución física del área de descarga.....	87
Figura 16. Diagrama de flujo del caso A	88
Figura 17. Recorrido del AGV	96
Figura 18. Diagrama general del proceso.	103
Figura 19. Esquema gráfico de las estaciones de trabajo.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen general de los datos.....	45
Tabla 2. Lista de modelos basados en el OEE.....	55
Tabla 3. Desglose de las pérdidas del proceso de descarga.	72
Tabla 4. Descripción de pérdidas del modelo.	78
Tabla 5. Desglose de pérdidas del funcionamiento del almacén.	82
Tabla 6. Desglose de pérdidas del proceso.	91
Tabla 7. Información necesaria para el cálculo del indicador.	92
Tabla 8. Desglose de pérdidas del AGV.	98
Tabla 9. Datos generales del caso B.	98
Tabla 10. Dimensionamiento de las rutas.	98
Tabla 11. Desglose de pérdidas de la estación 1 y 2.	106
Tabla 12. Desglose de pérdidas de la estación 3.....	107
Tabla 13. Desglose de pérdidas de la estación 4.....	109
Tabla 14. Factores de velocidades dependiendo de altura y volumen transportado..	110
Tabla 15. Desglose de pérdidas de la estación de trabajo 5.	111
Tabla 16. Desglose de pérdidas de la estación 6.....	113

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Producción anual de artículos científicos.....	46
Gráfico 2. Top 10 de las revistas con más publicaciones.....	47
Gráfico 3. Producción científica en función de a) posición geográfica y b) por país.	48
Gráfico 4. Autores con más producciones científicas sobre el OEE.....	49
Gráfico 5. Promedio de los cuatros factores por turno y semana a) disponibilidad, b) rendimiento, c) calidad, y d) puntualidad.....	94
Gráfico 6. Medición del indicador a) OEE, b) OPE y c) Comparativas del OEE vs OPE de un mes.....	95
Gráfico 7. Resultados del indicador por turnos de trabajo.....	99
Gráfico 8. Factores del indicador por AGV por turno.....	100
Gráfico 9. Resultados del indicador considerando las rutas por turno de trabajo.	101
Gráfico 10. Indicador de efectividad por estación de trabajo durante 8 semanas.....	115
Gráfico 11. Comparativa del indicador con promedio simple y promedio ponderado.	116
Gráfico 12. Resultados de los factores (D, R, C) del indicador por estación de trabajo.	117

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Sigla	Inglés	Castellano
AGV	Automatic guided vehicle	Vehículo de guiado automático
C		Calidad
D		Disponibilidad
ERP	Enterprise Resource Planning	Sistema de planificación de recursos empresariales
JCR	Journal citation reports	
KPIs	Key performance indicators	Indicadores claves del rendimiento
MCP	Multiple country publication	
OEE	Overall equipment effectiveness	Efectividad global del equipo
OPE	Overall process effectiveness	Efectividad global del proceso
OWI	Overall warehouse indicator	Indicador global del almacén
OWI-A	Overall warehouse indicator average	
OWI-W	Overall warehouse indicator weighted average	
P		Puntualidad
PC		Pérdidas de calidad
PD		Pérdidas de disponibilidad
PMS	Performance measurement system	Sistema de medición del rendimiento
PR		Pérdidas de rendimiento
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses	
R		Rendimiento
SCP	Single country publication	
TPM	Total productive maintenance	Mantenimiento total productivo
TT		Tiempo total
VR		Velocidad real
VS		Velocidad estándar

CAPÍTULO 1

1. Introducción

En este capítulo se pone en contexto la situación actual y se presenta la justificación de la tesis. Además, se desarrollan los objetivos que se quieren conseguir y el alcance. Finalmente, se desglosa la estructura de la tesis que resume el contenido de los siguientes capítulos.

1.1. Justificación de la tesis

Actualmente, la industria ha modificado su manera de hacer las cosas, debido a que los clientes buscan productos y servicios personalizados que satisfagan sus necesidades. La globalización ha producido que las empresas establezcan sistemas de medición que añadan valor al proceso y aumenten la utilidad económica. La información utilizada en los sistemas de medición debe ser confiable y precisa. Además, los sistemas de medición deben ser integrales y medir todos los aspectos de las funciones organizativas.

La generación de valor en las empresas a través de los procesos logísticos está en constante evolución. Actualmente, se han desarrollado indicadores del desempeño en acciones particulares. Al tratarse de actividades complejas hace falta una medición integral del rendimiento.

En esta línea, este trabajo plantea un estudio y caracterización de indicadores de rendimiento para medir la efectividad de equipos y procesos que intervienen en los procesos logísticos. Los indicadores son parámetros que ayudan a medir objetivamente una situación, proceso o momento en particular, para posteriormente gestionar, evaluar y analizar los objetivos establecidos. La medición del rendimiento es importante porque identifica la brecha entre el rendimiento actual y el rendimiento deseado, permitiendo a la empresa establecer procesos o estrategias para cerrar la brecha existente (Samad & Hossain, 2012). Para las industrias manufactureras, además de medidas financieras, son comunes las medidas de productividad y calidad (Garza-Reyes et al., 2010). Los indicadores de productividad son importantes porque ayudan a realizar operaciones eficientes, retroalimentación oportuna, progreso constante, asignación adecuada de recursos y gestión del tiempo (Stainer, 1997).

La productividad ha sido un término discutido por muchos años, pero en los últimos años ha ganado interés al momento de medir rendimientos (Hazwani et al., 2018). Este trabajo se centra en la medición de los datos digitalizados, su recolección y análisis.

La efectividad global del equipo mejor conocido como OEE por su nombre en inglés, “Overall Equipment Effectiveness” (en adelante OEE) es una métrica aceptada a nivel mundial para medir y monitorizar el rendimiento de un equipo en relación con su capacidad en condiciones óptimas. Además, es un indicador e impulsor de las mejoras del proceso y es, actualmente, considerado como una de las métricas de rendimiento más importante usadas por las organizaciones de fabricación (Binti Aminuddin et al., 2016; Cheah et al., 2020).

Esta métrica se desarrolló a partir del concepto de Mantenimiento Productivo Total por Seiichi Nakajima en 1988. El OEE es un indicador definido con tres factores: disponibilidad, rendimiento y calidad. Según, Williamson (2006) este indicador ayuda a evaluar que el equipo este haciendo lo que debe hacer, midiendo el desempeño total, tomando en cuenta las diferentes pérdidas que se puedan tener de disponibilidad, rendimiento y calidad.

Diferentes autores han demostrado que la clasificación general de las pérdidas debe ser adaptada a cada situación en particular. Asimismo, Jeong and Phillips 2001 y de Ron y Rooda (2005) establecen que las pérdidas no son apropiadas para algunas industrias de capital intensivo y deben ser ajustadas a las necesidades. Cabe señalar que el OEE originalmente fue diseñado para medir el rendimiento de un equipo en particular, lo que ha generado que algunos autores consideren que puede ser insuficiente como medida de efectividad, debido a que las máquinas no están aisladas y pertenecen a una línea de producción (Muchiri & Pintelon, 2008; Nachiappan & Anantharaman, 2006). Esta limitación ha motivado a modificar la formulación del OEE y la introducción de nuevas métricas para aplicarlo en otros procesos (L. del C. Ng Corrales et al., 2020).

Conociendo la importancia de medir el rendimiento en las operaciones de la organización y el creciente interés en la efectividad del indicador OEE esta investigación caracterizará el OEE como medida de efectividad en procesos, equipos y recursos en el ámbito de los procesos logísticos.

En este caso en particular, el trabajo se enfocó en la caracterización de tres modelos del indicador de rendimiento en el ámbito de los procesos logísticos. El primer modelo está relacionado con el proceso logístico de descarga. Según, García-Arca et al. (2018) el indicador OEE puede ser implementado en el sector servicios o en otros procesos logísticos como recepción de mercancías o selección de mercancías de un almacén. En el segundo modelo se caracteriza el indicador en un equipo logístico autónomo de

movimiento o transporte de carga. Por último, el tercer modelo define el OEE para la integración de actividades en el funcionamiento de un almacén.

1.2. Objetivos y alcance de la tesis

Este trabajo busca cubrir aspectos de medición del rendimiento en los procesos logísticos, asimismo, aportar conocimiento a la ciencia en el ámbito de la evolución e importancia de la medición para la toma de decisiones. Además, profundiza, define y caracteriza indicadores basados en el OEE como medida de efectividad de las operaciones, que aportan valor al sistema logístico. No se puede gestionar lo que no se puede medir (Jonsson & Lesshammar, 1999). Cuando se tiene una medición, el gestionar y mejorar el proceso, se puede realizar de forma puntual y acertada. El mejorar la efectividad repercute directamente en el aumento de activos de la empresa, disminuyendo pérdidas por rendimiento, paradas planificadas y no planificadas de los equipos, procesos o recursos.

Los objetivos que se quieren alcanzar con esta investigación son los siguientes:

- Comprender la importancia en la medición del rendimiento de las operaciones, analizar el indicador OEE y su implementación en la industria.
- Plantear nuevos indicadores en procesos logísticos basados en el OEE.
- Validar el indicador en la industria para comprobar su efectividad en los procesos logísticos.

La metodología utilizada en esta investigación es empírica, basada en la experiencia de otros autores, observación, experimentación y medición. Como punto inicial se hará una revisión de la literatura existente. En particular se analizará el indicador OEE para conocer el desarrollo, evolución y ámbitos de aplicación. Luego, se caracterizarán indicadores como medida de rendimiento y efectividad de los equipos y procesos en el ámbito logístico. Seguidamente, se validará el indicador en la industria para comprobar su utilidad. Por último, se expondrá una retroalimentación y conclusión de todo el proceso de diseño y aplicación de los indicadores en los equipos y procesos propuestos.

El alcance definido para este trabajo es el cálculo del OEE adaptado a las necesidades, principalmente, de los procesos logísticos. Las adaptaciones se particularizarán, primeramente, a un proceso logístico en la descarga de camiones que transportan mercancías en contenedores de material unitario o conglomerado en pallets.

Posteriormente, a un sistema de manipulación de carga o transporte de carga, específicamente vehículos guiados automatizados. Por último, al funcionamiento de un almacén considerando el flujo del producto terminado por las distintas secciones hasta su disposición final. Para cada modelo se definirán las pérdidas que afectan los factores que componen el indicador. Además, se caracterizará la formulación y cálculo de cada factor tomando como referencia los factores que componen el OEE de fabricación (disponibilidad, rendimiento y calidad).

1.3. Estructura de la tesis

A continuación, se desglosa la estructura de la investigación y el contenido de cada sección. En el capítulo 1 se desarrolla el ámbito del trabajo que presenta una introducción del área de estudio de la tesis doctoral, también se describen los objetivos y alcance del trabajo y en la última sección la estructura de la tesis capítulo a capítulo.

El capítulo 2 contiene la revisión bibliográfica donde se analiza y discuten los trabajos de investigación relacionados con el tema. Se abordan temas como los procesos logísticos, sistemas de medición del rendimiento y la importancia de los indicadores. Además, se realiza una revisión sistemática del concepto OEE para conocer su génesis, evolución y los campos de actuación existentes.

En el capítulo 3 se presentan los modelos teóricos del indicador de efectividad global planteados en varios ámbitos. Tomando como punto de partida el modelo OEE de fabricación, se caracterizan tres modelos adaptados a las necesidades. Primero, se desarrolla un modelo donde se mide la efectividad de un proceso logístico, particularizando las variables del proceso de descarga de un camión. Segundo, se realiza un modelo para medir la efectividad de un equipo en un sistema logístico. Como equipo utilizado para medir, se seleccionó un vehículo de guiado automático por su creciente utilización en el entorno logístico. Por último, se plantea el modelo para medir la efectividad del funcionamiento de un almacén considerando las diferentes secciones que lo componen.

En el capítulo 4 se muestran las validaciones de los modelos en cada sector. Cada uno de los modelos genéricos fueron adaptados y validados en diferentes empresas. En este capítulo se presentan, para cada modelo, detalles de cada caso de estudio y el alcance que describe los aspectos a considerar. También, se encuentran la aplicación y desarrollo de los modelos donde se plasma la obtención de datos, formulación de los

factores que componen el indicador y un desglose de las pérdidas que se presentan. Finalmente, se muestran gráficos con datos y análisis de los resultados obtenidos.

Por último, en el capítulo 5 se detallan las conclusiones generales del trabajo y se proponen futuras líneas de investigación que puedan aportar valor al presente trabajo.

CAPÍTULO 2

2. Estado del arte

En este capítulo se presenta la revisión de literatura de algunos conceptos y su importancia en esta investigación. Se abordan temas sobre los procesos logísticos, sistemas de medición del rendimiento y la importancia de los indicadores de rendimientos. Por último, se presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el indicador en cuestión OEE.

2.1. Procesos logísticos

Los profesionales y los académicos coinciden que la función logística es esencial dentro de las empresas (Rutner & Langley, 2000). El término logística está relacionado con añadir valor a un producto, esto debido a que el comprador y vendedor han acordado comprar o vender un producto en ciertas condiciones que incluyen precio y tiempo de entrega. Cuando el producto se encuentra en tránsito, el producto puede ser tratado como carga o mercancía. Si así se ha acordado, la mercancía puede necesitar un tiempo de espera durante el tránsito. A esto se le conoce como almacenamiento y su capacidad, tamaño, tipo y localización será dependiente del tipo de mercancías a almacenar. El comprador puede que decida comprar por volumen en una periodicidad de tiempo determinada. Esta decisión podría influir en lo que se conoce como nivel de inventario, fuente de costes y podría ser de especial interés para las organizaciones. A los pasos anteriores hay que sumarle las actividades administrativas propias de la gestión como la documentación a presentar entre fronteras, documentos propios de actividades de importación y/o exportación.

Utilizando el contexto anterior, la logística se podría definir como:

Logística = suministro + gestión de materiales en fabrica + distribución a los clientes

Este concepto y su explicación fue introducido por (Islam et al., 2013)

Mangan & Lalwani (2016) asegura que la logística está relacionada con obtener, de la mejor forma, el producto adecuado, en la cantidad y calidad adecuada, en el lugar y tiempo correcto, para el cliente indicado, con el precio correcto. Rushton et al. (2014) explica que la logística es concerniente a la transferencia eficiente de bienes desde la fuente de la materia prima hacia la fábrica. Y de ahí, al punto de consumo, de una manera eficiente económicamente, con un servicio aceptable a los clientes.

Existen 5 elementos clave en la logística: el transporte, almacenamiento, inventario, empaquetado y procesamiento de la información (ver Figura 1).



Figura 1. Elementos clave de la gestión logística

Son más comunes en la literatura las mediciones individuales de los procesos logísticos que las mediciones basadas en un sistema. En el libro de Gleissner & Femerling (2013) define cada uno de los elementos clave de la gestión logística y una aproximación a la medición de su desempeño.

La gestión del transporte incluye la selección del modo, el valor que genera el transporte y los sistemas de transporte a emplear. La base para la medición del rendimiento cuantitativo de los modos de transporte individuales es el tonelaje transportado.

En cuanto a la gestión del inventario está relacionada directamente con la gestión del almacén. El objetivo principal es disminuir el inventario para evitar costes y añadir valor económico al precio final de los productos.

El procesamiento de información incluye la codificación, transmisión y realimentación para la toma de decisiones. La medición del rendimiento está orientada hacia la disminución del ruido en la transmisión y recepción de la información, además de su disposición final para la trazabilidad de productos.

El empaquetado y la unitarización permiten a las empresas darle seguimiento al proceso de transporte de mercancía, además de garantizar la trazabilidad de un producto a través de toda la cadena de suministro.

La gestión del almacén incluye las actividades de logística de entrada, recepción, almacenaje e inventario de la materia prima. Se ha convertido en una de las actividades críticas de la cadena de suministro.

La utilización de tecnologías de la información afecta al desempeño de la gestión del almacén y, en general, de los elementos clave en la logística. En estudio presentado por Rogers et al. (1996) sugieren que el uso de las tecnologías de la información produce impactos positivos en la reducción de tiempo de ciclo, mejora en la calidad, así como el aumento en la productividad. Las tecnologías de la información proveen de información al proceso logístico para la toma de decisiones.

Los procesos logísticos comprenden una serie de actividades complejas relacionadas con los elementos clave de la gestión logística, que requieren la recolección de métricas para medir adecuadamente su desempeño. El desempeño logístico puede ser visto como un subgrupo de mediciones de desempeño organizacionales. Chow et al. (1994), identifican 7 dimensiones del desempeño logístico que son: eficiencia, eficacia, calidad, productividad, calidad de la vida laboral, innovación y rentabilidad. Las diversas dimensiones del desempeño logístico hacen difícil su medición en su conjunto. Las mediciones de desempeño más tradicionales están clasificadas en estadísticas financieras brutas, estadísticas de coste, indicadores de desempeño y mediciones de calidad. Entre los indicadores de desempeño están los de entradas vs salidas como, por ejemplo, número de envíos entre vehículos por hora.

Otros autores proponen una visión más gerencial de los indicadores de desempeño. Wudhikarn et al. (2018) elaboran un compendio de las principales publicaciones sobre las mediciones del desempeño, entre las que se encuentran la tasa de cumplimiento de pedidos, tiempo y velocidad de entrega, tiempo de entrega de pedido, capacidad utilizada, entre otras. Coinciden todas en que son mediciones de desempeño en aspecto muy particulares de los procesos logísticos.

2.2. Sistemas de medición del rendimiento

Existen muchas definiciones en la literatura sobre sistemas de medición del rendimiento, PMS por sus siglas en inglés (Performance Measurement System), en adelante PMS. Una de ellas afirma que estos sistemas son procesos establecidos para las mediciones del rendimiento y así cuantificar la eficiencia y efectividad de las acciones de mejora (Neely et al., 2005). Estas mediciones capturan la esencia del desempeño organizacional y son los cimientos para la medición del desempeño (Gunasekaran et al., 2004). Los cambios organizacionales surgidos por factores endógenos para producir mejoras a la cadena de suministro están relacionados con una métrica para medir su éxito. Una vez haya sido alcanzado, un nuevo objetivo realista y retador debe ser propuesto (Braz et al., 2011; Fortuin, 1988).

Sin embargo, los PMS van más allá de una compleja fórmula y cifras objetivo. Algunos autores detallan la importancia de establecer desde el principio un objetivo, alcance, frecuencia de la medición y periodicidad en la revisión de estos indicadores (Neely et al., 1997). Además, otros autores destacan distintos niveles agregados a la medición para tener una respuesta aún más alineada con los objetivos de la organización (Braz et al., 2011; Globerson, 2007).

En la literatura existen muchos marcos para las PMS que se enfocan en la estructura, más que en el procedimiento, esto hace que sea más difícil su ejecución desde el punto de vista de su desarrollo en el entorno de trabajo (Folan & Browne, 2005).

Los PMS pueden ser estructurados para medir diferentes niveles dependiendo de las necesidades de la organización (ver Figura 2). El nivel más básico de las medidas es el individual de equipos o procesos, el segundo nivel, está dado por un conjunto de medidas de rendimiento lo que hace el sistema de medición más complejo y el tercero, es la relación del PMS en el entorno en que opera (Neely et al., 2005).

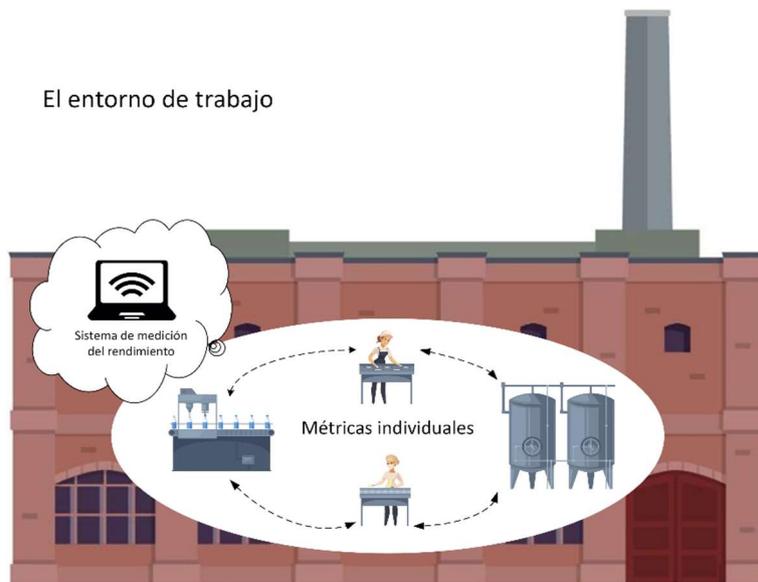


Figura 2. Niveles de organización de las PMS

Band (1990) propone que los PMS debieran contar con apoyos de la dirección general de la organización, involucrar a los colaboradores en su desarrollo, asegurar que la medición sea relevante para los directores y al desempeño de los colaboradores involucrados. Esto podría asegurar un éxito en su desarrollo e implementación, dado por la calidad de la medición y resultados esperados. Por otro lado, Maskell (1991) sugiere que las mediciones de desempeño varían entre ubicaciones, varían en el tiempo y dependiendo de las necesidades y cambios en la organización y además, no deben estar basadas en indicadores financieros. Por último, sugiere que las mediciones están diseñadas para fomentar la mejora en lugar de limitarse a supervisar.

Según el marco general presentado por Gutierrez et al. (2015), los pasos para el desarrollo de un PMS empiezan, en primer lugar, por el diseño de la medición respondiendo a las siguientes preguntas.

- ¿Cuáles son los principales objetivos de la organización?
- ¿Qué debería ser medido?
- ¿Cuál es la medida del desempeño más apropiada para utilizar?
- ¿Cuáles son los atributos para la medición del rendimiento?
- ¿Cuáles deberían ser los procedimientos para analizar la medición del desempeño?

En segundo lugar, la implementación de la medición debe responder a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuáles son las principales características que hacen que esta medición se deba realizar con regularidad en la organización?
- ¿Cuáles son los sistemas y procedimientos que hay que poner en marcha?

En tercer lugar, después de la implementación del indicador se requiere resolver las siguientes dudas sobre el uso de la medición:

- ¿Qué conclusiones se podrían obtener basadas en el análisis y la información del desempeño?
- ¿Qué atributo de la medida del rendimiento debería ser revisado para una mejora continua?
- ¿Qué acciones deberían tomarse?

Por último, para evaluar la relevancia de la medición del rendimiento y mejora, se debe responder a las siguientes preguntas:

- El PMS utilizado hoy, ¿sigue siendo relevante para el ambiente competitivo y la estrategia organizacional?
- Las medidas del rendimiento, ¿siguen siendo relevantes, apropiadas y exhaustivas?
- ¿Los sistemas y procedimientos son adecuados para el PMS?

Este modelo de tres etapas para el ciclo de vida de una PMS fue sugerido por Bourne et al. (2000). En la fase de diseño se identifican los principales objetivos de la medición, diseño de la medición y desarrollo del marco específico final con las métricas establecidas. Estas mediciones provienen de la estrategia organizacional, que considera clientes, requerimientos de los principales interesados, objetivos del negocio y el rol del PMS (Braz et al., 2011). Las mediciones son elementos esenciales para la planificación y control estratégico de los ciclos del negocio, ya que son utilizados para evaluar la estrategia y sin estas mediciones los responsables de la toma de decisiones no estarán seguros si se ha alcanzado el objetivo. Lohman et al. (2004), sugiere que la misión del negocio podría ser utilizada como guía para la identificación de los objetivos estratégicos y resaltar la importancia de la disponibilidad de la información en esta etapa de diseño.

En la fase de implementación, se concentra la atención en recoger, analizar y distribuir la información, así se asegurará la medición con regularidad (Braz et al., 2011; Lohman et al., 2004). La efectiva implementación requiere que la medición del rendimiento esté alineada con la estructura y sistemas organizacionales. La implementación de las PMS promueve cambios organizacionales. El aprendizaje a nivel organizacional viene dado por la adquisición, almacenaje, análisis, interpretación y distribución de la información y el conocimiento sobre el desempeño.

Al tratarse de un cambio organizacional, existen muchos retos en su adopción como la cultura, sistemas y procesos (Kennerley & Neely, 2002). En la dimensión cultural la adopción de una PMS está relacionada con los trabajadores y cultura organizacional, la forma en la que la organización opera. La dimensión de sistemas hace referencia a la interrelación de los procesos organizacionales, en los aspectos tecnológicos y procedimentales. Por último, en la dimensión de los procesos, está relacionada con la forma en la que intervienen los agentes del proceso y si hay forma de medir lo que ocurre en él.

Para cuantificar el rendimiento individual y/u organizacional de una PMS, los indicadores clave de desempeño por sus siglas en inglés KPI (key performance indicator), en adelante KPI, permite una medición objetiva, basada en las metas organizacionales.

2.3. Indicadores clave de desempeño (KPI)

Los KPI son indicadores que actúan como un grupo de medidas que se enfocan en aspectos críticos del desempeño organizacional (Badawy et al., 2016). En la patente presentada por Peng et al. (2007), para el desarrollo de un sistema semi automático de aprendizaje para descubrir los indicadores clave en los procesos organizacionales, divide en tres tipos los KPIs:

1. Indicadores principales o accionables (leading indicator)
2. Indicadores retrospectivos o de resultados (lagging indicator)
3. Medidas diagnósticas

Los indicadores principales miden las actividades que tienen un efecto significativo en futuro desempeño del negocio. Los indicadores retrospectivos, son medidas de actividades pasadas, que podrían llegar explicar comportamiento o efectos a futuro. Y, por último, el indicador de medida diagnóstica, nada que ver con los anteriores, ya que

señala el comportamiento/estado del proceso; en otras palabras, indica la salud del proceso o actividad.

Según el compendio presentado por Badawy et al. (2016) se pueden definir 12 características principales de los KPIs:

1. Número reducido de indicadores para una mejor utilización. Del principio cuantos menos mejor.
2. Los KPIs deben ser explorables, donde el usuario sea capaz de profundizar en los detalles.
3. Los usuarios deben poder entender el indicador fácilmente para saber qué acciones emprender, y por esto los KPIs deben ser sencillos.
4. Los KPIs deben ser prácticos para que los usuarios sepan como influir en su resultado.
5. Todo indicador debe tener un dueño o propietario para asignar responsabilidad y trabajo para mejorar sus resultados.
6. Los KPIs deben ser referenciados para que los usuarios conozcan el origen y el contexto del indicador.
7. Debe existir una correlación entre el indicador y los resultados deseados. Su medida debe estar correlacionada con la acción adecuada.
8. Debe existir un equilibrio entre métricas financieras y no financieras.
9. Los indicadores que existan deben fortalecerse entre sí, por esta razón deben estar alineados.
10. Deben ser validados por los usuarios y los trabajadores no pueden eludir los KPIs
11. Deben tener una periodicidad en su medición, haciéndolos periódicos.
12. Los KPIs deben ser distribuidos para que vinculen la responsabilidad a un equipo específico de trabajadores.

Las organizaciones utilizan, la mayoría del tiempo, sistemas de información o cuadros de mando integral para el control de los KPIs. El control de estos indicadores es una tarea crítica del negocio que busca oportunidades de mejora e incrementar la productividad del negocio. Este control provee de información a los responsables de la toma de decisión para corregir o mejorar el proceso controlado por los KPIs. Sin embargo, por el volumen de información que manejan estos sistemas de información se hace difícil la gestión de los datos y su procesamiento (Maté et al., 2014).

Normalmente, los KPIs son utilizados por las organizaciones para ayudar a los analistas a medir el éxito o fracaso de una meta preconcebida. Esta información es importante para repetir o no los pasos que llevaron al éxito o fracaso, de tal forma, que se pueda hacer una previsión de los resultados esperados con una estrategia particular (Maté et al., 2014).

Existen cuatro razones por las cuales una estrategia puede no ser adecuada (Rachad, 2014).:

1. Tener en el cuadro de mando demasiados KPIs que podrías disminuir la atención al alcance.
2. Establecer una lista de KPIs muy grande y que no tenga ninguna relación con los objetivos.
3. Una disminución del enfoque estratégico al seleccionar los KPIs indicados.
4. Falta de entendimiento sobre la medida del rendimiento lo que lleva a errores en el control y la medición

La medición del rendimiento en el ámbito logístico no es un tema nuevo, algunos autores han diseñado algunos indicadores particulares para medir el rendimiento de la gestión logística. En la tesis doctoral de Davidson (2006) realiza una revisión de las principales características los sistemas de medición del rendimiento y de la función logística para uso comercial y militar, para así sugerir un marco de KPI capaz de ser aplicado en la logística humanitaria. Por otro lado, Lu & Lu (2011) implementaron un indicador KPI basado en modelos de análisis de jerarquía de lógica difusa para medir el rendimiento logístico de la organización, garantizando una evaluación correcta, y reflejar la situación real del negocio y su función logística. Otro ejemplo, la propuesta de KPI de Krauth et al. (2005) para proveedores de servicios logísticos propone un marco para medir el rendimiento desde cuatro dimensiones distintas, rendimiento interno, externo y el rendimiento de corto y largo plazo.

La automatización, el aprendizaje automático en los procesos y, en general, la digitalización de los datos ha provocado un cambio en la recolección de las mediciones. No todas las organizaciones son capaces de adaptarse a la tecnología, sin embargo, es un hecho poder adaptarse a la tecnología se ha convertido en una ventaja competitiva. En la revisión de literatura del trabajo presentado por Badawy et al. (2016), acertadamente, agrupó los KPIs por su nivel de automatización en la medición. En primer lugar, los KPIs manuales, en general parten de una encuesta, que luego es

validado por las partes interesadas en el desarrollo del KPI. Normalmente, el conjunto de características que van alineadas con la medición del rendimiento es agrupado para luego eliminar los parámetros, que una vez validados, no cumplen el objetivo de esta medición. En segundo lugar, los KPIs semi automáticos, son una combinación de mediciones que se obtienen de forma automática y mediciones obtenidas por encuestas. El autor llamó a este tipo de KPIs, KPIs con estrategia de selección, por su proximidad con los objetivos de medición y la posibilidad de automatizar la medición. Y KPIs con estrategia predictiva son indicadores basados en algunas herramientas tecnológicas, como la minería de datos, modelos predictivos, inteligencia de negocio, entre otras, utilizadas para predecir el comportamiento del proceso con la medición en tiempo real. Aún hoy, este último grupo de indicadores está siendo estudiado para mejorar la efectividad de la medición.

2.4. Efectividad Global del Equipo (OEE)

La efectividad global del equipo mejor conocido como OEE por su nombre en inglés “Overall Equipment Effectiveness”, fue utilizado por primera vez a finales de los 80 por Seiichi Nakajima como parte del Mantenimiento Productivo Total (TPM por sus siglas en inglés) en adelante TPM (Nakajima, 1988). El TPM tiene como objetivo conseguir cero averías y cero defectos en los equipos. De esta iniciativa nace el OEE que es una medida utilizada inicialmente para medir el rendimiento productivo de la maquinaria industrial, siendo un factor clave para identificar las pérdidas que se producen durante el proceso. Conocer las causas de pérdidas o desperdicio que se da en un proceso permiten evaluar el progreso y buscar soluciones para aumentar la productividad y estabilizar los niveles de eficiencia.

El OEE se conoce como una medida total del rendimiento de un equipo, es decir da la idea del grado en que el equipo hace lo que se supone que debe hacer (Williamson, 2006). También es definido como un ratio de productividad que mide la relación entre la fabricación real y lo que idealmente se pudiera fabricar (Braglia et al., 2008). De acuerdo con L. del C. Ng Corrales et al. (2020) hay un creciente interés en la caracterización, desarrollo e implementación del OEE en otros ámbitos diferentes al de fabricación donde originalmente se aplicó. Tanto la comunidad científica como los profesionales han puesto su atención en el desarrollo de este indicador por los múltiples beneficios que generan. Entre los beneficios se destacan:

- Identificar las pérdidas o cuellos de botella durante el proceso

- Ayuda a evaluar el progreso productivo
- Maximiza el rendimiento de los equipos
- Ayuda en la toma de decisiones
- Aumento en la calidad de los procesos
- Mejorar los rendimientos económicos

Existe cierta confusión sobre si el OEE mide efectividad o eficiencia. Sabiendo que son términos relacionados, la efectividad se define como la capacidad de conseguir los resultados propuestos y la eficiencia como el cumplimiento de los objetivos, pero con el mínimo uso de los recursos organizacionales. Lo que indica que el mejor término que define el OEE es el de efectividad, ya que sus medidas solo están relacionadas al cumplimiento de objetivos (Muchiri & Pintelon, 2008).

Siendo el indicador parte esencial de esta investigación, se realizó una revisión sistemática de la literatura del concepto, con el objetivo de conocer y analizar los planteamientos, las caracterizaciones y aplicaciones existentes del OEE. El proceso para esta revisión sistemática se desarrolló en seis puntos:

1. Definición de las preguntas de investigación.
2. Selección de las bases científicas de datos.
3. Búsqueda en las bases de datos usando una cadena de búsqueda.
4. Definición y aplicación de los criterios de inclusión y exclusión a la búsqueda.
5. Extracción y análisis de los artículos resultantes.
6. Respuestas a las preguntas de investigación.

Esta revisión sistemática proporciona transparencia en el procedimiento para seleccionar la información.

2.4.1. Definición de las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación ayudan a delimitar el tema de estudio y sirven como guía a la investigación. Para esta revisión sistemática tres preguntas serán contestadas utilizando la información seleccionada.

1. ¿Cuál es el enfoque de las investigaciones actuales en el dominio del OEE?
2. ¿Qué modelos basados en el OEE se han desarrollados?
3. ¿Cuáles son las principales contribuciones y futuras tendencias en el OEE?

Basados en estas 3 preguntas se conseguirá conocer la evolución cronológica del indicador, sus principales contribuciones y modelos desarrollados.

2.4.2. Selección y tratamiento de datos

Como punto inicial se seleccionaron Web of Science (WoS) y Scopus, dos bases de datos reconocidas por su contenido, actualización y alta calidad de información. Ambas bases de datos poseen gran cantidad de revistas científicas de alta calidad en campos de ciencia, tecnología, medicina, ciencias sociales, artes y humanidades. La búsqueda generalizada se realizó con el término 'overall equipment effectiveness', la combinación de las palabras claves utilizadas en las bases de datos son 'overall equipment effectiveness' Y 'OEE'. Con esta búsqueda se obtuvieron un total de 1.115 documentos; de los cuales 365 de la base de datos WoS y 750 de Scopus.

Para una selección estandarizada se establecieron criterios de inclusión y exclusión basados en Kitchenham & Charters (2007) para evitar el sesgo en la discriminación de los resultados. Los criterios fueron definidos de la siguiente manera:

- I1: El artículo es una revisión de literatura y está relacionado con el OEE y su aplicación;
- I2: El artículo menciona un nuevo modelo basado en el OEE;
- I3: El artículo utiliza el indicador del OEE para verificar una mejora o medir los resultados de un cambio en el proceso;
- E1: El documento está escrito en un idioma diferente al inglés;
- E2: El termino OEE es solo mencionado y no hay cálculo o aplicación del indicador;
- E3: El documento no está categorizado como un artículo ejemplo: libros, material editorial, cartas, revistas o artículos de conferencias.

Para esta revisión sistemática solo se utilizaron los artículos, comparados con los artículos de conferencias son más influyentes y completos debido a que contienen más información y citas (González-Albo & Bordons, 2011).

Se empleó el diagrama de flujo de PRISMA "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses" para evidenciar de manera transparente la búsqueda y selección de documentos. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo PRISMA para esta revisión sistemática de la literatura.

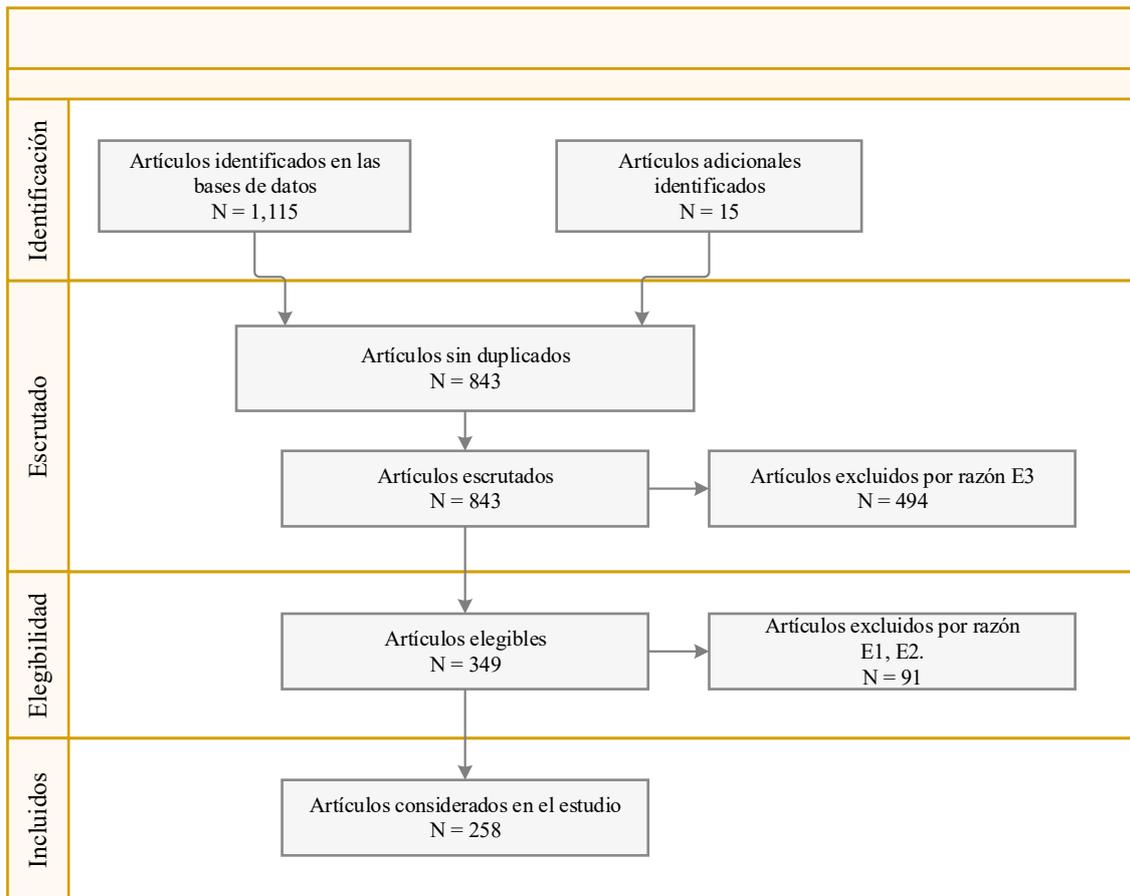


Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses).

Utilizando la herramienta bibliometrix R-package se consolidó la información de ambas bases de datos para un mejor estudio bibliométrico. La Tabla 1 muestra un resumen general de los datos; la cantidad de artículos analizados son 258 provenientes de 150 revistas en un periodo de tiempo de 27 años.

Periodo de tiempo	1996 - 2022
Revistas	150
Artículos	258
Tasa de crecimiento anual (%)	11,76
Palabras claves más	643
Palabras claves del autor	702
Autores	677
Autores de documentos de autoría única	27

Tabla 1. Resumen general de los datos.

El interés por la implementación, aplicación y medición del indicador en diferentes sectores de la industria ha ido en incremento. La producción anual de artículos científicos lleva varios años consecutivos en aumento. El Gráfico 1 muestra que desde el año 2015 la producción científica crece, presentando en los últimos 5 años más del 50% de su producción total de artículos. Para el 2018 el tema tiene una producción del 10,2%, para el 2019 tiene un 11,3%, para el 2020 un 12,1%, para el 2021 un 11,3% y para el 2022 hasta junio lleva un 7,0% con perspectiva a rebasar o igualar el aumento de años anteriores.

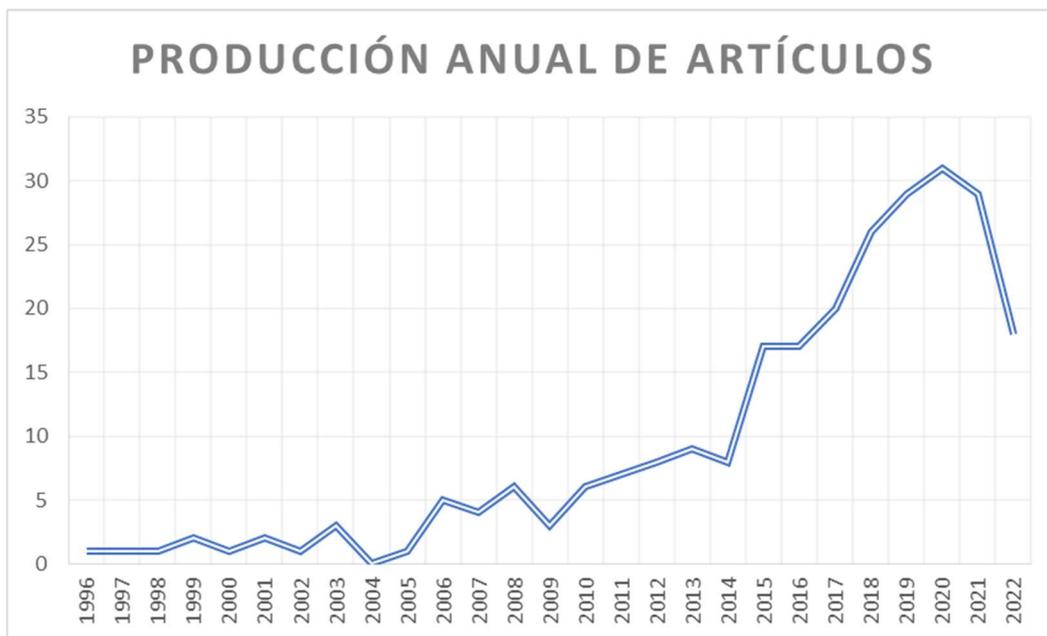


Gráfico 1. Producción anual de artículos científicos.

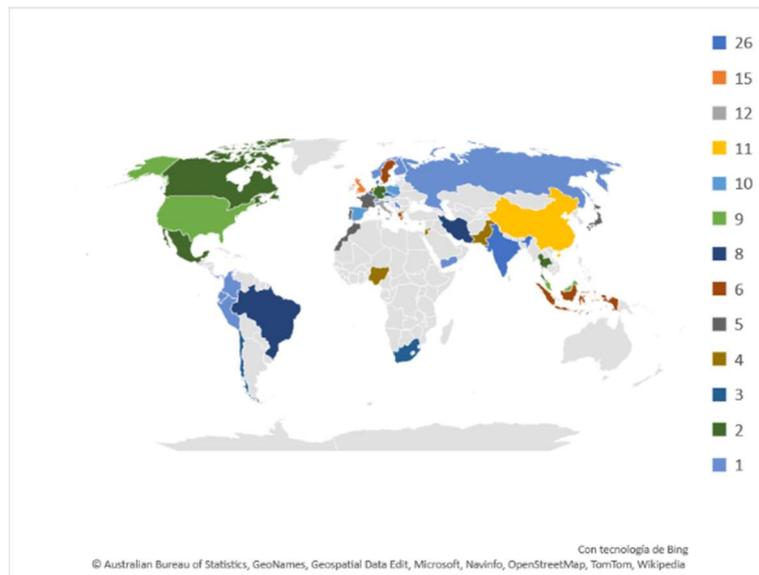
De las 150 revistas el Gráfico 2 muestra las 10 revistas con más publicaciones del OEE. En su mayoría revistas con temas en fabricación y mantenimiento, sin embargo, también se aprecian revistas de sostenibilidad, productividad, lean six sigma, entre otras.



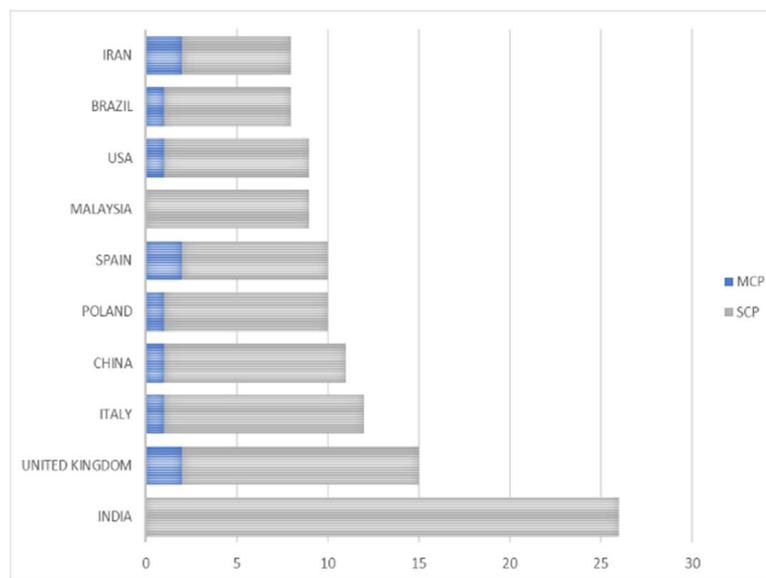
Gráfico 2. Top 10 de las revistas con más publicaciones.

La producción científica por ubicación geográfica está controlada en un 80% por los continentes de Europa y Asia. El Gráfico 3a presenta un mapa con las contribuciones basados en la cantidad de artículos producidos por país, donde el continente europeo tiene el 43% de las publicaciones, seguido de Asia con un 37%, América con 13%, África con 6% y por últimos dos países que pertenecen a Europa/Asia con un 2%.

En el Gráfico 3b se muestra el top 10 de países con mayor cantidad de publicaciones de un solo país con sus siglas en inglés SCP (single country publication) y publicación en varios países con sus siglas en inglés MCP (multiple country publication). Más del 80% de las publicaciones son por autores que pertenecen al mismo país, se aprecia que en India y Malasia todas sus publicaciones han sido SCP, a diferencia de los otros países del top 10 que si han realizado alguna colaboración, aún siendo mínima, con otros países.



a) Posición geográfica



b) Producción científica por país (Top 10)

Gráfico 3. Producción científica en función de a) posición geográfica y b) por país.

El Gráfico 4 presenta los diez autores con más publicaciones en las bases de datos analizadas. El primero es Panagiotis Tsarouhas un autor griego que en la mayoría de sus publicaciones describe casos de estudios aplicando el OEE a diferentes industrias de la producción, por ejemplo, en líneas de producción de croissants (P. Tsarouhas, 2019), líneas de producción de helados (P. H. Tsarouhas, 2019) y plantas de producción

de quesos italianos (P. H. Tsarouhas, 2013), en todas ellas se identificación oportunidades de mejoras en los sistemas de producción. El segundo autor Marcello Braglia con seis artículos publicados ha desarrollado varios modelos basados en el OEE de fabricación entre los que destacan, Overall Equipment Effectiveness of a manufacturing line (OEEML) (Braglia et al., 2008), Overall Task Effectiveness (OTE) (Braglia et al., 2019) y Revised overall labour effectiveness (ROLE) (Braglia et al., 2021).

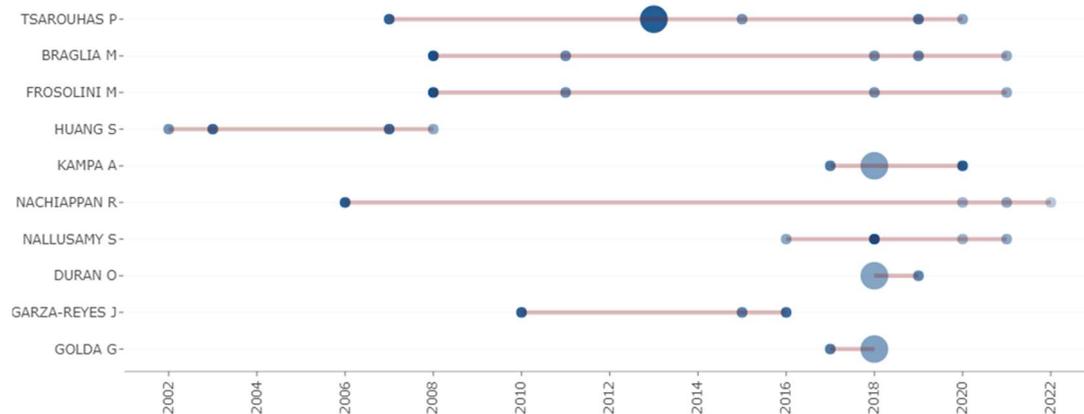


Gráfico 4. Autores con más producciones científicas sobre el OEE.

La red de co-ocurrencia de las palabras clave de los autores se muestra en la Figura 4. La red está conformada por cuatro grupos:

1. El primer grupo comprende palabras relacionadas con la formulación del OEE como disponibilidad, rendimiento, calidad, tiempo de inactividad, pérdida de velocidad, etc.
2. El segundo grupo, tiene palabras relacionadas con el mantenimiento productivo total (TPM), optimización, producción, mantenimiento, etc.
3. El tercer grupo, incluye términos como eficacia, rendimiento y medición del rendimiento, etc.
4. El cuarto grupo tiene 13 palabras clave relacionadas con temas de actualidad como industria 4.0, simulación, fabricación ajustada, seis sigma, SMED y DMAIC.

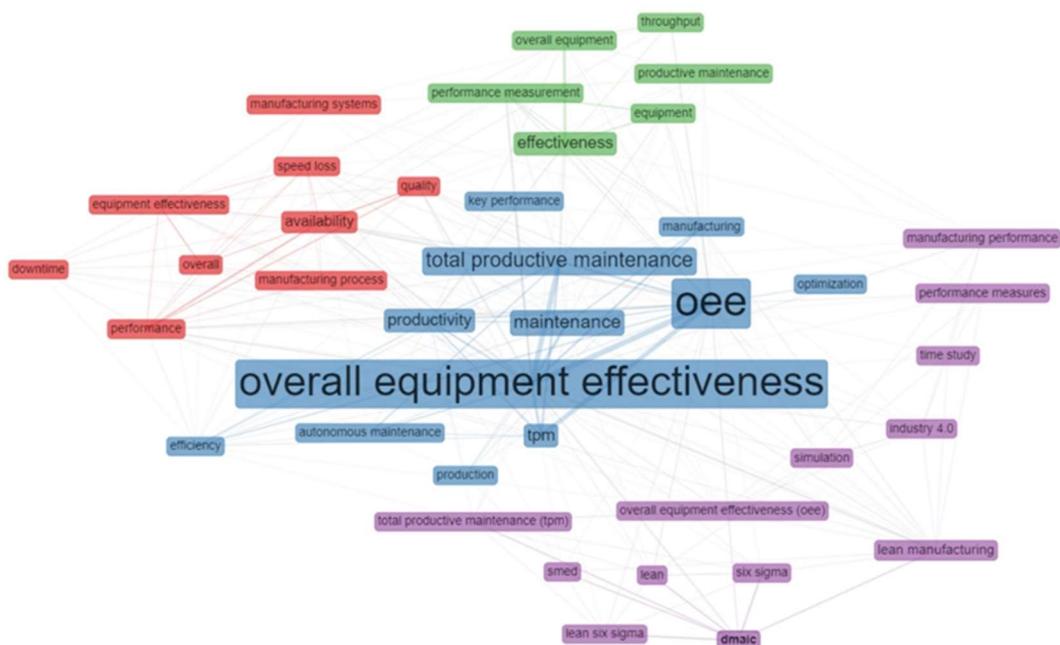


Figura 4. Red de co-ocurrencia de las palabras clave de los autores.

El OEE es una herramienta utilizada en la mejora continua, permitiendo que se pueda medir la utilización y efectividad del equipo o proceso. Como parte de los sistemas de medición, este indicador es utilizado para monitorizar el desempeño productivo dentro de las empresas. Los resultados del indicador pueden ser utilizados para comparar el rendimiento interno e identificar los fallos o cuellos de botella, y también para evaluar las mejoras realizadas dentro de la organización.

2.4.3. Modelos de OEE existentes

El OEE se ha convertido en una herramienta cuantitativa de uso común para medir la efectividad. Esto ha impulsado la adaptación del indicador a diferentes sectores de la industria, para identificar y medir las pérdidas que se presentan durante el proceso. Se realizó una revisión sistemática de la literatura publicada en una revista JCR donde se identificaron los modelos derivados del OEE comprendidos desde 1996 a abril 2020, se presentó un cuadro que detalla el autor, año, nombre del modelo y breve descripción (L. del C. Ng Corrales et al., 2020). La Tabla 2 presenta la lista de los modelos actualizados a la fecha.

Referencia	Modelo	Breve descripción
(Huang et al., 2002; Muthiah et al., 2008)	<i>Overall throughput effectiveness (OTE)</i>	Calcula la productividad de un sistema de fabricación y mide el nivel de rendimiento.
(deRon & Rooda, 2005)	<i>Equipment effectiveness (E)</i>	Mide los estados dependientes del equipo, como estado productivo, estado de inactividad programado y estado de inactividad no programado.
(Nachiappan & Anantharaman, 2006)	<i>Overall Line Effectiveness (OLE)</i>	Mide la productividad en la línea de un sistema de fabricación.
(Sheu, 2006)	<i>Total Equipment Efficiency (TEE)</i>	Para lograr la eficiencia total del equipo, debe incluir la eficiencia en el uso de recursos de una máquina. Este factor de entrada (necesidades de recursos) se conoce como la eficiencia de entrada.
(Muchiri & Pintelon, 2008)	<i>Overall Asset Effectiveness (OAE)</i> <i>Overall Production Effectiveness (OPE)</i>	Mide las pérdidas debidas a factores externos e internos que contribuyen a la efectividad global de los activos de producción.
(Badiger et al., 2008)	<i>Modified OEE</i>	Incluye un nuevo factor de usabilidad; clasifica los eventos de tiempo de inactividad no planificados en tiempos de inactividad relacionados con el equipo.
(Braglia et al., 2008)	<i>Overall Equipment Effectiveness of a manufacturing line (OEEML)</i>	Mide el rendimiento del sistema con una línea automatizada.
(Elevli & Elevli, 2010)	<i>OEE for Shovel / OEE for Trucks</i>	Medición de OEE para equipo utilizado en la minería.

Referencia	Modelo	Breve descripción
(Raja et al., 2010)	<i>Overall Line Effectiveness (OLE)</i>	Medición del desempeño de una línea de producción en un sistema de fabricación.
(Anvari et al., 2010)	<i>Overall Equipment Effectiveness market-based (OEE-MB)</i>	Supervisa la producción en el mercado del acero; mide efectividad de los equipos para un ciclo de proceso completo.
(Anvari & Edwards, 2011)	<i>Integrated Equipment Effectiveness (IEE)</i>	Esta integración se basa en tres elementos basado en la carga, en el capital y en elementos del mercado.
(Wudhikarn, 2012)	<i>Overall Equipment and Quality Cost Loss (OEQCL)</i>	Calcula las pérdidas de los equipos, concretamente pérdidas de costes de producción y calidad, en unidades monetarias.
(Eswaramurthi & Mohanram, 2013)	<i>Overall Resource Effectiveness (ORE)</i>	Incluye pérdidas relacionadas con los recursos. P.E. mano de obra, materiales y métodos.
(Jauregui Becker et al., 2015)	<i>Machining Equipment Effectiveness (MEE)</i>	Calcula la OEE de un entorno de fabricación de alta mezcla y bajo volumen de fabricación.
(Garza-Reyes, 2015)	<i>Overall Resource Effectiveness (ORE)</i>	Provee de información del desempeño del proceso basado en los siguientes factores: eficiencia del material, coste del proceso y coste del material.
(Domingo & Aguado, 2015)	<i>Overall Environmental Equipment Effectiveness (OEEE)</i>	Identifica las pérdidas debidas al impacto ambiental de un puesto de trabajo.
(Zammori, 2015)	<i>Fuzzy Overall Equipment Effectiveness (FOEE)</i>	Identificar las fluctuaciones en el desempeño utilizando números difusos.
(Dindarloo et al., 2016)	<i>Stochastic Shovel Effectiveness</i>	Cuantifica el desempeño efectivo de una pala hidráulica y eléctrica

Referencia	Modelo	Breve descripción
(Mohammadi et al., 2017)	<i>OEE of BELT Equipment</i>	Medición del desempeño de los equipos excavación, utilizados en el sector de la minería.
(Larrañaga Lesaca et al., 2017)	<i>Strategic Equipment Effectiveness (SOEE) Operational Equipment Effectiveness (OOEE)</i>	Medida de la efectividad global de un sistema eléctrico integral.
(da Silva et al., 2017)	<i>Overall Machinery Effectiveness (OME)</i>	Identifica y clasifica las unidades de decisión en términos de efectividad.
(Pinto et al., 2017)	<i>OEE of port terminal</i>	Identifica la terminal más eficiente, abordando los factores manejables o no manejables.
(Puvanasvaran et al., 2017)	<i>Modified OEE</i>	Incluye las pérdidas asociadas con el factor humano y usabilidad (frecuencia de preparación y proceso de cambio)
(Nakhla, 2018)	<i>Extended Overall Equipment Effectiveness (E-OEE)</i>	Evalúa todo el proceso teniendo en cuenta los recursos humanos y el rendimiento del equipo. Se aplica en actividades médicas de los quirófanos.
(García-Arca et al., 2018)	<i>OEE to transport management</i>	Medida de la efectividad adaptando el OEE en la gestión del transporte por carretera.
(Muñoz-Villamizar et al., 2018)	<i>Modified OEE</i>	Medición de la efectividad del transporte urbano de mercancía.
(Braglia et al., 2018)	<i>Overall Material Usage Effectiveness (OME)</i>	Medición de la efectividad en el uso de materiales e identifica las pérdidas de material en el proceso de fabricación.
(Durán et al., 2018)	<i>Sustainable Overall Throughputability Effectiveness (SOTE)</i>	Indicador que incluye criterios de sostenibilidad para poder ser

Referencia	Modelo	Breve descripción
		utilizados en el ciclo de vida de producción.
(Braglia et al., 2019)	<i>Overall Task Effectiveness (OTE)</i>	Indicador que evalúa y analiza las pérdidas relacionadas con tareas manuales de ensamble.
(Muñoz-Villamizar et al., 2019)	<i>Modified OEE</i>	Medición de la efectividad de la programación de trabajos con tardanzas o retrasos.
(Abdelbar et al., 2019)	<i>OEE-TCQ</i>	Indicador con enfoque en la medición del proceso de mantenimiento en términos de coste, calidad, y tiempo.
(Brodny & Tutak, 2019)	<i>Overall Effectiveness Indicator (TOEE)</i>	Indicador adaptado a los procesos productivos para medir la efectividad de las máquinas utilizadas en la minería.
(Tang, 2019)	<i>Standalone OEE</i>	Identificar los cuellos de botella en un sistema y excluyendo los efectos anteriores y posteriores al proceso.
(Aleš et al., 2019)	<i>Modified OEE</i>	Cálculo del OEE en una línea de producción con sistemas de máquinas en serie, paralelo y combinado.
(Annamalai & Suresh, 2019)	<i>Modified OEE</i>	Indicador que incluye un término que considera la utilización de material.
(Durga Prasad & Radhakrishna, 2019)	<i>Overall Substation Effectiveness</i>	Medición del desempeño de una subestación, además de indicar la efectividad global del mantenimiento.
(Souza et al., 2020)	<i>Operating room effectiveness (ORE)</i>	Indicador que mide el rendimiento e identifica las pérdidas basándose en los principios de los cuidados de la salud.

Referencia	Modelo	Breve descripción
(Kareem et al., 2020)	<i>OEE Error-proof (OEE-EP)</i>	Indicador que incluye pérdidas debido a residuos y a las relaciones hombre-máquina.
(Yadav et al., 2020)	<i>Overall equipment performance indicator (OEPI)</i>	Indicador de rendimiento de camiones de volquete que incluye impacto ambiental del funcionamiento del equipo.
(Braglia et al., 2021)	<i>Revised overall labour effectiveness (ROLE)</i>	Indicador que mide de forma holística de las pérdidas relacionadas con la mano de obra.
(Logeshwaran et al., 2021)	<i>Evaluation of overall manufacturing line effectiveness (OMLE)</i>	Métrica que incluye las pérdidas organizativas de la línea de fabricación.
(Li et al., 2021)	<i>Multiproduct production system effectiveness (MPSE)</i>	Medición de la efectividad del sistema de producción multi producto.
(L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)	<i>Overall process effectiveness (OPE)</i>	Indicador de rendimiento para medir la efectividad de un proceso logístico en particular la descarga de mercancías.
(Basak et al., 2022)	<i>OEE additive manufacturing</i>	Indicador aplicado para medir el rendimiento en la fabricación aditiva y reducir las pérdidas del proceso.
(Hung et al., 2022)	<i>Value-added overall equipment effectiveness (VAOEE)</i>	Métrica para medir todas las pérdidas identificadas en busca de la capacidad oculta.

Tabla 2. Lista de modelos basados en el OEE.

Esta revisión de literatura ayudó a identificar áreas donde se ha definido el OEE a las necesidades de las diferentes industrias. El OEE fue creado para medir individualmente la efectividad de equipos; posteriormente, Scott & Pisa (1998) señalaron que el OEE era insuficiente porque las máquinas o equipos no son entes aislados en los sistemas de fabricación.

Autores se vieron motivados a definir el indicador en sistemas más complejos como en líneas de producción o a nivel de fábrica (Braglia et al., 2008; Nachiappan & Anantharaman, 2006). También se desarrollaron adaptaciones en la minería y transporte, iniciando con la medición de la efectividad de equipos como las palas o camiones utilizados en la minería (Elevli & Elevli, 2010); además, se ha adaptado en el transporte de carretera donde se incluyen variables como la distancia, capacidad de carga, rutas y paradas realizadas (García-Arca et al., 2018). Otras áreas como recursos humanos, puertos, recursos materiales y la sostenibilidad del proceso también han sido investigados.

Se encontró una brecha en la literatura en la que señalan otras áreas de estudio. Autores como Abdelbar et al. (2019); Braglia et al. (2018); Dadashnejad & Valmohammadi (2019); Ghafoorpoor Yazdi et al. (2018) proponen estudios basados en los marcos desarrollados. Mientras que García-Arca et al. (2018) considera que su metodología puede ser replicada en el sector servicios o en otros procesos logísticos como recepción de mercancías o selección de mercancías de un almacén. Sharma et al. (2018) y Supriyanto & Mokh (2018) concluyen que su investigación puede ser replicada en el sector servicios o en otras industrias farmacéuticas, eléctricas, textiles o de transporte.

2.5. Consideraciones Finales

Los PMS en el entorno empresarial son diferentes a los de los años 70 y 80; la necesidad y rapidez con que se necesita la información para cumplir las expectativas de los clientes requiere un enfoque dimensional diferente. Tener información útil, actualizada y medible de todas de las funciones organizativas es imperativo para mantener la competitividad en el mercado global.

Una vez revisados los trabajos que existen en el ámbito de desarrollo de esta investigación se puede concluir que:

- Medir las funciones de la organización pone en manifiesto la necesidad de la caracterización de indicadores de rendimiento en ámbitos que no se han investigado. La digitalización, automatización y recolección de datos para la toma de decisiones crea valor y produce un gran impacto en el rendimiento organizacional.
- En lo que respecta al OEE se ha podido evidenciar el creciente interés práctico y científico del indicador que va más allá de ser utilizado solo para el TPM. El

OEE es una métrica ampliamente adoptada en varios ámbitos de la industria como herramienta de control del rendimiento, sin embargo, algunos procesos logísticos no logran aprovechar los beneficios del indicador.

- Se ha constatado que el OEE es una herramienta que puede ser usada como información de entrada para la toma de decisiones de la empresa.
- Por otro lado, se han encontrado diversos estudios que manifiestan que el indicador puede ser utilizado en el sector servicios y en procesos logísticos como herramienta para medir la efectividad de los equipos o procesos. Se detecta un elevado interés por utilizar la métrica OEE, pero no está ampliamente estudiada para particularizarla en los procesos logísticos.

Finalmente, esta revisión muestra la brecha que existe en la literatura para la definición, desarrollo y caracterización del indicador de efectividad en procesos logísticos. En este trabajo se propone cerrar esta brecha con la caracterización, implementación y medición del indicador en tres procesos logísticos: logística de entrada, producción y logística de salida; y así agregar valor al sistema productivo. Específicamente se definirán modelos para la medición del rendimiento en un proceso de descarga, en un equipo autónomo de transporte y en el funcionamiento de un almacén.

CAPÍTULO 3

3. Modelos del indicador de efectividad desarrollados en varios ámbitos

Esta tesis busca medir el rendimiento y productividad de operaciones definiendo modelos de indicadores que aporten valor al sistema logístico. El modelo es la definición y caracterización de un indicador de efectividad basado en el OEE de Nakajima (1988).

Los modelos se han desarrollado tomando como referencia las seis grandes pérdidas y los tres factores que componen el OEE. Las cuatro macro secciones de este capítulo se estructuran de la siguiente manera:

- En la primera sección se exponen todos los aspectos concernientes al OEE en fabricación, que se utiliza como punto de partida para estructurar los modelos propuestos.
- En la sección dos se establece un marco general como guía para la definición del indicador.
- En la sección tres se caracteriza el modelo de efectividad para un proceso de descarga.
- En la sección cuatro se define el indicador en un equipo de transporte automático utilizado en los procesos logísticos.
- Por último, en la quinta sección se particulariza el modelo para medir el rendimiento de un almacén.

Además de cumplir con el objetivo de medir el rendimiento de las operaciones con la caracterización y particularización de los modelos propuestos en entornos logísticos, se busca comprobar que el indicador OEE puede ser utilizado de manera eficaz en otros ámbitos distintos a los revisados en la literatura.

3.1. Definición OEE de partida

El OEE de fabricación es utilizado como herramienta de medición para conocer el rendimiento productivo de los sistemas industrial. El modelo de fabricación se plantea como punto de partida para los siguientes modelos que se van a desarrollar en los procesos logísticos. En esta sección se describe la clasificación y detalles de las seis grandes pérdidas y los factores que componen el OEE.

El indicador de efectividad OEE definido por Nakajima (1988) está compuesta por tres factores que son disponibilidad (D), rendimiento (R) y calidad (C), que mediante un porcentaje indica la efectividad real del proceso productivo. El OEE es una herramienta que sirve para cuantificar las pérdidas de productividad que ocurren durante el proceso. Según, Jonsson & Lesshammar (1999) dentro del proceso productivo pueden darse incidencias crónicas o esporádicas dependiendo su ocurrencia. Se consideran incidencias esporádicas si son evidentes, irregulares y con grandes desviaciones del estado normal provocando graves problemas. Las incidencias crónicas suelen ser pequeñas, constante y son más difícil de identificar, provocan baja utilización de los equipos y grandes costes porque se producen de manera repetitiva. Se pueden identificar realizando comparaciones del rendimiento con la capacidad teórica de los equipos. Las incidencias crónicas y esporádicas que ocurren durante el proceso de fabricación o proceso operativo producen pérdidas o desperdicios de tiempo y recursos.

Una de las ventajas del OEE, como se mencionó anteriormente, es contribuir a identificar las pérdidas que ocurren durante el proceso productivo. Nakajima (1988) para lograr la efectividad global del equipo estableció 6 grandes pérdidas agrupadas por disponibilidad, rendimiento y calidad. Ver Figura 5.

Tiempo total disponible				
Tiempo de carga				Paradas planificadas
Tiempo de operación			Fallos o averías	
			Cambio de útiles y ajuste	
Tiempo de operación neto		Micro paradas o paradas menores		
		Velocidad reducida		
Tiempo válido de operación	Puesta en marcha			
	Defectos de proceso			
	Pérdidas de calidad	Pérdidas de rendimiento	Pérdidas de disponibilidad	Paradas planificadas

Figura 5. Parámetros de la OEE definidos por (Nakajima, 1988)

Pérdidas por disponibilidad:

- a. Fallos o averías: esta pérdida de tiempo imprevista se da cuando el equipo presenta un fallo o desperfecto impidiendo que se lleve el proceso con regularidad.
- b. Cambio de útiles y ajustes: este tiempo ocurre cuando se prepara la máquina para producir otra pieza o referencia diferente o una reconfiguración de la pieza

actual. Se considera el tiempo que va desde la última unidad producida de una referencia hasta la primera unidad buena de la siguiente referencia.

Pérdidas por rendimiento:

- a. Micro paradas o paradas menores: estas pérdidas de rendimiento se dan cuando la producción es interrumpida por un mal funcionamiento del equipo. Esta parada es por un corto periodo de tiempo donde el operario resuelve el problema presentado.
- b. Velocidad reducida: esta se presenta cuando la máquina está funcionando más lento de lo que sus especificaciones le permiten. Esta pérdida viene representada por la diferencia entre el tiempo de ciclo ideal de la máquina y el real.

Pérdidas por calidad:

- a. Puesta en marcha: esta reducción de calidad es desde que el proceso de producción inicia hasta que alcanza una producción estable (una vez la pieza o referencia cumpla con los estándares definidos).
- b. Defectos de proceso: son las piezas con defectos que se producen durante la producción estable. Esto incluye las piezas para descarte o las que puedan volver a trabajar.

Estas pérdidas son las utilizadas para definir el indicador y los tres factores que la integran, se definen a continuación:

Factor de disponibilidad mide la cantidad de tiempo que el equipo ha estado realmente en funcionamiento sin paradas o pérdidas de tiempo. Se calcula con el tiempo de operación versus el tiempo de carga.

(1)

$$\text{Disponibilidad} = \frac{t. \text{ de operación}}{t. \text{ de carga}}$$

(2)

$$\text{Disponibilidad} = \frac{t. \text{ de carga} - t. \text{ de paradas no planificadas}}{t. \text{ total disponible} - t. \text{ de paradas planificadas}}$$

T. de operación: es el tiempo que el equipo ha estado en funcionamiento.

T. de carga: es el tiempo que se ha destinado para la operación considerando las paradas planificadas.

T. de paradas no planificadas: son paradas o pérdidas de tiempo que ocurren de manera fortuita como el fallo en el equipo o falta de material entre otras.

T. de paradas planificadas: es el tiempo que se destina con antelación a actividades programadas, por ejemplo, paros por mantenimiento, reuniones u otras causas previamente planeadas.

El **factor de rendimiento** contempla los elementos que hacen que el activo funcione a una velocidad menor del tiempo de ciclo ideal. La misma se calcula como la relación del tiempo operación neto entre el tiempo de operación.

(3)

$$\text{Rendimiento} = \frac{t. \text{ de operación neto}}{t. \text{ de operación}}$$

(4)

$$\text{Rendimiento} = \frac{t. \text{ de ciclo ideal} \times \text{cantidad de pieza}}{t. \text{ de operación}}$$

T. de operación neto: es el tiempo de ciclo ideal por la cantidad de piezas fabricadas.

T. de ciclo ideal: es el tiempo que demora en fabricar una pieza en condiciones ideales.

Cantidad de pieza: es la cantidad de piezas fabricadas en el turno.

Por último, el **factor de calidad** considera la cantidad de piezas que cumple con las especificaciones. Este factor mide la relación de la producción buena versus la producción real.

(5)

$$\text{Calidad} = \frac{\text{total de piezas procesadas} - \text{cantidad defectuosa}}{\text{total de piezas procesadas}}$$

Total de piezas procesadas: es el total de piezas fabricadas en el tiempo de estudio puede ser el día o turno de trabajo.

Cantidad defectuosa: es la cantidad de piezas que no cumplen con los estándares o requisitos previamente establecidos.

Los resultados de los factores disponibilidad, rendimiento y calidad van entre valores de 0 y 1. El OEE de igual manera entre 0 y 1, y su resultado se expresa en porcentaje. Los valores obtenidos tienen una clasificación que indica el estado del equipo o procesos que se esté evaluando. La literatura ofrece una variedad de interpretaciones sobre estos resultados Nakajima (1988) considera que bajo ciertas condiciones ideales los resultados deben ser para $D > 0.90$, $R > 0.95$ y $C > 0.99$ dando como resultado un OEE > 0.85 . Mientras Kotze (1993) afirma que un OEE de 0.50 es más realista, manteniéndose en el rango entre 0.30 y 0.80 establecido por Ericsson (1997). Estudios mundiales indican que la tasa media de OEE en las plantas de fabricación es del 60% (Iannone & Nenni, 2013). Por otra parte, Dal et al. (2000) considera que no hay un valor óptimo del OEE, que el mismo va a depender de la situación y los criterios de la industria donde es aplicado.

El planteamiento de cálculo del OEE es considerado una gran herramienta de evaluación para la toma de decisiones referente al sistema o equipo productivo. Los resultados que se obtiene son útiles como punto de referencia o como línea base. Como punto de referencia, para la comparación de rendimiento entre turnos de empresa o la comparación de un recurso con los estándares de la industria. Como línea base, para dar seguimiento y control a los resultados obtenidos a lo largo del tiempo.

3.2. Marco general para los modelos propuestos

Se estableció un marco general como guía para el desarrollo del indicador de rendimiento en los procesos logísticos, que será utilizado para todos los modelos propuestos. En la Figura 6 se muestra el esquema del marco general.

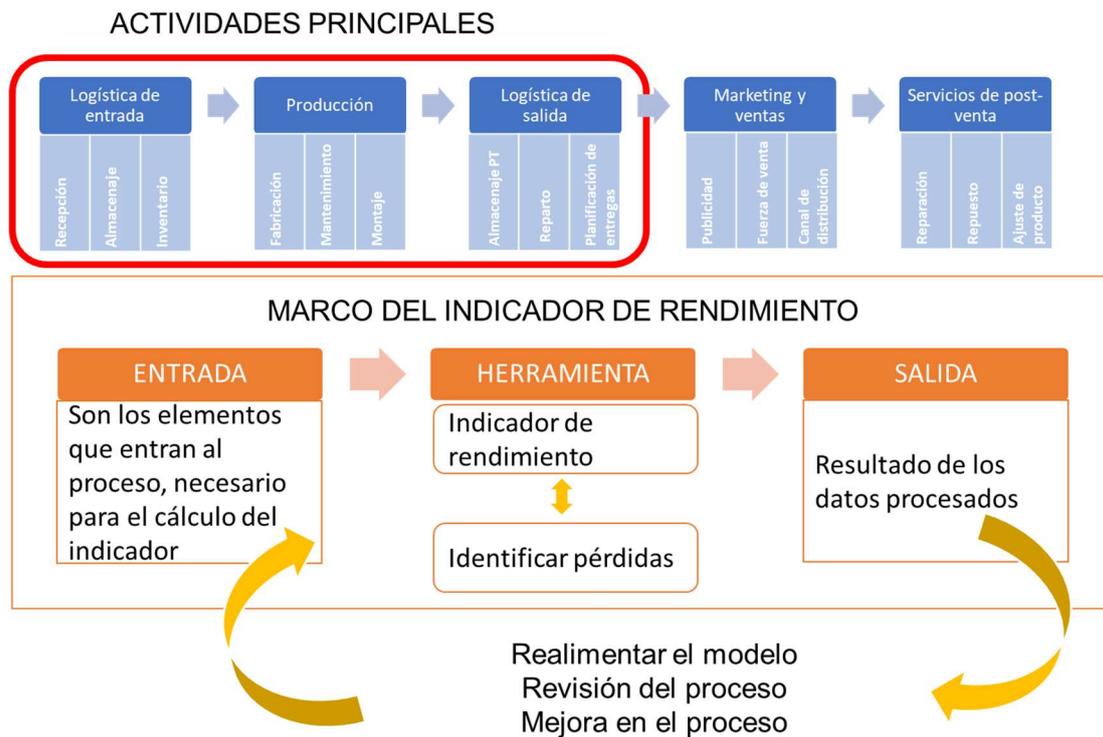


Figura 6. Marco general para los modelos del indicador de rendimiento.

En la parte superior se han tomado como referencia las actividades primarias de la cadena de valor establecidas por Michael Porter (Porter, 2001). La cadena de valor es una herramienta que permite analizar las distintas actividades que aportan valor a una empresa.

Las actividades primarias se definen como:

1. Logística de entrada: en esta primera actividad se incluye la recepción, almacenaje e inventario de la materia prima.
2. Producción: donde se coge la materia prima desde la logística de entrada y se crea el producto.
3. Logística de salida: una vez que el producto está terminado, sale del centro de producción y se entrega a distribuidores o consumidores finales.
4. Mercadeo y ventas: en esta cuarta actividad se incluyen la publicidad, la fuerza de ventas y canales de distribución.
5. Servicios: es la última actividad de la cadena de valor, considera desde la instalación del producto hasta el servicio después de la venta.

Según la cadena de valor, se pueden distinguir cinco actividades principales que generan valor para las empresas. Sin embargo, solo tres de ellas tienen incidencia directa al desarrollo de este trabajo. Las actividades y los procesos relacionados con el marco general del indicador son:

- Logística de entrada: recepción, almacenaje e inventario.
- Producción: fabricación, mantenimiento y montaje.
- Logística de salida: almacenaje de producto terminado, reparto y planificación de entregas.

Los modelos del indicador de efectividad estarán referenciados en estas actividades primarias; cuantos más eficientes sean estas actividades, mayor es el valor generado.

Como punto de partida para la definición del indicador se necesitan los datos de **entrada**. Los datos de **entrada** son elementos que ingresan al proceso, necesarios para el cálculo del indicador. Definición de las variables involucradas, datos del sistema y datos proporcionados por el operario, son algunos de los datos de entrada que se pueden considerar. A continuación de la **entrada** está la **herramienta**, en este punto, es el proceso de convertir los datos en información y establecer el cálculo del indicador. Después, la **salida** que presenta los resultados de los datos procesados.

Finalmente, es importante y necesaria una realimentación del modelo, revisión del proceso y ajustes, de ser necesario. Con la retroalimentación se busca compartir observaciones de los resultados con la intención de obtener información del proceso y sobre la efectividad del indicador. La revisión pretende evaluar la ejecución del indicador con el fin de detectar y prever desviación, además de realizar los ajustes y establecer medidas correctivas oportunas en el tiempo.

3.3. Modelo de un proceso de descarga

3.3.1. Alcance del modelo de un proceso de descarga

El modelo por definir busca medir la efectividad de un proceso utilizando una métrica de rendimiento generalmente aplicada en producción, la cual será adaptada al entorno logístico.

El proceso logístico elegido es la descarga de camiones. La mercancía que transportan los camiones está contenida en cajas de material unitario o en pallets. Este modelo

tendrá como punto de partida la llega del camión a la empresa con mercancía y como punto final la salida del camión.

El proceso de descarga es la operación de retirar la mercancía del medio que la transporta y reservarla en el espacio destinado (Villarroel Valdemoro & Rubio Ferrer, 2012). La función de descarga es importante para cualquier empresa, distribuidora o almacén en el ámbito de procesos logísticos. Como hipótesis de este modelo la descarga se realiza en zonas señalizadas y con una estructura definida para facilidad del proceso. La descarga inicia con la llegada del camión con mercancía a la empresa. Una vez, se hacen todas las verificaciones correspondientes entre el albarán y la orden de compra, se debe verificar que la mercancía corresponde con lo solicitado. Posteriormente, se realiza la descarga de la mercancía con equipos como carretillas o transpaletas. Por último, se da el registro y la firma conforme del albarán para la salida del camión (Villarroel Valdemoro & Rubio Ferrer, 2012). (Ver Figura 7)

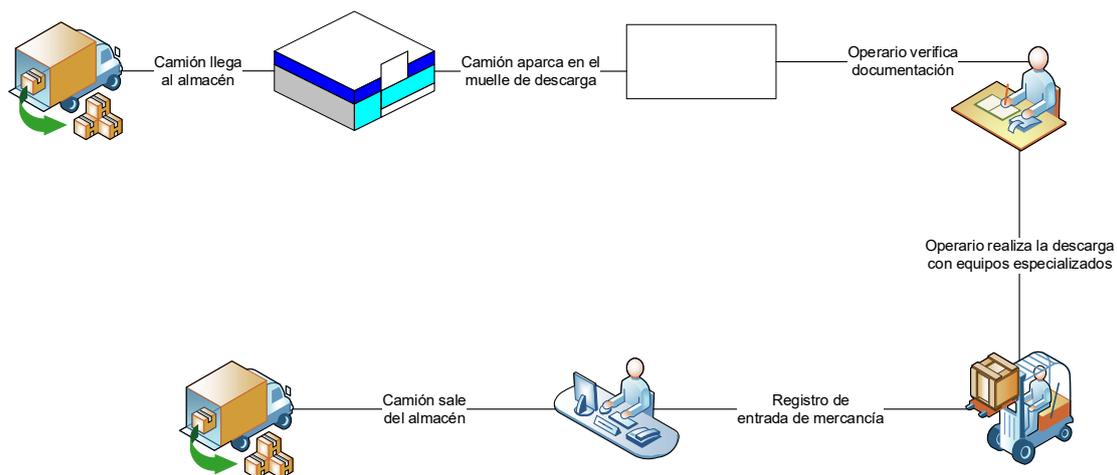


Figura 7. Proceso de Descarga de Mercancía.

Para este modelo se deben considerar los factores que influyen en el proceso. Se definirán las generalidades de las pérdidas que se encuentran en el proceso, clasificadas por los factores que intervienen. Se caracterizarán los parámetros y variables que deben ser contempladas para determinar el indicador de efectividad.

3.3.2. Marco del modelo de un proceso de descarga

Tomando como guía el marco general presentado en el apartado 3.2, se ubicará el proceso de descarga en la actividad de logística de entrada, que incluye procesos relacionados con la recepción, almacenamiento y distribución de la materia prima.

El esquema del marco del modelo de descarga propuesto se muestra en la Figura 8. Como entrada se necesitan los datos del sistema que aporta información sobre la carga, hora de llegada, ruta, entre otros aspectos. También son necesarios los datos registrados por el operario que indica o registra las incidencias que ocurren durante el proceso de descarga. Después, se define la ecuación del proceso y finalmente los resultados que se obtienen del cálculo.

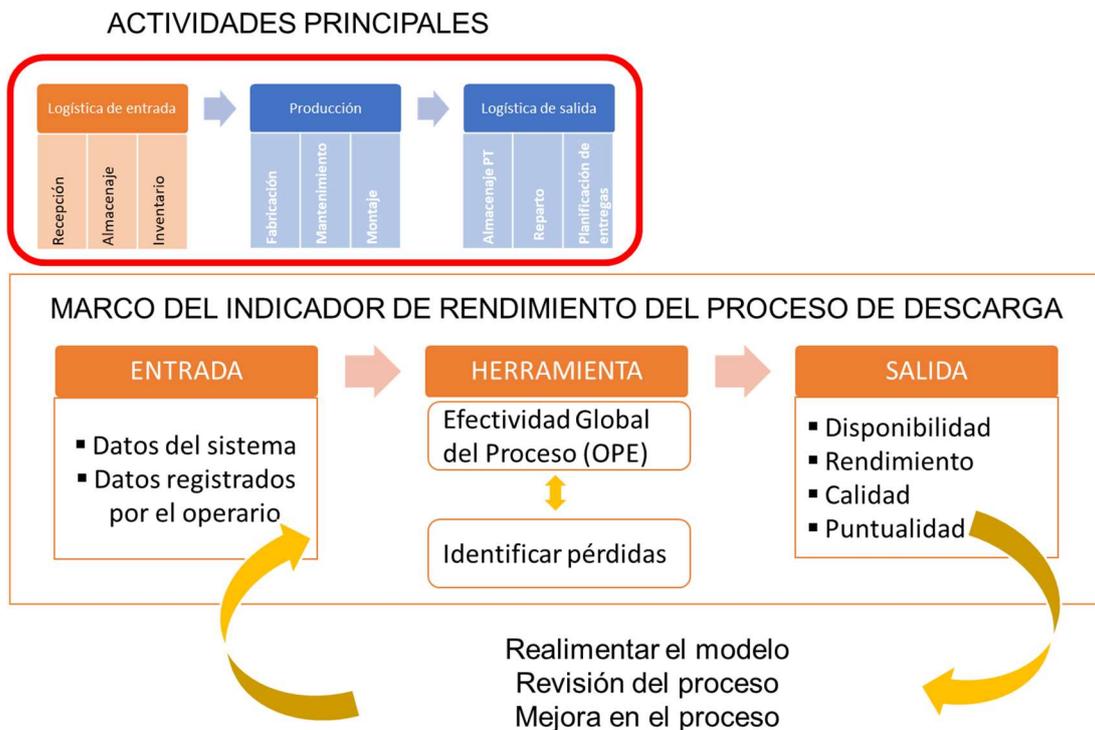


Figura 8. Marco del modelo, proceso logístico de descarga de camiones. (adaptado de L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)

El modelo será diseñado para evaluar un proceso, donde las tareas se interrelacionan entre sí, por lo cual se toman en consideración todos los factores que intervienen en el proceso. Los factores que se consideraron en el proceso de descarga son recursos humanos, documentos y equipos (ver Figura 9).

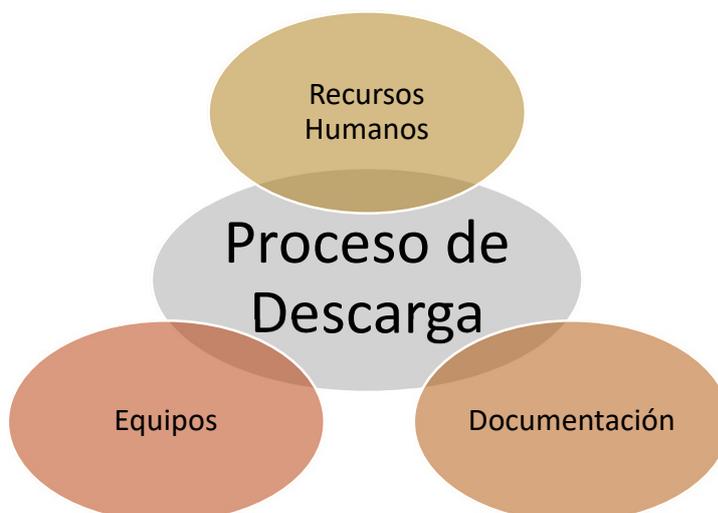


Figura 9. Factores interrelacionados en el proceso de descarga.

- Recursos humanos: operarios que intervienen en el proceso. Información sobre la interacción hombre/máquina, control, verificación del proceso y registro.
- Documentación: son los documentos, datos e información necesarios para el registro, documentación y control del proceso.
- Equipos: son las herramientas y máquinas que se utilizan para desarrollar el proceso.

Estos tres factores, de forma generalizada, son los que interactúan con el proceso. Los datos, información y documentación son los que se utilizan como entrada para la definición y caracterización del indicador. En el modelo de un proceso de descarga influyen los flujos de información, a diferencia del OEE tradicional, en el cual solo se analiza un equipo en particular.

Teniendo en cuenta el OEE y las 6 grandes pérdidas establecidas por Nakajima (1988), se han definido pérdidas para cada uno de los factores identificados. Los factores que componen el indicador de efectividad del proceso de descarga son 4: disponibilidad, rendimiento, calidad y puntualidad.

La puntualidad se situó de manera independiente para resaltar su valor en el proceso de descarga. El no cumplimiento del horario previsto puede provocar en la empresa pérdidas de tiempo y dinero, por ejemplo: personal ocioso, pago de horas extra para completar la laborar, paralización de líneas de producción entre otras actividades que

se pueden ver afectadas. Indicadores relacionados con el rendimiento de las entregas; donde la puntualidad es el factor determinante, han sido utilizados para medir si se están logrando las tareas en el tiempo estipulado. En el estudio de García-Arca et al. (2018) KPIs como “on-time delivery (OTD)”, “perfect order fulfillment” y “average delay” fueron considerados como parte de la revisión para medir el servicio del transporte. El impacto y los beneficios de las llegadas a tiempo fueron investigados por Kamali (2018), encontrando que, al mejorar la puntualidad, el rendimiento se incrementa y se reducen las desviaciones en calidad y tiempo de ciclo productivo.

A lo largo de la cadena de suministro se producen muchas ineficiencias con el manejo del transporte por la inadecuada coordinación entre las empresas o departamentos (García-Arca et al., 2018). Como parte del proceso de descarga se tiene que considerar que existe la influencia de personas externas a la organización que puedan impactar en el desarrollo óptimo del proceso. El punto de partida es la llegada del camión que transporta la mercancía que proviene de un proveedor o distribuidor, lo que ha llevado a considerar que se tendrán pérdidas por factores extrínsecos. Como valor adicional las pérdidas se han clasificado en internas y externas a la organización. Las pérdidas internas son aquellas que se producen por factores intrínsecos y pueden ser controladas y ajustadas por estrategias o mejoras de la organización. A diferencia, las pérdidas externas son las que se producen por factores extrínsecos y para ajustar o mejorar se necesita la colaboración de agentes externos al proceso. La Tabla 3 presenta el desglose de las pérdidas identificadas en el proceso de descarga.

Factores		Pérdidas
Disponibilidad	Interna	Son las pérdidas que surgen por: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Averías de equipos y/o sistemas. ▪ Preparación de área de trabajo ▪ Falta de material o recursos ▪ Falta de personal
Rendimiento	Interna	Son las pérdidas que disminuyen la velocidad de trabajo pueden ser por: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pequeños accidentes laborales ▪ Registro y verificación de información manual ▪ Adaptación o ajuste de área de trabajo

Factores		Pérdidas
Calidad	Interna	Son las pérdidas que se dan cuando no se cumple con las especificaciones requeridas como: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Camiones que no pertenecen al área de descarga en estudio.
	Externa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El contenido del camión no cumple con los requisitos solicitados. ▪ Contenido de la carga en malas condiciones.
Puntualidad	Externa	Son pérdidas que producen por: <ul style="list-style-type: none"> ▪ La ausencia o llegada tardía de un camión en la franja horaria planificada de descarga.

Tabla 3. Desglose de las pérdidas del proceso de descarga.

Estas pérdidas ayudan a definir los parámetros del nuevo indicador. Por lo tanto, el indicador de rendimiento del proceso logístico de descarga definido en inglés como 'Overall process effectiveness' (en adelante OPE) es el producto de la disponibilidad, rendimiento, calidad y puntualidad;

(6)

$$OPE = D \times R \times C \times P$$

La **disponibilidad** mide el tiempo total que el sistema está operando sin considerar paradas planificadas y no planificadas de los recursos de sistema.

(7)

$$Disponibilidad = \frac{\text{tiempo productivo}}{\text{tiempo total}} \times 100\%$$

(8)

$$\text{Tiempo productivo} = \text{tiempo total} - \text{paradas no planificadas}$$

(9)

$$\textit{Tiempo total} = \textit{día de trabajo} - \textit{paradas planificadas}$$

Día de trabajo: es el tiempo que se desea analizar en el indicador puede ser el día entero de trabajo, el turno de trabajo o el tiempo seleccionado para analizar.

Paradas planificadas: es el tiempo que se destina con antelación a actividades programadas, por ejemplo, paros por mantenimiento, reuniones u otras causas previamente planeadas.

Paradas no planificadas: son paradas o pérdidas de tiempo que ocurren de manera fortuita como fallo en el equipo, falta de material, falta de personal, entre otras.

El **rendimiento** es el factor que mide la utilidad que se le está dando a los recursos del sistema. El rendimiento es el ratio del tiempo ideal entre el tiempo real del proceso.

(10)

$$\textit{Rendimiento} = \frac{\textit{tiempo ideal}}{\textit{tiempo real}} \times 100\%$$

Tiempo ideal: es el tiempo necesario para realizar la tarea en condiciones óptima.

Tiempo real: es el tiempo real que dura la operación.

La **calidad** mide que proceso se haya realizado cumpliendo los estándares y tiempos definidos. El cálculo es la relación de las veces que el proceso se ha repetido sin incidencias con respecto a las que se ha ejecutado en el periodo de estudio.

(11)

$$\textit{Calidad} = \frac{\textit{Descarga sin incidencias}}{\textit{total de camiones}}$$

(12)

$$\textit{Descarga sin incidencias} = \textit{total de camiones} - \textit{perdidas por calidad}$$

Descarga sin incidencias: son la cantidad de camiones que se pueden descargar en el turno. En este parámetro se descuenta la cantidad de camiones que no se pudieron descargar por pérdidas de calidad.

Total de camiones: es la cantidad de camiones que se han atendido en el turno de trabajo o día de estudio.

Por último, la **puntualidad** como factor innovador implementado en este modelo. La puntualidad es el factor que mide la coordinación cronológica entre el proveedor y la empresa para cumplir con la descarga en el tiempo establecido.

(13)

$$\text{Puntualidad} = \frac{\text{camiones que llegan en la ventana horaria}}{\text{total de camiones}}$$

(14)

camiones que llegan en la ventana horaria

$$= \text{total de camiones} - \text{camiones que no llegan a tiempo}$$

Camiones que llegan en la ventana horaria: se refiere a la cantidad de camiones que llegan en el rango de tiempo establecido por la empresa para atender la descarga.

Total de camiones: es la cantidad de camiones que se han atendido en el turno de trabajo o día de estudio.

Las ecuaciones para el cálculo del indicador de rendimiento se definieron para un proceso básico de descarga. Esta métrica permite medir e identificar las pérdidas del proceso para luego, mediante otras herramientas, reducir o eliminar desperdicios de tiempo.

3.4. Modelo de equipo en sistema logístico

3.4.1. Alcance del modelo de un equipo AGV

El modelo del indicador de rendimiento será definido para un equipo logístico autónomo de movimiento o transporte de carga. Los vehículos guiados automatizados con sus siglas en inglés AGV (automatic guided vehicle), en adelante AGV, fueron desarrollados en los EE.UU. e Inglaterra en la década de 1950. Los AGV son vehículos capaces de moverse de manera autónoma, sin necesidad de conductor. Son empleados para actividades como recogida, depósito o movimiento de carga o materiales. Son utilizados en el sector logístico para sustituir a carretillas manuales y cintas transportadoras. Disponen de un sistema de guiado que les permite realizar un recorrido predeterminado. Estos vehículos funcionan con batería, reciben ordenes por medio de transmisión de datos y se controlan y monitorizan mediante un software a través de un navegador web. Los AGV son utilizados en instalaciones cerradas como naves, almacenes o líneas de producción. En la Figura 10 se muestra un esquema ejemplo de rutas y AGVs.

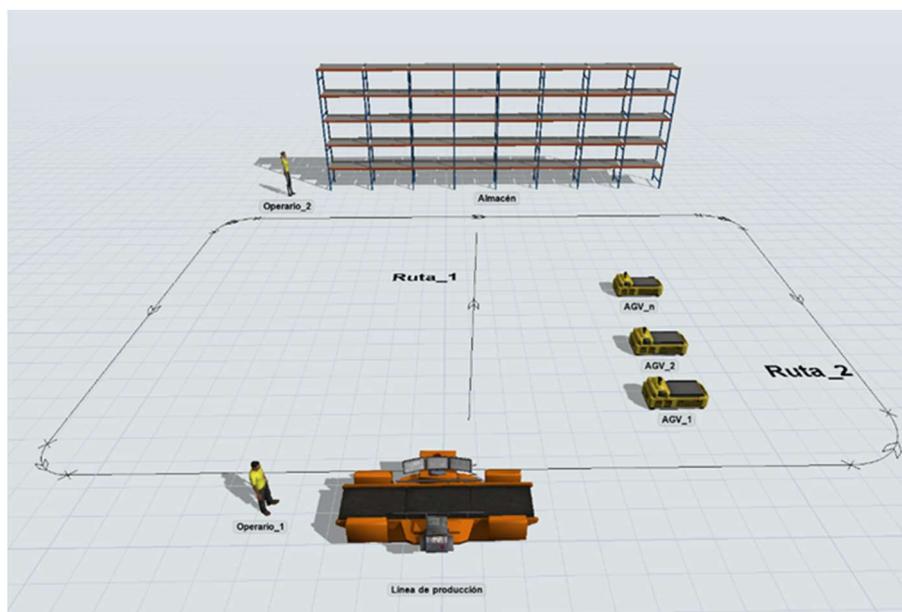


Figura 10. Esquema demostrativo de rutas y función del AGV.

Los vehículos autónomos se han empleado en entornos acuáticos (Choi & Easterday, 2001), aéreos (Mellinger et al., 2012) y terrestres como en puertos (Pjevčević et al., 2011), almacenes, entre otros. En el entorno terrestre los AGV se utilizan cada vez más en las plantas de producción y en los procesos logísticos para mejorar la eficiencia en

la transferencia de materiales y aumentar la producción (Chen et al., 2022; Singh et al., 2009). Este aumento del uso del AGV pone en manifiesto la necesidad de medir la efectividad, utilización y aprovechamiento del equipo. El objetivo del modelo es medir y cuantificar el rendimiento del equipo, la evolución de la utilización y la efectividad de este. Como resultado se obtendrá un modelo genérico que permitirá evaluar la efectividad del equipo en un sistema logístico y conocer su rendimiento.

3.4.2. Marco del modelo de un equipo AGV

En la literatura se encontraron medidas de rendimiento en simulaciones de programación de AGV para medir la efectividad de la estrategia en la asignación (Romero & Interrante, 1994; Singh et al., 2009). Entre las medidas usadas se pueden mencionar AGV-utilization que es la fracción de tiempo durante la simulación en que el AGV está ocupado atendiendo solicitudes de transferencias. AGV-idling es la fracción de tiempo durante la cual el AGV está disponible para el servicio, pero no hay solicitudes de transferencias pendientes para servir. AGV-waiting es la fracción de tiempo durante la cual el AGV está esperando en el punto de estacionamiento a que otro AGV se aparte del camino. Tomando en consideración estos indicadores como referencia se estableció nuestro modelo de OEE para medir de manera íntegra las pérdidas y variables que afectan el equipo involucrado en el proceso.

La Figura 11 presenta el marco utilizado para la definición del modelo. Las actividades donde el equipo AGV tiene mayor utilidad son en la logística de entrada, en la producción y en la logística de salida. Como entrada se tienen los datos del sistema que es información sobre las asignación, rutas y tiempo del AGV. También, se deben considerar las variables o características del equipo. El indicador ha sido denominado efectividad global del AGV y como salida los resultados de los factores de disponibilidad, rendimiento y calidad.

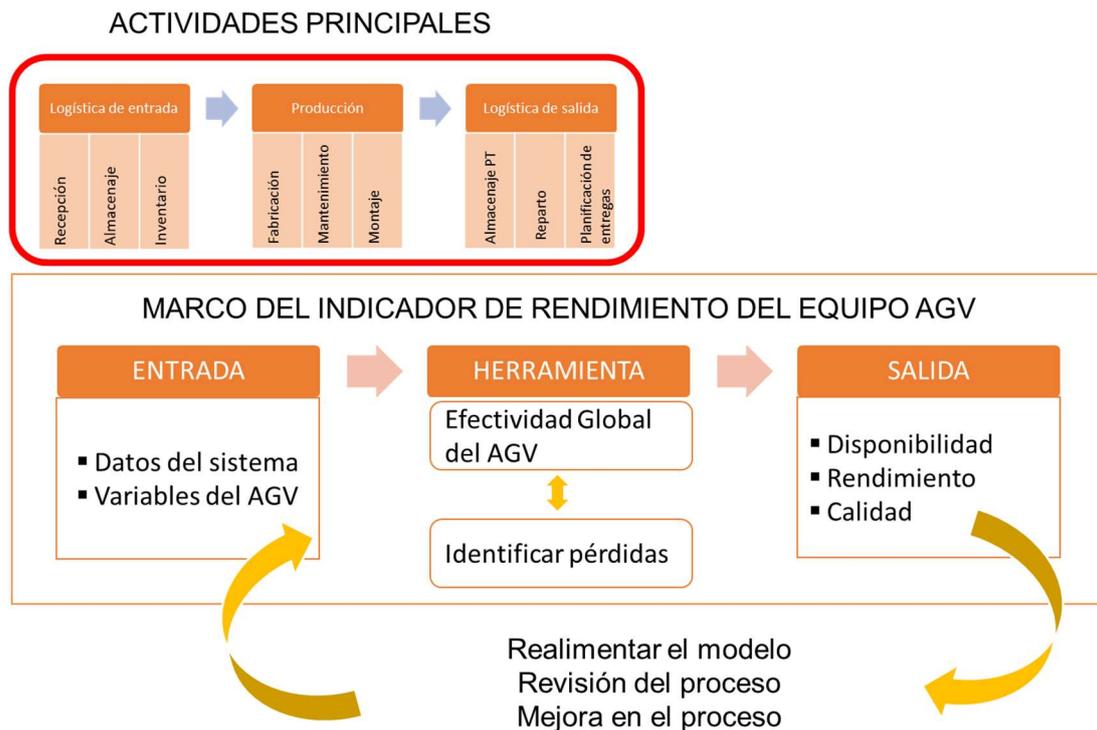


Figura 11. Marco del modelo, equipo en sistema logístico. (adaptado L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)

Un estudio en profundidad de operativas, funciones e implementaciones de AGV ha llevado a considerar las siguientes variables (ver Figura 12):

- Cantidad de AGV: es la cantidad de equipos involucrados en el proceso.
- Tiempo base de recorrido: es el tiempo que dura el AGV en realizar el recorrido o ruta sin incidencias.
- Rutas: son el camino definido para los viajes y la cantidad de rutas que puede pasar el AGV.
- Velocidad estándar: es la capacidad que puede alcanzar el equipo según sus especificaciones.
- Sistema de energía: es el medio que le proporciona la energía al equipo.

Todas estas variables forman parte de la información necesaria para el cálculo del indicador de rendimiento.

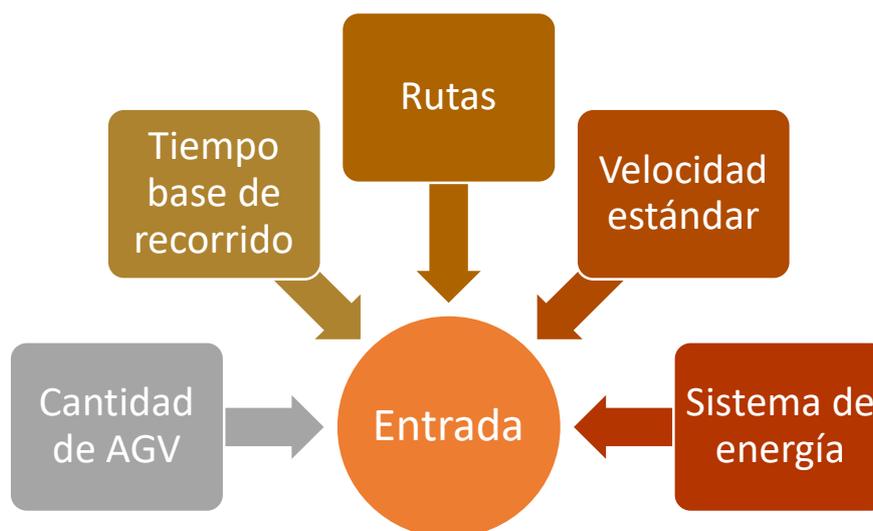


Figura 12. Variables para considerar como entrada en el indicador.

Las pérdidas que pueden ocurrir durante la operación del AGV han sido clasificadas como se presentan en la Tabla 4; manteniendo como guía las seis grandes pérdidas definidas originalmente por Nakajima.

- Las pérdidas de disponibilidad es el tiempo perdido por averías o establecimientos de ajuste del equipo, el cual se resta del tiempo total.
- Las pérdidas por rendimiento obligan a frenar el equipo disminuyendo el tiempo de funcionamiento.
- Por último, todo lo que afecte el recorrido o que no cumpla con los estándares y produzca trabajos duplicados es la pérdida por calidad.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	Fallos o averías de equipo
	Preparación o ajuste
Rendimiento	Paradas menores
	Reducción de velocidad
Calidad	Defectos de calidad
	Pérdidas de puesta en marcha

Tabla 4. Descripción de pérdidas del modelo.

El modelo está basado en los tres factores del OEE tradicional que son disponibilidad (D), rendimiento (R) y calidad (C), su multiplicación es el resultado del indicador.

(15)

$$OEE_{AGV} = D \times R \times C$$

La **disponibilidad** mide la cantidad de tiempo que el AGV está operativo, está definido por la razón del tiempo de operación entre las horas de trabajo.

(16)

$$D = \frac{\text{tiempo de operación}}{\text{horas de trabajo}}$$

Tiempo de operación: es el tiempo que trabaja el AGV descontando las pérdidas que se dan por disponibilidad.

Horas de trabajo: es el tiempo total que el AGV está funcionando, puede estar dado por el turno o día de trabajo.

El **rendimiento** es el tiempo de funcionamiento del equipo e indica el ratio de tiempo estándar entre el tiempo real que el equipo realiza la tarea.

(17)

$$R = \frac{\text{tiempo estándar}}{\text{tiempo real}}$$

Tiempo estándar: tiempo base que el AGV realiza el recorrido en condiciones determinadas a su velocidad óptima.

Tiempo real: es el tiempo real que dura el AGV en realizar el recorrido.

Por último, la **calidad** mide el porcentaje de viajes que se realizan sin incidencias mayores.

(18)

$$C = \frac{\text{viajes sin incidencias}}{\text{total viajes}}$$

Viajes sin incidencias: cantidad de viajes que realiza el AGV sin registrar ninguna incidencia.

Total viajes: cantidad total de viajes que se realizan con el AGV durante el turno o tiempo de estudio.

3.5. Modelo en el funcionamiento del almacén

3.5.1. Alcance del modelo de un almacén

El almacén como parte de los procesos logísticos se dedica a la recepción, clasificación, y almacenamiento de los productos. En este estudio, se plantea un modelo del indicador de efectividad para la integración de actividades de un almacén. Este modelo contempla el análisis de la productividad en las diferentes áreas que tiene el almacén; se observarán tanto los equipos como el recurso humano involucrado en el desarrollo de las tareas del almacén.

Como hipótesis de partida para la modelización del OEE se supondrá un almacén en el que se tiene un área de clasificación, picking y carga de los productos en camiones como tareas básicas.

La Figura 13 muestra un flujo horizontal del funcionamiento del almacén que inicia con la llegada del producto, la llegada puede ser de un proveedor o de la sección de producción. Después, si es necesario se clasifican los productos para posteriormente, transportarlos al sitio de almacenamiento. Otra actividad que se realiza en el almacén es el picking o preparación de pedidos. Una vez este completo el pedido, es cargado en el camión para su transporte al lugar de destino.

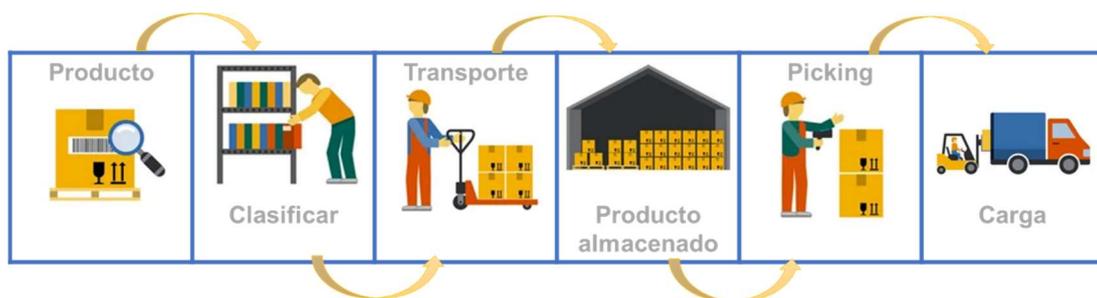


Figura 13. Flujo horizontal del funcionamiento del almacén.

Dentro del almacén se pueden encontrar actividades que se realizan de forma automática, como por ejemplo el transporte o clasificación de producto, dependiendo de la tecnológica con la que se cuente. También actividades que realiza el hombre por sí solo y/o actividades semiautomáticas para las que se necesita la ayuda de un equipo o

herramienta. El modelo será diseñado lo suficientemente flexible para que pueda ser ajustado según las necesidades de la empresa que lo utilice.

3.5.2. Marco del modelo de un almacén

Este modelo se realiza para medir la efectividad y rendimiento de las actividades que se realizan dentro del almacén. El modelo tiene como objetivo identificar las actividades que producen pérdidas del tiempo productivo y evaluar la efectividad con la que se realizan las operaciones.

Dentro del almacén se realizan actividades variadas, en la cuales la labor del recurso humano forma parte esencial del proceso. La Figura 14 muestra el marco general del modelo, las actividades donde el almacenamiento está presente son la logística de entrada y la logística de salida. En la logística de entrada en la recepción de materia prima e insumos necesarios para la fabricación. En la logística de salida en el almacenamiento de productos terminados antes de su salida al cliente final.

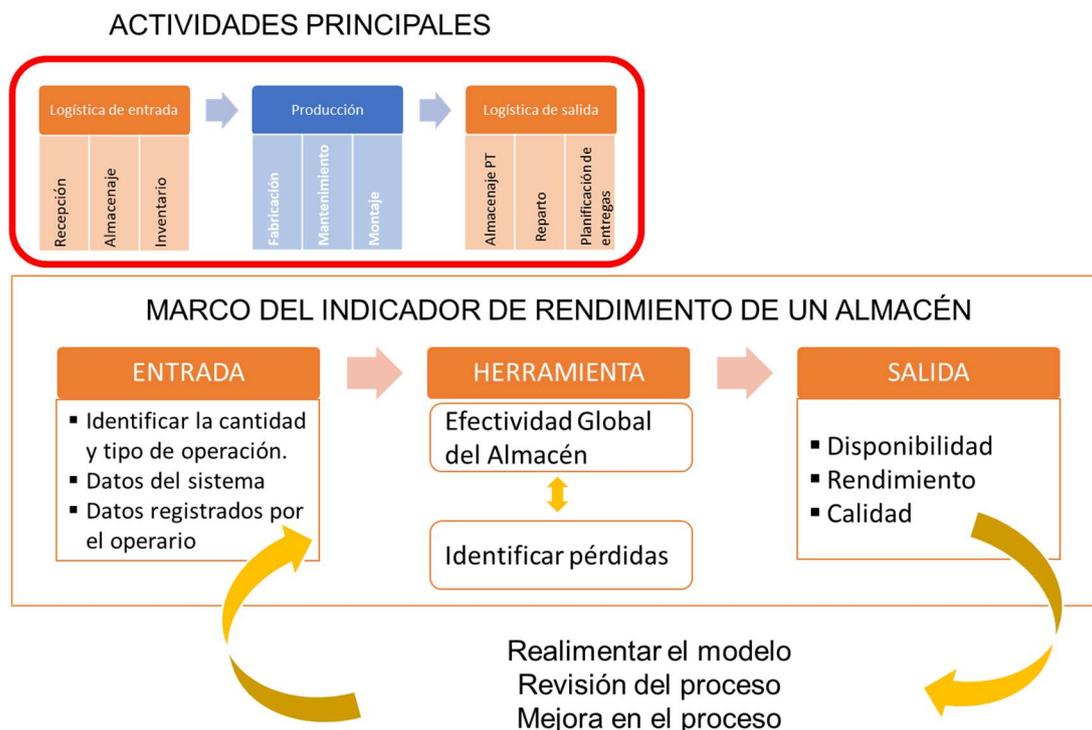


Figura 14. Marco del modelo, funcionamiento del almacén. (adaptado L. D. C. Ng Corrales et al., 2022)

El almacén es una integración de actividades que proporciona un flujo de información, como entrada para el marco, se debe identificar la cantidad de estaciones de trabajo y

tipos de operaciones que se van a evaluar. Además, definir los parámetros o variables de entrada de los tiempos de funcionamiento, equipos que intervienen en el proceso, registro de los datos por el operario y del sistema de cada estación de trabajo.

Para este modelo se establecen las pérdidas de manera general de los tres factores disponibilidad, rendimiento y calidad. Éstas deberán ser adaptadas según las condiciones de cada almacén. La Tabla 5 muestra el desglose de pérdidas del funcionamiento del almacén.

Factores	Pérdidas	Ejemplo
Disponibilidad	Se consideran todas aquellas que su duración supere los 5 minutos*.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallos o averías de la máquina o equipo. ▪ Falta de personal o necesidades. ▪ Reposición o reubicación del inventario de productos
Rendimiento	Se consideran todas aquellas que su duración es menor a 5 minutos*.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallos, averías o reducción de velocidad de máquina o equipo. ▪ Interrupción de conexión con el software. ▪ Mal registro de mercancía o contenedores.
Calidad	Se consideran todas aquellas que no cumplan con las condiciones mínimas de calidad.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Defectos en productos (por empaque o deterioro). ▪ Contenedores incompletos o dañado.

* El tiempo estipulado puede ser ajustado a las necesidades particulares de donde se pretenda implementar.

Tabla 5. Desglose de pérdidas del funcionamiento del almacén.

Para calcular el indicador de efectividad definido como OEE_{sn} por estación de trabajo se considera el producto de los tres factores disponibilidad (D), rendimiento (R), y calidad (C).

(19)

$$OEE_{sn} = D \times R \times C$$

El **factor de disponibilidad** mide el tiempo que el operario o equipo estuvo operando durante el tiempo disponible para la operación.

(20)

$$\text{Disponibilidad} = \frac{TT - PD}{TT}$$

Tiempo total (TT) = tiempo total disponible, considerando las paradas planificadas de descanso o comida.

Pérdidas de disponibilidad (PD) = pérdidas que se dan durante el proceso, para este caso se han considerado paradas que demoran más de 5 minutos.

El **factor de rendimiento** evalúa el ritmo de la operación y el correcto aprovechamiento de la capacidad de la operación, en otras palabras, lo que se hace realmente versus lo que se puede hacer en condiciones ideales.

(21)

$$\text{Rendimiento} = \frac{TT \times \frac{VR}{VS}}{TT - PD - PR}$$

Velocidad real (VR) = esta velocidad se calcula en base a los movimientos realizado entre el tiempo del turno. También se puede considerar en vez de los movimientos los m³ transportados o cargados en camiones.

Velocidad estándar (VS) = esta velocidad al igual que la real se calcula en base a movimientos o m³ transportados, pero considerando condiciones ideales sin interrupciones.

Pérdidas de rendimiento (PR) = pérdidas de tiempo que se dan durante el proceso, para este caso se han considerado paradas que demoran menos de 5 minutos.

Por último, el **factor de calidad** se utiliza para medir el porcentaje de las actividades o productos que cumple con los requisitos o estándar y no necesitan ser descartados o reprocesados.

(22)

$$Calidad = \frac{TT \times VR - PC}{TT \times VR}$$

Pérdidas de calidad (PC) = se presentan cuando los procesos, productos o actividades no cumplen con los requisitos mínimos establecidos.

Se asume la participación de operarios, máquinas y equipos de apoyo a la recepción, almacenaje y movimientos de materiales o productos dentro del almacén. Para tener una medición del rendimiento global del almacén se propone que el indicador pondere cada una de las estaciones de trabajo evaluadas dentro del almacén. La ecuación definida Overall Warehouse Indicator (en adelante OWI) estará compuesta por el sumatorio del producto de los pesos por cada OEE_{sn} de cada estación de trabajo.

(23)

$$OWI = \frac{w_1 \times OEE_{s1} + w_2 \times OEE_{s2} + \dots + w_n \times OEE_{sn}}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}$$

w_n = es el porcentaje o peso ponderado que se le asigna a cada estación de trabajo.

OEE_{sn} = representa el OEE de cada estación de trabajo en las que se ha dividido el almacén

Los pesos o porcentajes serán asignados por parte de la empresa dependiendo de la importancia o aporte que genere cada sección dentro de la empresa; la suma de los pesos debe ser igual a 100%.

El estudio presentado por Hung et al. (2022) señala que los pesos pueden indicar la importancia genuina de cada proceso para la organización.

CAPÍTULO 4

4. Validación de los modelos desarrollados

En este capítulo se presentan las tres validaciones y los resultados de los modelos propuestos en el capítulo anterior. El primer modelo se validó en una empresa fabricante del sector automoción donde se reciben recambios, componentes y piezas para vehículos, se aplicó el indicador en la descarga lateral de los camiones. El segundo modelo se aplicó en una empresa que fabrica componentes de automóviles midiendo la efectividad de los vehículos de guiado automático. Por último, el modelo del funcionamiento del almacén se validó en una empresa de fabricación de productos de descanso.

4.1 Caso A (Descarga)

4.1.1 Descripción del Caso A

El modelo será validado en una empresa del sector automoción en España. La empresa busca mejorar la eficiencia de los procesos implementando un sistema que registre y mida la descarga de camiones. Se reciben materiales de 150 proveedores y se manejan 1780 referencias aproximadamente. El estudio se realizará en la nave de descarga. La nave tiene varias zonas de descarga de camiones, que se segregan según la mercancía o referencia que se transporte. La zona elegida tiene dos huellas de descarga, permitiendo que dos camiones estén estacionados en posición de descarga (Figura 15).

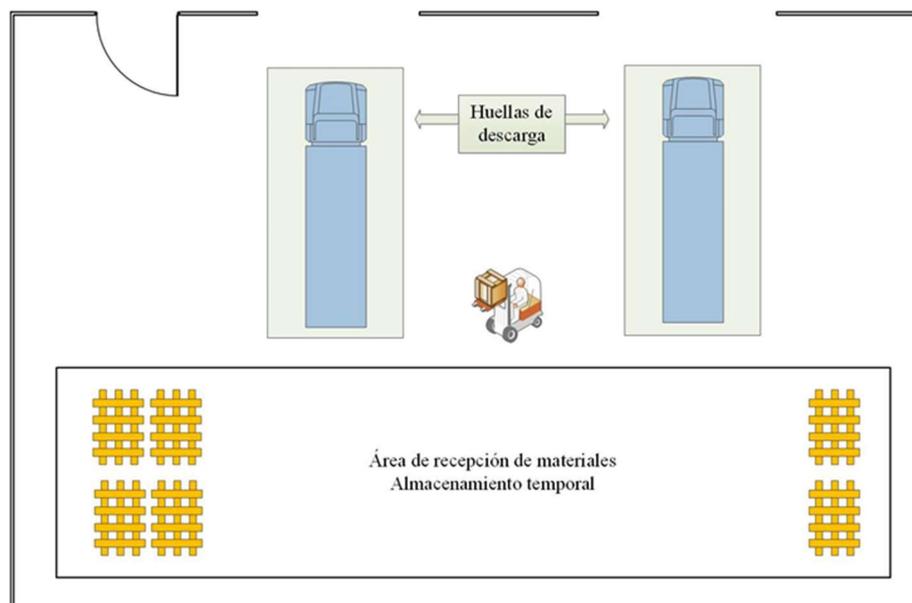


Figura 15. Distribución física del área de descarga.

El proceso de descarga es realizado por un solo operario. El flujo del proceso del caso se puede observar en la Figura 16.

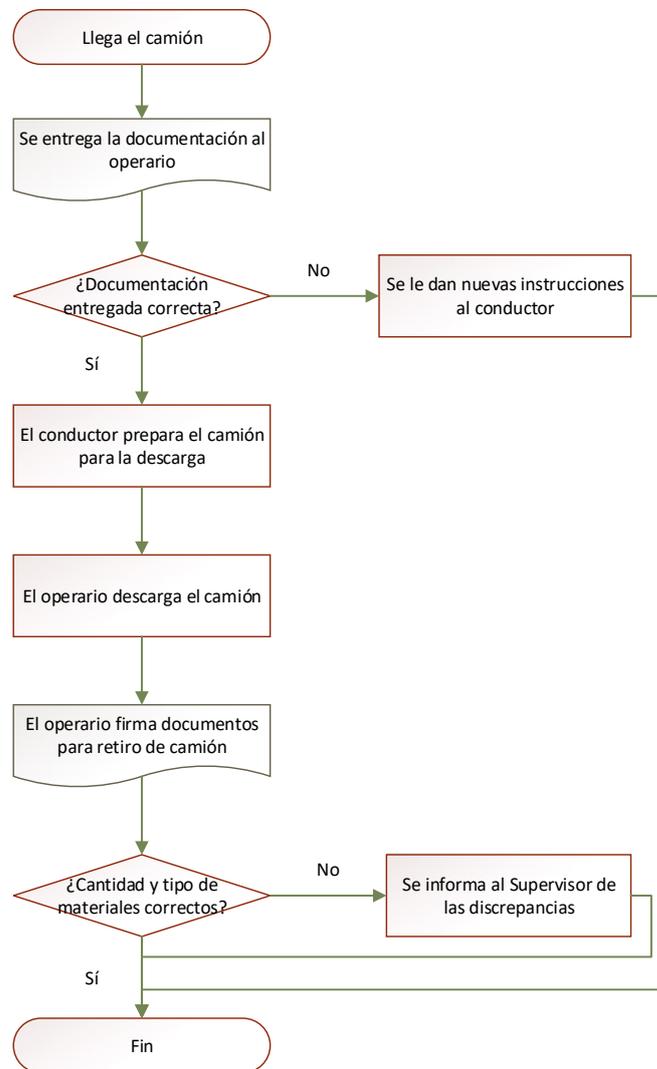


Figura 16. Diagrama de flujo del caso A

El proceso inicia con la llegada del camión a la parte externa de la zona de descarga. Una vez estacionado el vehículo, el conductor entrega la documentación correspondiente de la mercancía que transporta al operario, el cual verifica si el material pertenece a esa sección de descarga; de ser así se le indica al conductor introducir el camión en la huella de descarga; de lo contrario, se le muestra a donde debe dirigirse.

El operario que realiza la función de descarga apunta a mano en el documento los siguientes datos: ruta, ventana horaria, hora de entrada, hora de salida, proveedor y matrícula.

1. Ruta: es la dirección procedente del camión.
2. Ventana horaria: es el rango de hora aproximada de la llegada del camión.
3. Hora de entrada: es la hora de llegada del camión a la nave de descarga.
4. Hora de salida: es la hora de finalización del proceso de descarga.
5. Proveedor: es la empresa que proporciona el material.
6. Matrícula: número de identificación del camión.

Una vez que el camión está en la huella de descarga, el conductor abre la lona lateral del camión, retira las tablas laterales de seguridad y espera al operario que realiza la función de descarga. El operario inicia el proceso verificando que el material dentro del camión está en buen estado; de ser así procede a descargar la mercancía, de lo contrario se llama al supervisor para verificar si se procede a la descarga o se le pide al camión que se retire. El operario utiliza una carretilla de palas largas para descargar el material y lo ubica en la zona de recepción, lugar donde se deposita temporalmente para después ser ubicado en el almacén. El material viene almacenado en contenedores, los contenedores del mismo tipo se colocan juntos, y también se tiene en cuenta que todo el material transportado en un mismo camión se debe colocar lo más próximo posible en la zona de recepción.

Terminado el proceso de descarga, el operario firma el documento de la confirmación de la descarga, el conductor procede a colocar las tablas laterales de seguridad, cerrar la lona y salir de la nave, quedando libre la huella de descarga para el próximo camión. Antes de continuar con el siguiente camión el operario debe verificar que el material descargado coincide con los materiales detallados en la documentación entregada por el conductor. De existir alguna diferencia el operario toma nota en el documento y notifica al Supervisor para denunciar la discrepancia.

La empresa cuenta con un camión de reparto que transita dentro de la planta. La función de este camión es transportar los materiales que fueron descargados en una zona de descarga que no le corresponde. El camión de reparto tiene prioridad a la hora de ser atendido por el operario que realiza la función de descarga. En caso de que un material se descargue en una zona incorrecta, el operario avisará al camión de reparto para que cargue ese material y lo traslade al área de descarga correspondiente.

4.1.2 Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso A

El modelo fue desarrollado y aplicado durante cuatro fases; siendo la primera planificación, en la cual se identificó el proceso a medir y se desarrolló el concepto del modelo de medición del rendimiento. En la segunda fase, actuación, se recoge los datos e información. En esta fase se establece la procedencia de los datos y desarrollo de nuevas plantillas para obtener información adicional. En la tercera fase observación, se analizan y adquieren los datos. Por último, la fase de reflexión donde se evalúa el proceso de recogida de datos y se proponen mejoras.

Durante el periodo de estudio se registró la información de 2.135 camiones aproximadamente. La información fue consolidada y trabajada en una hoja de Excel, una parte de información provenía del sistema de registro de la empresa y la otra se obtuvo de las nuevas plantillas que eran registradas por los operarios de descarga.

La información proporcionada por el sistema es:

- a. Ventana de tiempo: es el intervalo de tiempo en que debe llegar el camión.
- b. Puntos de descargas: áreas de la planta donde se debe descargar el camión dependiendo del material que transporta.
- c. Proveedor: la compañía que supe el material.

La información proporcionada por el operario:

- a. Ruta: código de la ruta del proveedor.
- b. Entrada: hora en que entra el camión a las huellas de descarga.
- c. Salida: hora de finalización del proceso y el camión se retira de las huellas.
- d. Incidentes: registro de cualquier suceso que retrase el proceso de descarga.

Una vez obtenida y registrada esta información en la hoja de Excel se calcula la siguiente información:

- a. Tiempo bruto: tiempo total que ha estado la huella de descarga ocupada por un camión

- b. Tiempo neto: tiempo que la huella de descarga ha estado ocupada sin considerar el tiempo de descanso o pausa.
- c. Tiempo de descarga: tiempo utilizado para descargar el camión.
- d. Puntualidad: clasificación que se le da al camión si ha entrado a la huella de descarga en la ventana de tiempo planificada.

Adicional a esta información se debe agregar el turno, el día y la semana. La Tabla 7 muestra un extracto de la información consolidada en la hoja de cálculo.

Como parte esencial del indicador se definieron las pérdidas del proceso. Estas pérdidas internas o externas del proceso se clasificaron por los cuatro factores disponibilidad, rendimiento, calidad y puntualidad establecidos en el modelo. Las pérdidas internas son consideradas todas aquellas que se producen por factores intrínsecos y pueden ser controladas y ajustadas por estrategias o mejoras de la organización. A diferencia las pérdidas externas son las que se producen por factores extrínsecos y para ajustar o mejorar se necesita la colaboración de los agentes externos al proceso. Dos de los cuatro factores eran influenciados por factores externos que afectan la efectividad del proceso. La Tabla 6 presenta el desglose de pérdidas.

Categoría		Pérdidas
Disponibilidad	Interna	▪ Avería en la puerta de acceso
		▪ Carretillas descargadas o averiadas
		▪ Falta de carretillas
Rendimiento	Interna	▪ Accidentes laborales
		▪ Caída del producto durante la descarga
		▪ Verificación de documentos
		▪ Carga o descarga de camión interno
		▪ Área de recepción llena de mercancías.
Calidad	Interna	▪ Camión para otra zona de descarga
	Externa	▪ Producto desordenado dentro del camión
		▪ Producto no cargado para su descarga lateral
		▪ Productos en mal estado (mojado, roto, caído, etc)
Puntualidad	Externa	▪ Camión no llega en la ventana horaria planificada

Tabla 6. Desglose de pérdidas del proceso.

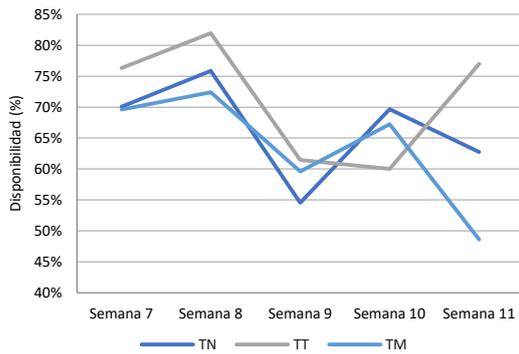
Nº	86	87	88	107	108	109	117	118	119
Turno	Noche	Noche	Noche	Mañana	Mañana	Mañana	Tarde	Tarde	Tarde
Día	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020	13/2/2020
Semana	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Ruta	MB23X	PTC3X	PT63Y	MB14H	SK14M	PT24L	E624R	Delivery	E334N
Ventana de tiempo I	21:00	21:00	22:00	10:00	10:00	10:00	15:00	-	14:00
Ventana de tiempo F	22:00	22:00	23:00	11:00	11:00	11:00	16:00	-	15:00
Puntos de descarga	D51E	D51E	D51E	RHE	D51E	D51E	D51E		D51E
Puntos de descarga				D51E					
Entrada	22:50	23:15	23:40	10:40	11:05	11:30	15:25	16:00	16:15
Salida	23:10	23:30	23:55	11:10	11:30	12:25	16:00	16:15	16:35
Tiempo bruto	0:20:00	0:15:00	0:15:00	0:30:00	0:25:00	0:55:00	0:35:00	0:15:00	0:20:00
Tiempo neto	0:20:00	0:15:00	0:15:00	0:30:00	0:25:00	0:55:00	0:35:00	0:15:00	0:20:00
Tiempo de descarga	0:20:00	0:15:00	0:15:00	0:15:00	0:20:00	0:55:00	0:35:00	0:15:00	0:20:00
Proveedor	ABC	DEF	GHI	JKL	MNO	PQR	STU		WVX
Puntualidad	NOK	NOK	NOK	OK	NOK	NOK	OK		NOK

Tabla 7. Información necesaria para el cálculo del indicador.

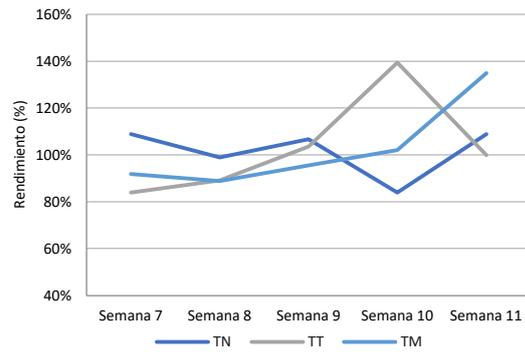
Definidas las pérdidas y adquirida la información se hace el cálculo del indicador. El indicador fue calculado diario por turnos, utilizando las ecuaciones del apartado 3.3.2 en que se ha definido en el modelo de este indicador. La empresa trabaja 24 horas divididas en tres turnos mañana, tarde y noche con pausas cortas de descanso. El tiempo total del turno es de 7 horas 42 minutos y solo se consideró 18 minutos de pausa.

4.1.3. Resultados del Caso A

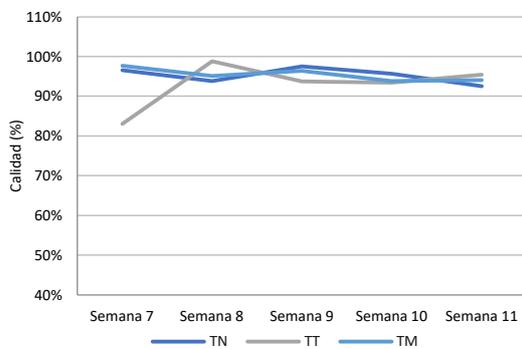
Los resultados fueron analizados por cada factor para ver su comportamiento individual (ver Gráfico 5) y después se calcula el indicador del proceso logístico. El Gráfico 5a muestra los resultados de cinco semanas del ratio de disponibilidad. Estos resultados rondan entre el 50% y el 70%, siendo los valores del turno de la tarde superiores a los valores de la mañana y noche. Se puede observar que la mayor pérdida en el factor de disponibilidad se origina por la falta de camiones. En el Gráfico 5b se puede ver el promedio del ratio de rendimiento. Estos valores son bastantes altos y muchas veces sobrepasa el 100%. El promedio del ratio de calidad (ver Gráfico 5c) es el más estable con margen de diferencias menores, obteniendo unos valores esperados dentro del rango. Por último, el factor de puntualidad mostrado en la Gráfico 5d es el que presenta valores más bajos con respecto a los otros factores. El rango de los resultados varía entre un 25% y un 35%, por lo que se puede concluir que es el factor que más afecta al indicador global del proceso. Los resultados del análisis detectaron que más del 50% de los camiones llegan fuera de su ventana horaria.



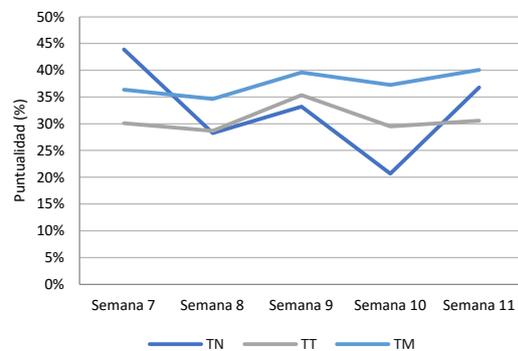
a) Promedio del ratio de disponibilidad por semana



b) Promedio del ratio de rendimiento por semana



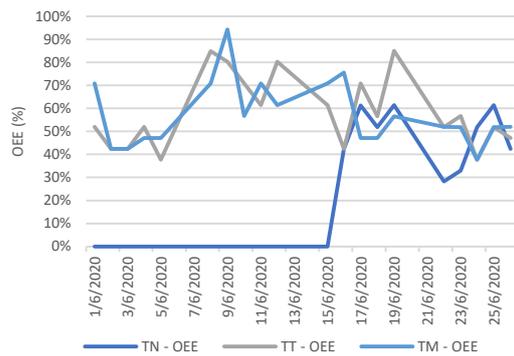
c) Promedio del ratio de calidad por semana



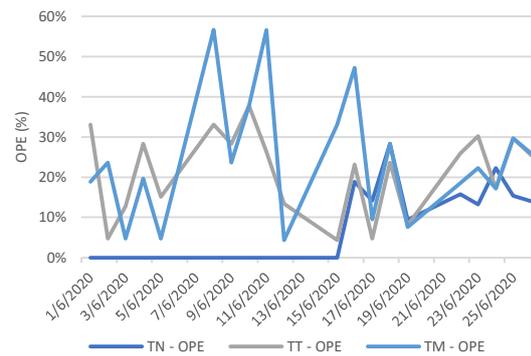
d) Promedio del ratio de puntualidad por semana

Gráfico 5. Promedio de los cuatro factores por turno y semana a) disponibilidad, b) rendimiento, c) calidad, y d) puntualidad

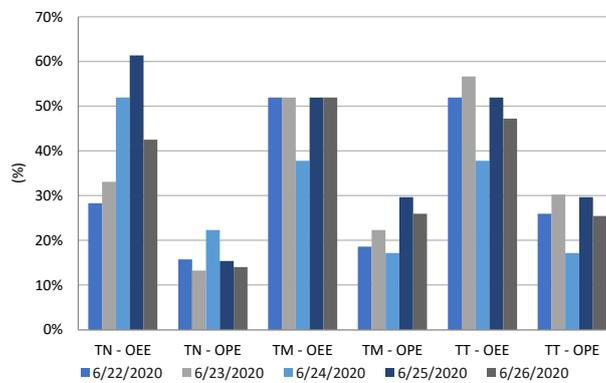
Estos cuatro factores permiten calcular el indicador del proceso de descarga. Los resultados se presentan en la Gráfico 6. Primero se hizo el cálculo utilizando los 3 factores del OEE tradicional que son disponibilidad, rendimiento y calidad (ver Gráfico 6a). El comportamiento de los turnos de mañana y de tarde son similares y tiene un promedio aproximado de 58%, mientras que en el turno de noche el rendimiento general es más bajo. Al comparar los resultados del OEE vs el OPE (ver Gráfico 6c) se detectan unos resultados inferiores en el OPE, atribuidos al factor de puntualidad. En el Gráfico 6b se ven resultados del OPE que tienen un promedio aproximado de 23%. Estos resultados han motivado a profundizar en el desarrollo de cada paso del proceso de descarga para mejorar la efectividad. Es importante resaltar que el factor de puntualidad tiene una gran influencia en los resultados y se ve sometido a factores externos a la empresa.



a) Cálculo del OEE (D x R x C) (1 mes)



b) Cálculo del OPE (D x R x C x P) (1 mes)



c) Comparativa de los resultados OEE vs OPE

Gráfico 6. Medición del indicador a) OEE, b) OPE y c) Comparativas del OEE vs OPE de un mes

Todos estos resultados ayudan a medir el proceso para gestionar y mejorar la productividad de la empresa. También ayudan a tomar decisiones estratégicas de cambios o mejoras basadas en datos y métricas.

El indicador OPE ha permitido a la empresa medir el desempeño en la operación de descarga. Desempeño que anteriormente no era estudiado ni medido, a pesar de existir datos individuales del flujo de la operación. Así pues, se puede concluir que con el indicador se han podido integrar estos datos individuales en una sola medición para realimentar y mejorar el proceso.

Anterior a la implementación del OPE, la empresa registraba información sobre la llegada de los camiones, sin analizar el rendimiento del proceso de descarga.

Incorporando el factor de puntualidad al indicador del rendimiento se puede ahora observar su efecto en el proceso, así como la importancia de su incorporación en la medición para disponer de un control de lo que ocurre en el proceso de descarga.

4.2 Caso B (Equipo logístico)

4.2.1. Descripción del Caso B

El caso B se desarrolla en una planta de producción de componentes de automóvil. La empresa trabaja 8 horas por turno, hay tres turnos: mañana, tarde y noche. Cada turno de 8 horas tiene una pausa de 30 minutos. El caso se centra en la aplicación del modelo en un entorno real en el que se utilizan AGV para la manipulación de materiales entre células. Se analizan 2 equipos AGV que pueden transitar por 2 posibles rutas según la necesidad. La metodología de trabajo de los equipos AGV es la siguiente: como punto de partida, los equipos se encuentran en una base donde recargan la batería; el AGV atiende las solicitudes y una vez completado el recorrido vuelven a su posición inicial hasta que sea requerido para atender una nueva solicitud.

Para este caso se analizará una línea de producción que solicita el AGV y puede llegar a dos destinos en el almacén dependiendo del producto que transporte. En la Figura 17 se presenta de manera gráfica la operación o recorrido del AGV.



Figura 17. Recorrido del AGV

A continuación, se detalla el estudio de las operaciones. El proceso inicia cuando el AGV es solicitado por el operario en la línea de producción, se llenan unos contenedores con productos que deben ser transportados al almacén. Para ello, el AGV sale de la base de carga en dirección a la línea de producción, donde recoge el contenedor lleno y lleva el mismo al almacén. En el almacén pueden tener dos posibles destinos o ubicaciones, por esta razón se analizan las dos posibles rutas que puede realizar el AGV. Una vez el AGV llega al almacén, descarga el contenedor lleno y carga un contenedor vacío, el cual lleva a la línea de producción para ser llenado de productos. El AGV regresa a producción descarga el contenedor vacío y, si no es requerido para ninguna otra operación, regresa a su base.

4.2.2. Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso B

El modelo fue aplicado para analizar la efectividad del equipo logístico. Una vez que se comprende el proceso realizado por el equipo AGV, se identifican las pérdidas, para luego, aplicar las ecuaciones del indicador OEE_{AGV} . Las pérdidas se definieron tomando como base las presentadas en el apartado 3.4.2. de la definición del marco del modelo para un equipo en sistema logístico. En la Tabla 8 se desglosan las pérdidas por cada factor del indicador que son disponibilidad, rendimiento y calidad.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sin ordenes de trabajo: tiempo en el que equipo no tiene solicitudes. ▪ Tiempo no planificado: se consideran aquellas que excede los 5 minutos. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Fallos o averías ➤ Accidentes ➤ Falta de suministro de energía en el equipo ▪ Tiempo planificado <ul style="list-style-type: none"> ➤ Reuniones ➤ Descanso o almuerzo
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paradas menores: se consideran aquellas paradas que no excedan los 5 minutos en solucionarse. ▪ Reducción de velocidad

Factores	Pérdidas
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recorridos sin incidentes ▪ Recorridos con incidentes

Tabla 8. Desglose de pérdidas del AGV.

Otros datos generales importantes para el caso se detallan en la Tabla 9. Los datos como la velocidad promedio y las medias de los recorridos serán utilizados para el cálculo de los factores del indicador como los datos de referencia.

Datos	Medidas
Turnos	3 (mañana, tarde y noche)
AGV	2 unidades
Velocidad promedio AGV	0.4 m/s
Recorrido ruta 1	Media de 348 segundos
Recorrido ruta 2	Media de 643 segundos

Tabla 9. Datos generales del caso B.

El recorrido de las rutas se desglosa en la Tabla 10, el tiempo estándar presentado son segundos y detallado por la actividad que realiza el AGV.

Actividad	Ruta 1	Ruta 2
Desplazamiento a línea	35,0 s	92,5 s
Carga contenedor en línea	10,0 s	10,0 s
Desplazamiento cargado a almacén	70,0 s	137,5 s
Descarga lleno y carga vacío	60,0 s	60,0 s
Desplazamiento a línea	87,5 s	175,0 s
Descarga vacío en línea	10,0 s	10,0 s
Desplazamiento a home	75,0 s	157,5 s
Tiempo total (segundos)	347,5 s	642,5 s

Tabla 10. Dimensionamiento de las rutas.

El análisis se hará de los AGV por los turnos de trabajo, también detallaran los factores de disponibilidad, rendimiento y calidad para conocer cuál es que el presenta los valores más deficientes y, por último, se detallan los resultados por las rutas.

4.2.3. Resultados del Caso B

A continuación, se analizan los resultados obtenidos para los AGV, rutas y los factores que componen el indicador de efectividad. El Gráfico 7 presenta un promedio mensual de los resultados de ambos AGV por los turnos de trabajo. Los resultados oscilan en un rango de 45% a 65%. El OEE en AGV 1 fue de 63%, 47% y 63% en cada turno mañana, tarde y noche respectivamente. Y los resultados del AGV 2 son de 55%, 56% y 49% en cada turno. Las solicitudes o creación de necesidad de los AGV's son bastante similares en cada turno de trabajo; en promedio en el turno de la mañana son utilizado un 36%, por la tarde un 30% y por la noche un 33%.

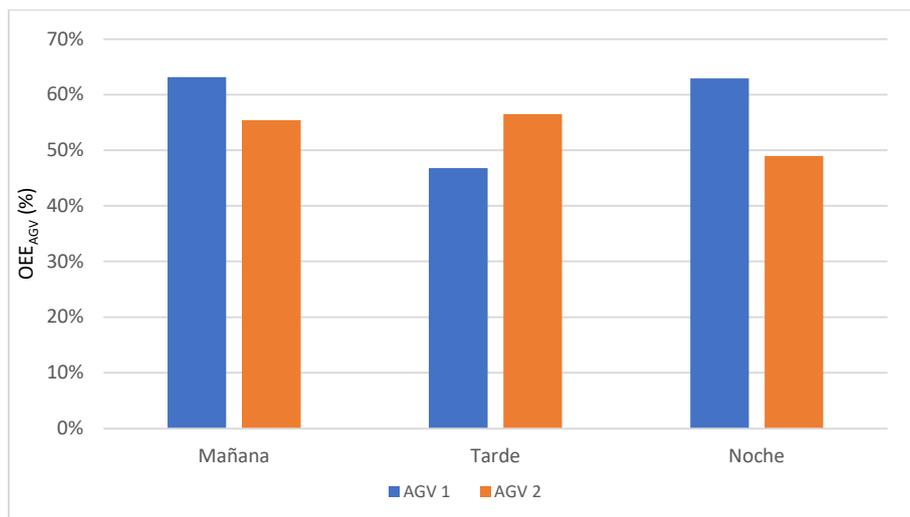


Gráfico 7. Resultados del indicador por turnos de trabajo.

Como se sabe, el indicador está compuesto de los factores de disponibilidad, rendimiento y calidad; y cada uno le aporta un valor al indicador. El Gráfico 8 presenta valores similares en los factores de rendimiento y calidad en los diferentes turnos, sin embargo, la disponibilidad en los tres turnos es menor a los otros dos factores. Estos resultados llevaron a indagar las razones y se encontró que la falta de órdenes de trabajo estaba afectando el factor de disponibilidad. Adicionalmente, se puede decir que el factor de rendimiento sólo se ve afectado si se da alguna incidencia de reducciones de

velocidad o en el caso de la calidad si durante el recorrido ocurre algún accidente el cual no se pueda completar la tarea.

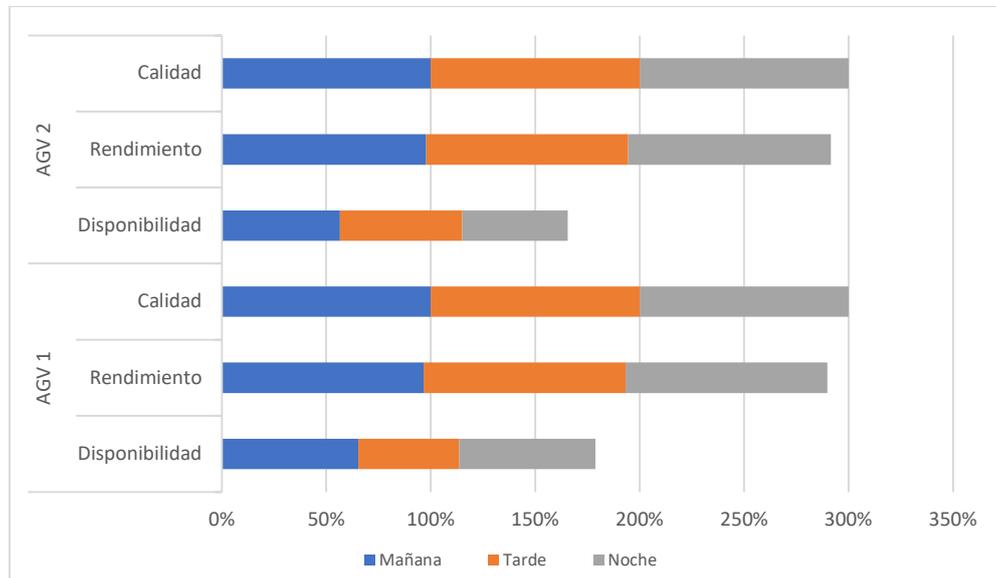


Gráfico 8. Factores del indicador por AGV por turno.

En el Gráfico 9 se representa un escenario completo del indicador donde se muestra el AGV, el turno y la ruta en que es utilizado. Sus resultados son inferiores a los mostrados anteriormente, ya que se analizan las rutas por separado. En valores generales los AGV recorren menos veces la ruta 2; no obstante, es la ruta que mayor tiempo toma de recorrido, por esta razón sus valores son superiores en la mayoría de los casos.

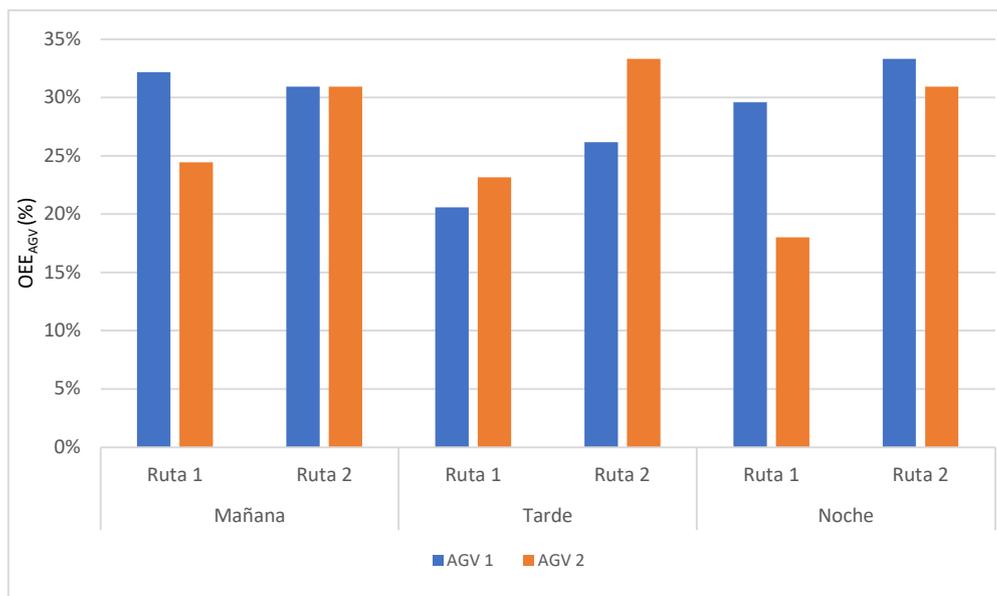


Gráfico 9. Resultados del indicador considerando las rutas por turno de trabajo.

En general para este caso en particular del análisis del equipo logístico los resultados fueron bastante estables. Se constata que al ser un equipo automático con una ruta predefinida, las incidencias que ocurren son menores. Se detecta una disminución en la disponibilidad, en su mayoría por falta de órdenes de trabajo, en el factor de rendimiento por obstrucción de la ruta disminuyendo la velocidad del equipo y, en lo que respecta a la calidad, por accidentes que impidan llegar al destino, siendo estos dos últimos muy ocasionales. La descarga o cambio de la batería del AGV que afecta la disponibilidad en este caso se dio muy esporádicamente ya que el AGV una vez realiza su recorrido regresa a su base de carga. El mantenimiento de los vehículos es planificado y se revisa que se encuentre en óptimas condiciones para cumplir con la tarea.

Anteriormente, la empresa contaba con datos individuales, como el tiempo de ruta, velocidad estándar, entre otros, propios de la operación de estos equipos, pero no de su rendimiento. Estos datos ahora son utilizados como parte de la información de entrada necesaria para calcular el indicador, dándole valor a los datos del funcionamiento del equipo. La caracterización e implementación del indicador OEE_{AGV} ha permitido medir el rendimiento de un equipo de guiado automático utilizado en procesos logísticos en la empresa. Además, se han identificado las pérdidas y cuellos de botellas de la operación. Con el indicador, no solo es posible medir el rendimiento del equipo, sino que también la efectividad con las interacciones que ocurren en el proceso para realimentarlo y mejorarlo.

4.3 Caso C (Almacén)

4.3.1. Descripción del Caso C

En el caso C se busca comprender la integración de las actividades dentro de un almacén, identificar las pérdidas que se tienen y calcular el indicador de rendimiento. Se validará el modelo en el área de almacén de una empresa que se dedica a la producción de productos de descanso. En este almacén se diferencian dos grandes áreas, definidas como área 1 y área 2. En el área 1 se encuentra una máquina automática que clasifica los productos que vienen de la fábrica y en área 2 se encuentra las estanterías para el almacenamiento de los diferentes productos.

La operativa del proceso en el almacén es la siguiente: los productos llegan al almacén mediante una rampa mecánica a la máquina clasificadora directamente de la fábrica. Posteriormente, entran a las cintas mecánicas en la parte superior de la máquina, donde son separados dependiendo de su tamaño y destino. Al final de las cintas mecánicas los productos se van apilando sobre una tabla que es la base del contenedor. Conforme los productos van entrando, la base del contenedor va descendiendo a la parte inferior de la máquina hasta quedar completo. La parte inferior de la máquina está formada por carriles, carros transportadores de contenedores y áreas de carga. Una vez el contenedor este completo y en la parte inferior de la máquina, éste va circulando en los carros transportadores y llevados al área de carga correspondiente. Los contenedores pueden tener dos destinos; el almacén o las estanterías de productos preparados para carga en los camiones.

Otras actividades que se realizan en el almacén son:

- El enrollado consiste en el embalaje en forma de rollo del producto para un mejor manejo y transporte al cliente final.
- El picking que es una actividad manual. Consiste en la labor de un operario que se encarga de preparar los pedidos para el transporte.
- Por último, la carga de mercancía en los camiones con los productos ya preparados en las estanterías del muelle para su salida del almacén con destino a distribuidores o tiendas.

La Figura 18 muestra el esquema general de los procesos que ocurre dentro de la nave de almacenamiento.

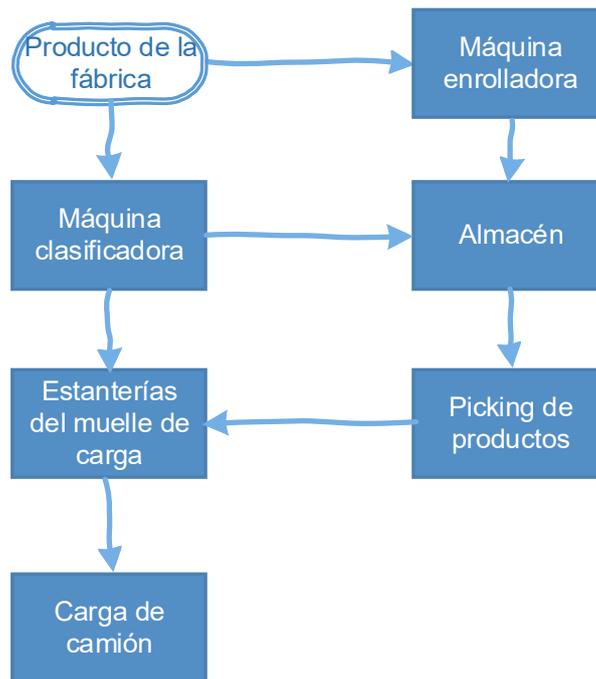


Figura 18. Diagrama general del proceso.

La empresa cuenta con un sistema ERP por sus siglas en inglés (Enterprise Resource Planning), en adelante ERP, que proporciona parte de la información necesaria para el indicador de rendimiento. Cada contenedor tiene una matrícula que se escanea cuando es transportada de un lugar a otro y esto es registrado en el sistema, permitiendo obtener la información de los movimientos que se hacen. Otra información que se puede obtener son los datos de los productos, el operario que realiza la operación, fechas, lotes, volumen que se mueve, ubicación en el almacén, entre otras.

4.3.2. Aplicación y desarrollo del modelo en el Caso C

El almacén se ha dividido en seis estaciones de trabajo donde se aplicará el modelo, utilizando las ecuaciones definidas en el apartado 3.5.2 del macro del modelo. Se clasificarán las pérdidas para cada estación de trabajo, observando las actividades que ocurren en cada una. A continuación, la descripción de cada estación de trabajo (ver Figura 19):

- Estación de trabajo 1: es una estación automática que pertenece a una sección de la máquina clasificadora automática que se encarga de los productos que van al área 2. Esta área es donde se encuentran las estanterías para el almacenamiento de los productos.

- Estación de trabajo 2: al igual que la estación 1 es automática y forma parte de la máquina clasificadora específicamente los productos que van los muelles de carga del almacén.
- Estación de trabajo 3: es una estación manual, donde se evaluará la labor del operario que lleva los contenedores desde la máquina clasificadora a su ubicación y viceversa.
- Estación de trabajo 4: es una estación manual, donde se evaluará la labor del operario de picking, quien es el encargado de preparar los pedidos de los otros productos que no pasan por la máquina clasificadora
- Estación de trabajo 5: es una estación manual, donde se evaluará la labor de los operarios responsables de cargar los camiones con los pedidos correspondiente.
- Estación de trabajo 6: es una estación automática que tiene una máquina enrolladora, donde se embalan en forma de rollos algunos de los productos para un mejor manejo y transporte.

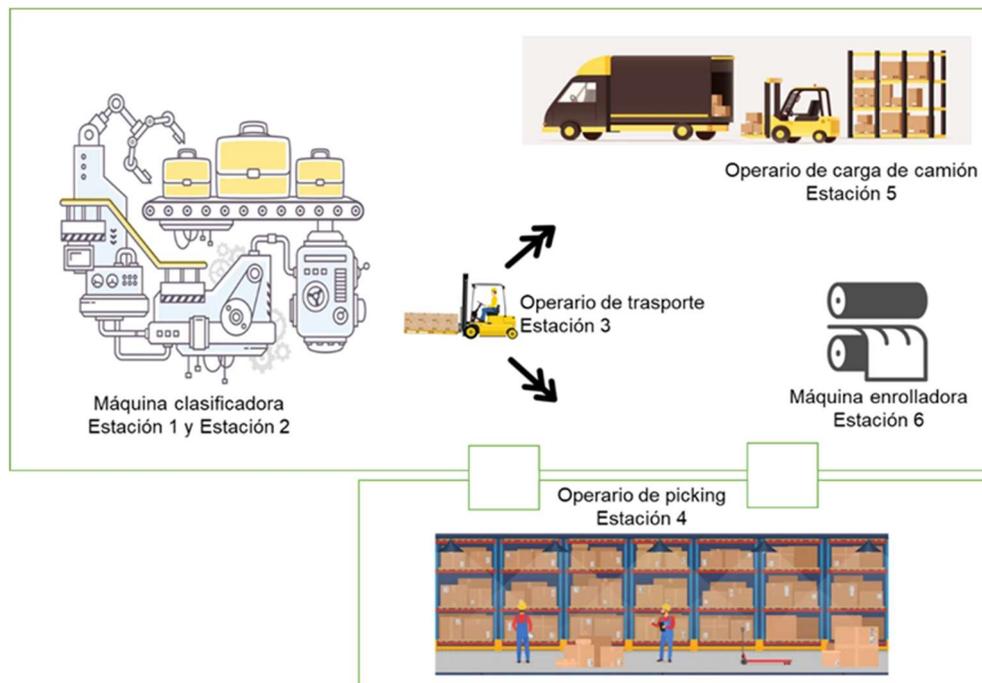


Figura 19. Esquema gráfico de las estaciones de trabajo.

De estas seis estaciones de trabajo, 3 están relacionadas con equipos o máquinas y las otras 3 se relacionan con la labor de un operario. La estación 1 y 2 son estaciones automáticas, donde el proceso es realizado por una máquina. La estación 6 es semiautomática donde la máquina enrolladora necesita ser alimentada por un operario.

Las otras estaciones 3, 4, y 5 son estaciones totalmente manuales donde todo el proceso es realizado por el operario. En cada estación se estudió el proceso, las pérdidas que se presentan, y los datos necesarios para el cálculo del indicador. Se estableció una plantilla para el registro las incidencias que ocurren en el turno. Además, en cada estación se necesita conocer las velocidades estándar y real del proceso, ambas calculadas en base de movimientos por hora. A continuación, se detallan las pérdidas y cálculo de las velocidades para cada estación.

4.3.2.1. Caracterización de pérdidas y parámetros de cada estación de trabajo

4.3.2.1.1. Estación de trabajo 1 y 2 (Automáticas)

La máquina clasificadora automática es el componente de estas dos estaciones de trabajo. La máquina se divide en dos estaciones porque los productos son clasificados con dos destinos diferentes, unos se van al almacenamiento y otros a los muelles de carga. Sin embargo, las pérdidas que se pueden presentar en el equipo son iguales para ambos casos. La diferencia radica en la manera de calcular la velocidad dependiendo el destino de los contenedores. Las pérdidas establecidas para esta sección son definidas en la siguiente Tabla 11.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	<p>Las pérdidas de disponibilidad por paradas no planificadas se consideran aquellas que excede los 5 minutos, entre las que se destacan:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Avería de la máquina estas pueden ser por fallo mecánico, de sensores, de rodillos, cinta, entre otros. 2. Fallos en la conexión del software 3. Contenedores mal colocados o deteriorados 4. Falta de personal o necesidades <p>Las pérdidas por paradas planificadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mantenimiento preventivo 2. Pausa para descanso 3. Reuniones

Factores	Pérdidas
Rendimiento	<p>Las pérdidas de rendimiento son las que producen paradas menores de 5 minutos del proceso, éstas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Avería de la máquina éstas pueden ser por fallo mecánico, de sensores, de rodillos, cinta, entre otros. 2. Fallos en la conexión del software 3. Contenedores en mal estado 4. Falta de necesidades.
Calidad	<p>Las pérdidas de calidad por productos defectuoso o rechazos de inicio se pueden dar por:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Defectos en los productos 2. Contenedores incompletos o dañados

Tabla 11. Desglose de pérdidas de la estación 1 y 2.

Para estas estaciones de trabajo se necesita conocer las velocidades estándar y real. La velocidad estándar se mantendrá para las dos estaciones de trabajo, ya que contempla toda la máquina clasificadora. Esta velocidad se calcula con el promedio de movimientos globales del año anterior entre las horas de trabajo. La velocidad estándar que se calculó para este estudio fue de 45 movs/h. La velocidad real se calculará para cada estación y dependerá de la cantidad de contenedores que se transporten. Las ecuaciones son las siguientes:

(24)

$$\text{Estación 1: Velocidad real } \left(\frac{\text{movs}}{h} \right) = \frac{\text{Cant. de contenedores al área 2}}{\text{Turno de trabajo} - \text{parada descanso}}$$

(25)

$$\text{Estación 2: Velocidad real } \left(\frac{\text{movs}}{h} \right) = \frac{\text{Cant. de contenedores a los muelles}}{\text{turno de trabajo} - \text{parada descanso}}$$

Estos datos de movimiento de contenedores se pueden obtener por el sistema ERP de la empresa.

4.3.2.1.2. Estación de trabajo 3 (Manual)

En esta estación se verifica la efectividad del movimiento de los contenedores de la máquina clasificadora al almacén y viceversa. Esta labor es realizada en dos turnos de 8 horas al día por tres operarios por turno. Las pérdidas para esta estación se detallan en Tabla 12.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	<p>Las pérdidas de disponibilidad por paradas no planificadas se consideran aquellas que excede los 5 minutos, entre las que se destacan:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Avería de la máquina estas pueden ser por fallo mecánico, de sensores, de rodillos, cinta, entre otros. 2. Puesta en marcha o cambios de batería 3. Contenedores en mal colocados o deteriorados. 4. Falta de personal o necesidades 5. Disponibilidad de las bahías <p>Las pérdidas por paradas planificadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pausa para descanso 2. Reuniones
Rendimiento	<p>Las pérdidas de rendimiento son las que producen paradas menores de 5 minutos del proceso, estas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mal registro de mercancía o contenedores 2. Interrupción en la conexión del software. 3. Contenedores en mal estado o deteriorados 4. Falta de necesidades. 5. Área de descarga atascada
Calidad	<p>Las pérdidas de calidad por productos defectuosos o rechazos de inicio se pueden dar por:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cambios de matrícula 2. Contenedores dañados

Tabla 12. Desglose de pérdidas de la estación 3.

Gracias al sistema de registro se puede obtener la información de los movimientos realizados por el operario. Cada viaje que el operario realiza desde la máquina clasificadora hasta el almacén y viceversa, es lo que se considera como movimiento. El operario debe leer el código de barras de los contenedores cada vez que inicia y finaliza un movimiento. Una vez que se tienen los movimientos y el tiempo del turno ya se puede calcular las velocidades.

Para esta estación la velocidad estándar utilizada es de 50 movs/h. Esta velocidad es el promedio de los movimientos y horas de los datos del año anterior. La velocidad real es el cociente de los movimientos de cada operario y el tiempo del turno de trabajo.

(26)

$$Velocidad\ real\ \left(\frac{movs}{h}\right) = \frac{Cant.\ de\ movimientos}{turno\ de\ trabajo - paradas\ descanso}$$

4.3.2.1.3. Estación de trabajo 4 (Manual)

En esta estación los operarios de picking son los encargados de preparar los pedidos de los otros productos que no pasan por la máquina clasificadora. Esta actividad consiste en recoger y combinar los productos para suplir las necesidades de los clientes. Estos productos son llevados a las estanterías del muelle para cargar las mercancías en el camión. Al igual que las estaciones anteriores, las pérdidas de disponibilidad son aquellas paradas mayores de 5 minutos y las de rendimiento serían las de duración menor de 5 minutos. El desglose de las pérdidas se encuentra en la Tabla 13.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	<p>Las pérdidas de disponibilidad por paradas no planificadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Averías en los lectores de códigos para el control de almacén 2. Descarga de mercancías 3. Reposiciones o reubicaciones de producto 4. Falta de personal. <p>Las pérdidas por paradas planificadas son:</p>

Factores	Pérdidas
	1. Pausa para descanso 2. Reuniones
Rendimiento	Las pérdidas de rendimiento son: <ol style="list-style-type: none"> 1. Ajuste de los lectores de códigos para el control de almacén (cambio de batería) 2. Contenedores a muelles a menos del 50% de su capacidad 3. Problemas de los contenedores (por falta, ubicación equivocada) 4. Problemas con el empaque o etiquetado
Calidad	Las pérdidas de calidad son: <ol style="list-style-type: none"> 1. Mercancía mal preparada 2. Deterioro de productos 3. Error de inventario

Tabla 13. Desglose de pérdidas de la estación 4.

En esta estación se trabajan 2 turnos de 8 horas al día, 6 operarios son los que realizan la labor de picking en cada turno de trabajo. Al igual que las estaciones anteriores se necesita calcular la velocidad estándar y real del puesto de trabajo. Dos consideraciones que se tienen en cuenta en esta estación son la ubicación de los productos y el volumen que se transporta. Los productos se encuentran ubicados en estanterías de 6 alturas en el almacén. Los movimientos que se deben realizar para ubicar un producto en un nivel 1 no es el mismo que para uno que se encuentra en el nivel 6. La otra consideración del volumen es que el movimiento de transportar un contenedor lleno no es lo mismo que vacío; el contenedor lleno obliga a realizar la operación más despacio.

Para el cálculo de las velocidades se necesitan los movimientos realizados por los operarios. Esta información es suministrada por el sistema ERP de la empresa. La velocidad real es la razón de los movimientos registrados en el turno de trabajo del operario y el tiempo de trabajo.

(27)

$$\text{Velocidad real } \left(\frac{\text{movs}}{h} \right) = \frac{\text{Cant. movimientos}}{\text{turno de trabajo} - \text{parada descanso}}$$

Para calcular la velocidad estándar se utiliza un promedio de las velocidades estándar, considerando la altura (VSA) y el volumen transportado (VSV).

(28)

$$\text{Velocidad estándar } \left(\frac{\text{movs}}{h} \right) = \frac{VSA + VSV}{2}$$

Los datos que se deben filtrar del sistema para calcular estas velocidades son los que sean picking, operario, altura del producto y volumen transportado. Para el cálculo de la velocidad de altura se cuentan los movimientos por altura, se multiplica por un factor de velocidad (ver Tabla 14) dependiendo de la altura y se dividen entre la cantidad de movimientos totales. Una metodología similar para el cálculo de la velocidad del volumen transportado, se contabiliza los movimientos por rango de volumen transportado y se multiplican por el factor de velocidad (ver Tabla 14) dependiendo del volumen transportado y se dividen entre el total de los movimientos del turno.

Velocidad correspondiente a la altura		Velocidad correspondiente al volumen transportado	
Altura	Velocidad (mov/h)	Volumen (m ³ /mov)	Velocidad (mov/h)
1	34	0 – 0.15	34
2	23	0.15 – 0.25	23
3	23	0.25 – 0.50	18
4	18	0.50 – 1.00	12
5	18	1.00 – 10.00	8
6	14		

Tabla 14. Factores de velocidades dependiendo de altura y volumen transportado.

4.3.2.1.4. Estación de trabajo 5 (Manual)

La estación de trabajo 5 es la carga de camiones en el muelle. Está conformada por tres grupos de dos operarios por turno. Los productos que son cargados en los camiones deben estar preparados en las estanterías del muelle. Estos productos pueden venir por el operario de picking o directos de la máquina clasificadora. A los grupos de operarios se les entrega una lista de lo que hay que cargar, luego verifican los productos de la estantería y cargan los camiones. Las pérdidas identificadas en esta estación de trabajo están desglosadas en la Tabla 15.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	<p>Las pérdidas de disponibilidad por paradas no planificadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cambio de batería de los lectores de códigos para el control de almacén 2. Avería o falta de camión 3. Falta de productos 4. Falta de personal. <p>Las pérdidas por paradas planificadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pausa para descanso 2. Reuniones
Rendimiento	<p>Las pérdidas de rendimiento son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de cobertura de los lectores de códigos para el control de almacén 2. Falta de productos (los de picking o de la máquina) 3. Cambios de carga, tarea, contenedores 4. Falta de espacio con contenedores vacíos
Calidad	<p>Las pérdidas de calidad son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mercancía mal preparada 2. Deterioro de productos

Tabla 15. Desglose de pérdidas de la estación de trabajo 5.

La velocidad real se calcula con los m³ cargados divididos entre 2 para considerar solo a 1 operario y luego se divide entre el tiempo del turno realizado. La información de la lista de carga que se le da a los operarios contiene los m³, el muelle, los productos a cargar y el destino.

(29)

$$\text{Velocidad real} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{\frac{m^3}{2}}{\text{turno de trabajo} - \text{parada descanso}}$$

La velocidad estándar para esta estación es de 25 m³/h, que procede de los objetivos establecidos por la empresa. Se considera que en un turno de trabajo se pueden cargar 4 camiones, lo que represente 380m³.

4.3.2.1.5. Estación de trabajo 6 (Automática)

La última estación analiza una máquina, la enrolladora, donde se enrollan algunos productos para un mejor manejo y transporte. En esta estación trabajan dos operarios, uno se encarga de introducir el producto en la máquina y el otro lo recibe a la salida de la máquina para etiquetarlos e introducirlos en el contenedor. Al igual que las estaciones anteriores, se consideraron pérdidas de disponibilidad las paradas mayores de 5 minutos y las de rendimiento las paradas menores de 5 minutos. La Tabla 16 muestra las pérdidas de la estación de trabajo 6.

Factores	Pérdidas
Disponibilidad	Las pérdidas de disponibilidad por paradas no planificadas son: <ol style="list-style-type: none"> 1. Averías en la máquina 2. Ajuste de máquina (cambio de rollo o cambios en programación) 3. Falta de personal. Las pérdidas por paradas planificadas son: <ol style="list-style-type: none"> 1. Pausa para descanso 2. Reuniones 3. Mantenimiento preventivo
Rendimiento	Las pérdidas de rendimiento son:

Factores	Pérdidas
	1. Espera de productos terminados o materias primas. 2. Espera de la orden de trabajo. 3. Problemas en la máquina (atasco o fallo). 4. Movimiento de contenedores
Calidad	Las pérdidas de calidad son: <ol style="list-style-type: none"> 1. Desperfecto en el embalaje (plástico abierto por fabricación o por manipulación). 2. Deterioro de productos. 3. Problemas con el embolsado.

Tabla 16. Desglose de pérdidas de la estación 6.

La velocidad real es la razón entre las unidades enrolladas y el tiempo que ha trabajado la máquina. El registro de esta estación, por el momento, se realiza de manera manual. El operario es el encargado de anotar la hora de inicio y fin del proceso de enrollado y la cantidad de productos enrollados.

(30)

$$Velocidad\ real\ \left(\frac{uds}{h}\right) = \frac{Unidades\ enrolladas}{hora\ de\ inicio - hora\ de\ fin}$$

La velocidad estándar en este caso varía dependiendo del día y turno de trabajo, también depende del tipo de producto que se enrolla. Los productos tienen tres clasificaciones:

Tipo A: estos son los que se enrollan directamente en la fábrica y quedan listos para su almacenamiento.

Tipo B: estos son los que necesitan pasar por la máquina de enrollado y con el plástico de embalaje es suficiente.

Tipo C: estos son enrollados por la máquina, pero el plástico de embalaje no es suficiente, por lo que requiere de una bolsa adicional que se agrega a la entrada de la

máquina. Este proceso adicional produce un aumento en el tiempo de enrollado para este tipo.

Sabiendo esta clasificación, se busca el histórico para el día que se desea hacer el cálculo de la velocidad estimada, y se realiza para cada tipo. La velocidad estándar se define como:

(31)

$$\text{Velocidad estándar} \left(\frac{uds}{h} \right) = \frac{(\text{tipo}_1 \times \text{velocidad tipo}_1) + (\text{tipo}_2 \times \text{velocidad tipo}_2)}{\text{tipo 1} + \text{tipo 2}}$$

Una vez que se tiene toda la información de las diferentes estaciones de trabajo, se procede al cálculo del indicador de efectividad del almacén.

4.3.3. Resultados del Caso C

El primer resultado que se presenta es el cálculo del indicador para cada estación de trabajo, en el Gráfico 10 se presenta una muestra de 8 semanas de los resultados obtenidos del turno de la mañana. Estos resultados revelan información sobre la efectividad de cada estación de trabajo, donde se están dando la mayoría de las pérdidas en el proceso y la variabilidad de sus resultados. Se puede observar que la estación de trabajo 1 y 2 son las que muestran más variaciones, la estación 1 tiene unas variaciones entre 40% y 85% con una media del indicador de 67.73%, mientras que la estación 2 tiene variaciones similares que van de 40% a 80% con una media de 62.50%. Las estaciones 5 y 6 con comportamientos menos variables: por un lado, la estación 5 con una media del indicador de 75.58% y rangos entre 65% y 80%; por el otro, la estación 6 con una media 62.37% y rangos entre 60% y 70%. Es importante resaltar que la estación 6 y la estación 2 son las que mostraron valores promedio de OEE más bajos durante estas 8 semanas.

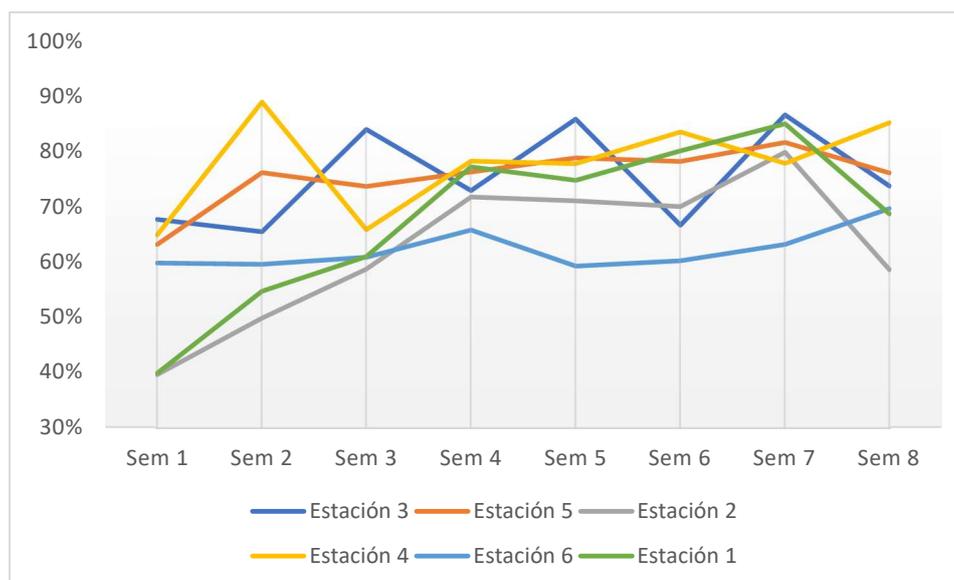


Gráfico 10. Indicador de efectividad por estación de trabajo durante 8 semanas.

Por último, las estaciones 3 y 4, la primera con una media de 75.44% y variaciones entre 65% y 85% y la segunda su rango de variación va de 65% a 90% y la media de 77.86%. Otro aspecto que distinguir en este análisis es que tres de las estaciones 3, 4 y 5 miden al operario y las otras tres miden a máquinas que se usan dentro de las operaciones del almacén. Se puede observar que el indicador muestra valores más altos en las estaciones 3 y 4 (manuales) donde se miden la efectividad del operario de la máquina clasificadora y los operarios encargados del picking. Si bien todas las estaciones obtuvieron valores por encima del 60% se aprecian resultados levemente mayores en las actividades manuales de alrededor del 75% y en las actividades automáticas alrededor del 65%. Estos resultados muestran la variabilidad del OEE en las 6 estaciones de trabajo, permitiendo a la empresa detectar las pérdidas.

Como se estableció en el apartado 3.5.2 en el marco del modelo, para cada resultado de las estaciones se le asignó una ponderación, esta propuesta busca ser lo suficientemente flexible para que las empresas puedan ajustarla según sus necesidades. Para este caso, y por acuerdo con la empresa, se decidió asignar un 20% a las estaciones manuales (estación 3, 4 y 5), un 15% a la estación 6 (automática) y un 12,5% a las estaciones 1 y 2 (automática), estas dos últimas relacionadas con la máquina clasificadora. Se decidió dar una mayor ponderación a las actividades manuales por la importancia que tiene el recurso humano en las operaciones del almacén. El total de las ponderaciones es igual al 100%

Los resultados obtenidos del indicador aplicando un promedio simple definido como Overall Warehouse Indicator - Average (OWI-A) y como se estableció en el modelo propuesto con un promedio ponderado definido como Overall Warehouse Indicator – Weighted (OWI-W) se pueden apreciar el Gráfico 11. En este caso se nota un comportamiento similar en ambos casos, sin embargo, nuestra propuesta beneficia los resultados dándole un mayor valor al indicador y relacionado con las prioridades de medición de la empresa.

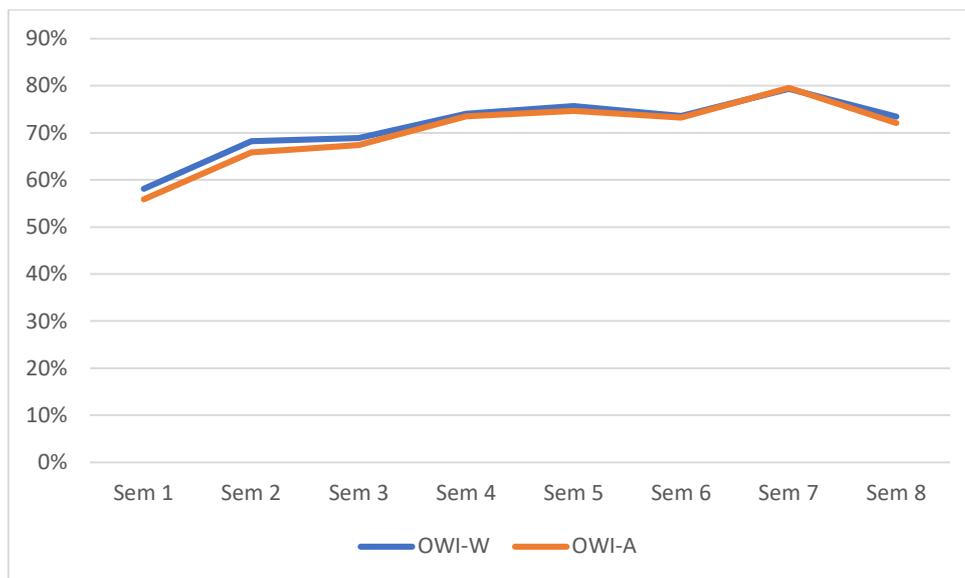
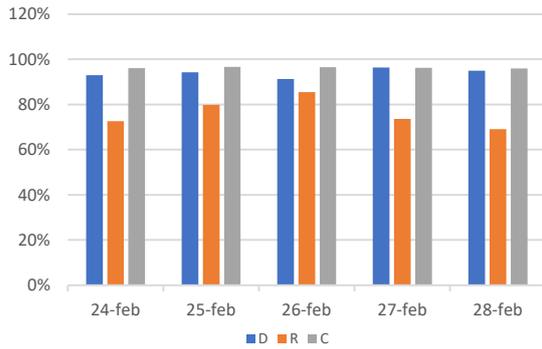


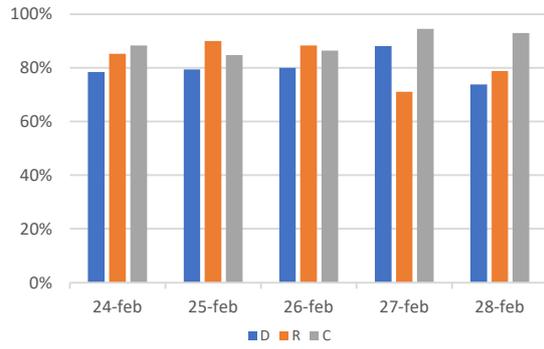
Gráfico 11. Comparativa del indicador con promedio simple y promedio ponderado.

En el Gráfico 12 se presenta una semana de los resultados del indicador detallando en sus tres factores de disponibilidad, rendimiento y calidad. Los resultados en general varían entre un 75% a 95%, se puede observar que el factor con menor desempeño es el de rendimiento. Las pérdidas de rendimiento en el proceso fueron consideradas aquellas que su duración fuera menor de 5 minutos.

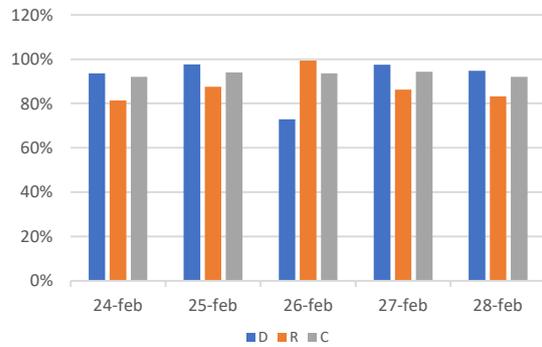
La estación de trabajo 1 (ver Gráfico 12a) es la correspondiente a la máquina clasificadora que separa los productos que se dirigen al sector 2 (almacén) muestra resultados que varían entre 69% y 96%, siendo el rendimiento el factor con valores menores. Dentro del factor de rendimiento la categoría más afectada está relacionada con problemas de contenedores, y la falta de espacio para los mismos.



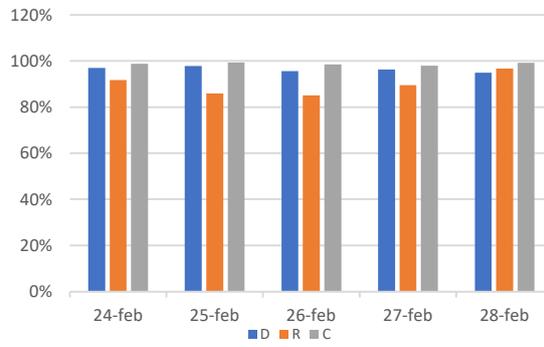
a) Estación de trabajo 1



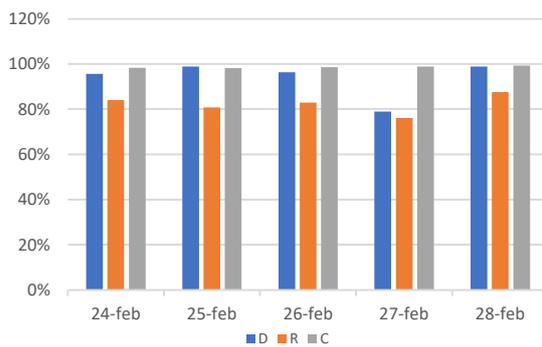
b) Estación de trabajo 2



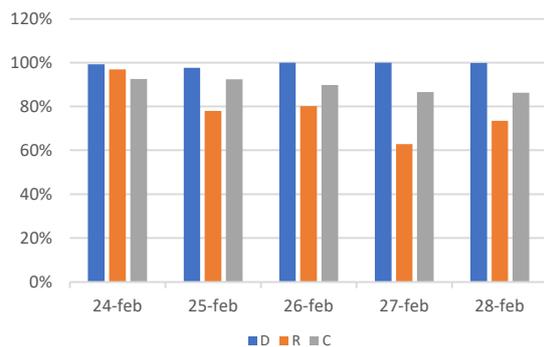
c) Estación de trabajo 3



d) Estación de trabajo 4



e) Estación de trabajo 5



f) Estación de trabajo 6

Gráfico 12. Resultados de los factores (D, R, C) del indicador por estación de trabajo.

A diferencia de las otras estaciones de trabajo, los resultados de la estación de trabajo 2 (ver Gráfico 12b) marca una baja en el factor disponibilidad. Al verificar las pérdidas de la semana, la categoría de falta de personal fue la que más afectó el indicador. En el factor de rendimiento, la categoría con mayor pérdida fue la de fallo mecánico específicamente en el elevador de contenedores. Los resultados de la calidad se vieron afectados la mayor cantidad de tiempo por el código de lectura de los contenedores y el etiquetado de los productos.

La estación de trabajo 3 (ver Gráfico 12c) muestra los resultados del operador que mueve los contenedores de la máquina clasificadora al almacén y viceversa. En el factor de disponibilidad las mayores incidencias en las pérdidas fueron por falta de personal y averías en las bahías. En el factor de rendimiento las mayores pérdidas se dieron en el área de descarga atascada y en la calidad, el cambio de las matrículas de los contenedores.

La estación de trabajo 4 (ver Gráfico 12d) mantuvo unos promedios regulares en su mayoría por encima del 80%. Las mayores pérdidas por factores de disponibilidad, rendimiento y calidad fueron; reubicación de contenedores, movimiento de contenedores con menos del 50% de su capacidad y mercancías mal preparadas respectivamente.

Los resultados de la estación de trabajo 5 (ver Gráfico 12e) varían entre un 76% y 99%, siendo el rendimiento el factor con valores menores. Las categorías de falta de camión para disponibilidad, cambio en la carga del camión para rendimiento y la selección errónea de productos para calidad fueron las más relevantes durante la semana presentada en esta estación.

Por último, en la estación de trabajo 6 (ver Gráfico 12f), que corresponde a la máquina enrolladora, el rendimiento es el factor que tiene resultados más bajos; siendo la categoría de movimiento de contenedores la de mayor impacto.

Los resultados de estas 6 estaciones de trabajo analizan el trabajo del almacén de una manera íntegra; donde 3 de las estaciones consideran el funcionamiento de equipos dentro del almacén y las otras 3 estaciones examinan el rendimiento del recurso humano en el desarrollo de las tareas del almacén.

La empresa maneja indicadores como la tasa de rotación, índice de rotura de stock, pedidos pendientes, entre otros indicadores de uso común, para monitorizar el rendimiento. Sin embargo, no existía una medición de rendimiento integral de las actividades del almacén. Además, las estaciones de trabajo no estaban creadas, ni organizadas por actividades manuales y automáticas, que se establecieron con la implementación del indicador.

Con la caracterización e implementación del indicador OEE es posible identificar las pérdidas y medir el rendimiento de cada estación de trabajo y, con el indicador OWI, del almacén en su conjunto. Además, de darle la oportunidad a la organización de escoger a qué estación de trabajo asignarle el peso ponderado según el valor que aporte a la organización.

Gracias al modelo se han organizado y generado los datos estándares, como la velocidad estándar del operario encargado de la función de picking, de la operativa de cargar los camiones, entre otros. Además, de proporcionar la metodología para el cálculo del indicador, datos fiables y resultados más precisos, que reflejan la realidad del entorno de operaciones. Asimismo, se ha conseguido motivar a los trabajadores para su participación en la identificación y registro de pérdidas en cada estación de trabajo.

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas como resultado de esta investigación, también se muestran las líneas futuras derivadas a raíz de este trabajo. Por último, se exponen la divulgación de los resultados realizados hasta la fecha.

5.1. Conclusiones

Mediante una revisión de literatura se identificó una brecha en la que no había sido explorado el OEE, hecho que hizo que se planteara el desarrollo de los modelos propuestos. La revisión de literatura mostró la importancia de este indicador. A lo largo del tiempo diferentes autores los han trabajado, pero no se ha realizado un planteamiento en procesos logísticos. Autores como García-Arca et al. (2018); Sharma et al. (2018); Supriyanto & Mokh (2018) indicaron que el OEE podría ser adaptado al sector servicios o a otros procesos logísticos.

En esta tesis se han caracterizado, implementado y validado tres modelos de indicadores como medida de rendimiento y efectividad, basados en el conocido OEE, en diferentes procesos logísticos. Se ha propuesto el indicador de rendimiento en un proceso de descarga, en un equipo de apoyo logístico y en las actividades que integran la operación de un almacén

En la investigación se han planteado tres objetivos que son: 1) Comprender la importancia en la medición del rendimiento de las operaciones, analizar el indicador OEE y su implementación en la industria. 2) Plantear nuevos indicadores en procesos logísticos basados en el OEE. 3) Validar el indicador en la industria para comprobar su efectividad en los procesos logísticos. Los tres objetivos se han alcanzado a lo largo del trabajo, el primer objetivo se consiguió con el desarrollo de la revisión de literatura donde se analizó la importancia de los sistemas de medición, los modelos existentes basados en el OEE y la aplicación en otros sectores. El segundo objetivo fue logrado con los modelos propuestos del indicador de efectividad en los diferentes procesos logísticos. Por último, el tercer objetivo fue alcanzado y expuesto en el capítulo 4 con la validación de los modelos en diferentes empresas.

Con la revisión de literatura se logró concluir que existe un interés en la aplicación del indicador en diferentes ámbitos. Este interés no es solo académico sino también profesional del sector productivo y logístico. Los resultados del indicador miden la

efectividad y ayudan a tomar decisiones basadas en datos reales para la mejora continua de la empresa. También se vio que la producción científica de artículos ha tenido su auge en los últimos años, aun cuando la temática se lleva estudiando desde inicios de los noventa. A pesar de que es un indicador que en sus inicios fue utilizado en la producción, ha sido explotado actualmente en otras áreas como la minería, semiconductores, puertos, recursos humanos, la sostenibilidad de los procesos, entre otros.

Los modelos han permitido la recolección de datos y medición de los diferentes procesos o equipos para encontrar cuellos de botella o pérdidas de tiempo que afectan a la efectividad. Este estudio ha caracterizado, implementado y validado el indicador en algunos procesos logísticos, confirmando que es necesaria una investigación profunda de los procesos pero que puede ser implementado en cada caso real. Los resultados conseguidos por los indicadores contribuyen a identificar actividades que no agregan valor, además de detectar factores que influyen en los procesos/sistemas que las empresas no habían considerado con anterioridad en los entornos en los que han sido validados, realimentando las actividades de mejora continua

Con el modelo propuesto para el proceso de descarga se identificaron pérdidas en la descarga de un camión, además se encontró que una de las principales variables que afecta al indicador es la puntualidad. La puntualidad es un factor que depende del cumplimiento de un agente externo a la organización y es considerado una variable importante en los procesos logísticos. Este hecho, además, es constatado en este trabajo. Con la validación de este modelo se puede concluir que, dependiendo del proceso que se quiera medir, factores ajenos al control de la empresa pueden influir en los resultados. Los resultados del caso de estudio mostraron que más del 50% de los camiones llegan fuera de su ventana horaria, afectando al plan de descarga por turno de trabajo. Establecer un plan colaborativo con los proveedores y establecer un horario de llegada más exacto es una de las mejoras que se pueden realizar al proceso. Hay muchos factores que pueden influir en la llegada tardía de los camiones, sin embargo, el control o trabajo de la mano con los proveedores puede disminuir este porcentaje de tardanza.

Los resultados revelaron que el operario tenía “tiempo muerto”, por lo cual se decidió asignarle la responsabilidad de otra zona de descarga. Los rangos aceptables del OPE para esta empresa se definieron entre 40% y 50%. Estos valores están basados en la

revisión de literatura y considerando las atribuciones del indicador y del área de estudio. Como se mencionó anteriormente, autores consideran que un rango razonable es entre 30% a 80% y estudios mundiales los estiman en un promedio del 60% en el área de producción. Finalmente, para este caso se recomienda verificar el tiempo ideal promedio considerado para el factor de rendimiento, el cual provoca que los resultados sean mayores al 100%. Esto permitiría perfeccionar el cálculo del indicador.

El segundo modelo propuesto se validó para un equipo logístico AGV utilizado para la manipulación de materiales entre células en una empresa de automoción. Al igual que el modelo anterior, se definió, desarrolló y aplicó la métrica a la operativa de un caso real. Con esta validación se confirma que el indicador se adaptó de manera efectiva al equipo logístico sin mayores incidencias. Los resultados obtenidos fueron consistentes y esperados por la empresa; el factor de disponibilidad fue el que mostró resultados inferiores en comparación con el factor de rendimiento y el factor de la calidad. Como consecuencia se ha propuesto que se les asigne otra ruta en la cual el equipo tenga una mayor utilización, derivando un incremento en el resultado del indicador OEE_{AGV} .

Adicionalmente, se puede concluir que la validación en un equipo logístico difiere en características con respecto a un sistema/máquina empleada en fabricación. Entre las diferencias que se destacan está el funcionamiento, que, en comparación con los equipos de fabricación, este equipo se mantiene en movimiento siguiendo una ruta definida. Otro aspecto es la velocidad que puede alcanzar el equipo, la cual es variable, depende de los movimientos y la cantidad de carga que transporta. Este modelo propone una estructura y desglose de pérdidas que permiten medir y cuantificar el rendimiento del equipo, la evolución de la utilización y la efectividad de este.

El tercer modelo del indicador de rendimiento del almacén permitió validar la implementación del indicador en diferentes puestos de trabajo, con sus características y sus respectivas pérdidas. A diferencia de los modelos anteriores, esta aplicación considera el almacén en general y abarca seis puestos de trabajo. Estos puestos de trabajo están conformados por 3 estaciones automáticas y 3 estaciones manuales. Este sistema de medición del rendimiento es el más complejo de este trabajo por la cantidad de operaciones y su composición. Tiene la ventaja que es posible examinar cada una de las estaciones y encontrar mejores prácticas para realizar el trabajo. Además, ofrece a la empresa la libertad de ponderar en el indicador las actividades con mayor relevancia en el rendimiento económico y financiero.

En uno de los casos el operario de picking estaba por debajo de la medición ideal y se pudo detectar que realizaba recorridos extras para buscar mercancías. Se verificaron las asignaciones y prioridades de las ubicaciones e incluso la empresa propuso una aplicación para mejorar y optimizar este proceso. Importante resaltar que hay mejoras en los procesos que se pueden realizar de inmediato y a bajo coste; y otras que conllevan un tiempo de estudio, evaluación y posiblemente una mayor inversión. De ahí que identificar pérdidas que puedan afectar al proceso de almacenamiento de una manera global, es otro de los avances de este trabajo, y muestra aspectos en los que trabajar buscando la mejora en estos entornos.

Otra alternativa propuesta para disminuir las pérdidas en este entorno es cambiar la posición de la matrícula en los contenedores para evitar el deterioro precoz ocasionado por el roce entre ellos o con la máquina clasificadora.

De manera contraria a lo que se encuentra en producción, donde la línea se mantiene constante, en el almacén existe un mayor movimiento de personas y materiales, lo que ha significado un reto para el estudio. Estas variaciones en el proceso hacen que las mediciones sean un grado más difícil de registrar. En este caso particular, la empresa donde se validó el indicador tiene un sistema ERP que registra los movimientos, lo que facilitó la obtención de los datos.

Por último, la contribución de este trabajo es generar conocimiento científico y cerrar la brecha entre la teoría y la práctica. También contribuir a la actual tendencia de la industria y la logística hacia el aumento de la automatización con sistemas que se adaptan de forma flexible. La evaluación del OEE en el ámbito logístico ayuda a que los procesos sean registrados y medidos; además, ofrecen a los encargados de la toma de decisión un menor tiempo para dar respuesta y aumentar la productividad.

Entre los beneficios que se han obtenido con este trabajo está la caracterización y parametrización de indicadores en diferentes procesos logísticos. Se ha comprobado, también, que es posible trasladar la identificación de las pérdidas en el ámbito logístico. A nivel teórico se comprobó que el OEE puede ser adaptado a otros sectores y responde a su objetivo, que es medir la efectividad de un equipo o proceso. Los modelos de medición de rendimiento propuestos en este trabajo ayudan a las empresas a identificar pérdidas, evaluar procesos y mejorar la efectividad. Esta métrica no solo es un simple indicador, sino que es una forma de análisis para entender el proceso y tomar decisiones.

5.2. Trabajos futuros

Este trabajo ofrece la oportunidad de desarrollar diversas líneas de investigación que pueden ser continuadas y ampliar el aporte de este trabajo. Considerando el primer modelo propuesto sobre el proceso de descarga de camiones sería interesante analizar el OPE de manera general en toda la nave de descarga y ver el efecto de la puntualidad y el indicador. Para este modelo solo se consideraron dos huellas de descarga, sin embargo, en la empresa existen otras huellas donde se descargan otros tipos de referencias. Al considerar las otras huellas daría como resultado un panorama más amplio de la operación de descarga de toda la empresa.

Relativo al segundo modelo OEE_{AGV} el estudio se puede ampliar y considerar una mayor cantidad de vehículos autónomos y de posibles rutas alternativas. Con respecto al modelo del almacén, donde se observa una marcada presencia del recurso humano en el indicador, se propone considerar factores y pérdidas por suplementos atribuidos al trabajador. Existen suplementos fijos, variables y especiales en la realización de una labor en las que incurre un trabajador. La revisión de literatura ofrece adaptaciones del OEE a la medida de efectividad de la fuerza laboral como lo es el OLE por sus siglas en inglés de Overall Labor Effectiveness la cual puede servir como guía.

Por último, algunas consideraciones generales de trabajos futuros que aplican para cualquiera de los modelos propuesto son:

- La introducción de medidas de sostenibilidad ambiental en las variables del proceso a analizar, como lo es la medición de la huella de carbono.
- Aplicar los modelos en otras organizaciones para establecer rangos óptimos en los procesos logísticos, así como los que se presentan en producción que se han estudiado por años. La validez y utilidad del indicador dependen de la precisión de los datos recolectados.
- En este trabajo los indicadores son registrados a posteriori, sin embargo, para futuras investigaciones se recomienda que puedan ser medidos en tiempo real si el proceso o equipo así lo permite.

5.3. Divulgación de resultados

Los resultados de esta investigación se han validado y publicado en revistas y congresos. Los siguientes trabajos se han publicado durante el desarrollo de esta tesis.

Las publicaciones en lo que respecta a revistas JCR:

- Ng Corrales, L.d.C.; Lambán, M.P.; Hernandez Korner, M.E.; Royo, J. Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. Appl. Sci. 2020, 10, 6469. <https://doi.org/10.3390/app10186469>
- Ng Corrales, L.d.C.; Lambán, M.P.; Morella, P.; Royo, J.; Sánchez Catalán, J.C.; Hernandez Korner, M.E. Developing and Implementing a Lean Performance Indicator: Overall Process Effectiveness to Measure the Effectiveness in an Operation Process. Machines 2022, 10, 133. <https://doi.org/10.3390/machines10020133>

Las publicaciones en congresos internacionales con participación en artículos y poster:

- Corrales, L. N., Lambán, M. P., Royo, J. A., & Hernández, M. E. (2021, October). Productivity tool for automated guided vehicles: OEE indicator perspective. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1193, No. 1, p. 012113). IOP Publishing.

Adicionalmente se han realizado divulgaciones en los seminarios del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

- Ponencia realizada el día 11/06/2019. El contenido expuesto está relacionado con la revisión de literatura, evolución y hallazgos del indicador.
- Ponencia realizada el día 07/11/2022. Donde se presentaron las propuestas de los modelos y su validación en empresas.

CAPÍTULO 6

6. Referencias

- Abdelbar, K. M., Bouami, D., & Elfezazi, S. (2019). New approach towards formulation of the overall equipment effectiveness. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2017-0046>
- Aleš, Z., Pavlů, J., Legát, V., Mošna, F., & Jurča, V. (2019). Methodology of overall equipment effectiveness calculation in the context of industry 4.0 environment. *Eksploatacja i Niezawodność*, 21(3), 411–418. <https://doi.org/10.17531/ein.2019.3.7>
- Annamalai, S., & Suresh, D. (2019). Implementation of total productive maintenance for overall equipment effectiveness improvement in machine shop. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 7686–7691. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C6212.098319>
- Anvari, F., & Edwards, R. (2011). Performance measurement based on a total quality approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 60(5), 512–528. <https://doi.org/10.1108/17410401111140419>
- Anvari, F., Edwards, R., & Starr, A. (2010). Evaluation of overall equipment effectiveness based on market. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(3), 256–270. <https://doi.org/10.1108/13552511011072907>
- Badawy, M., El-Aziz, A. A. A., Idress, A. M., Hefny, H., & Hossam, S. (2016). A survey on exploring key performance indicators. *Future Computing and Informatics Journal*, 1(1–2), 47–52. <https://doi.org/10.1016/J.FCIJ.2016.04.001>
- Badiger, A. S., Gandhinathan, R., & Gaitonde, V. N. (2008). A methodology to enhance equipment performance using the OEE measure. *European J. of Industrial Engineering*, 2(3), 356. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2008.017690>
- Band, W. (1990). Performance metrics keep customer satisfaction programmes on track. *Marketing News*, 24(11), 12.
- Basak, S., Baumers, M., Holweg, M., Hague, R., & Tuck, C. (2022). Reducing production losses in additive manufacturing using overall equipment effectiveness. *Additive Manufacturing*, 56, 102904. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.102904>

- Binti Aminuddin, N. A., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., Antony, J., & Rocha-Lona, L. (2016). An analysis of managerial factors affecting the implementation and use of overall equipment effectiveness. *International Journal of Production Research*, 54(15), 4430–4447. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1055849>
- Bourne, M., Mills, J., Wilcox, M., Neely, A., & Platts, K. (2000). Designing, implementing and updating performance measurement systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 20(7), 754–771. <https://doi.org/10.1108/01443570010330739/FULL/PDF>
- Braglia, M., Castellano, D., Frosolini, M., & Gallo, M. (2018). Overall material usage effectiveness (OME): a structured indicator to measure the effective material usage within manufacturing processes. *Production Planning & Control*, 29(2), 143–157. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1395920>
- Braglia, M., Castellano, D., Frosolini, M., Gallo, M., & Marrazzini, L. (2021). Revised overall labour effectiveness. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(6), 1317–1335. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-08-2019-0368>
- Braglia, M., Frosolini, M., & Zammori, F. (2008). Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML). *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(1), p 8-29. <https://doi.org/10.1108/17410380910925389>
- Braglia, M., Gabbrielli, R., & Marrazzini, L. (2019). Overall Task Effectiveness: a new Lean performance indicator in engineer-to-order environment. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68(2), 407–422. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2018-0192>
- Braz, R. G. F., Scavarda, L. F., & Martins, R. A. (2011). Reviewing and improving performance measurement systems: An action research. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 751–760. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2011.06.003>
- Brodny, J., & Tutak, M. (2019). Analysing the Utilisation Effectiveness of Mining Machines Using Independent Data Acquisition Systems: A Case Study. *Energies*, 12(13), 2505. <https://doi.org/10.3390/en12132505>

- Cheah, C. K., Prakash, J., & Ong, K. S. (2020). Overall equipment effectiveness (OEE): a review and development of an integrated improvement framework. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 30(1), 1. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2019.10020889>
- Chen, J., Zhang, X., Peng, X., Xu, D., & Peng, J. (2022). Efficient routing for multi-AGV based on optimized Ant-agent. *Computers & Industrial Engineering*, 167, 108042. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2022.108042>
- Choi, S. K., & Easterday, O. T. (2001). An Underwater Vehicle Monitoring System and Its Sensors. *Experimental Robotics VII*, 551–560. https://doi.org/10.1007/3-540-45118-8_55
- Chow, G., Heaver, T. D., & Henriks son, L. E. (1994). Logistics Performance: Definition and Measurement. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(1), 17–28. <https://doi.org/10.1108/09600039410055981>
- da Silva, A. F., Marins, F. A. S., Tamura, P. M., & Dias, E. X. (2017). Bi-Objective Multiple Criteria Data Envelopment Analysis combined with the Overall Equipment Effectiveness: An application in an automotive company. *Journal of Cleaner Production*, 157, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.147>
- Dadashnejad, A.-A., & Valmohammadi, C. (2019). Investigating the effect of value stream mapping on overall equipment effectiveness: a case study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(3–4), 466–482. <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1308821>
- Dal, B., Tugwell, P., & Greatbanks, R. (2000). Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement A practical analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(12), p 1488-1502. <http://www.emerald-library.com>
- Davidson, A. L. (2006). *Key performance indicators in humanitarian logistics* [Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35540>

- deRon, A. J., & Rooda, J. E. (2005). Equipment Effectiveness: OEE Revisited. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 18(1), 190–196. <https://doi.org/10.1109/TSM.2004.836657>
- Dindarloo, S. R., Siami-Irdemoosa, E., & Frimpong, S. (2016). Measuring the effectiveness of mining shovels. *Mining Engineering*, 68(3), 45–50. <https://doi.org/10.19150/me.6501>
- Domingo, R., & Aguado, S. (2015). Overall Environmental Equipment Effectiveness as a Metric of a Lean and Green Manufacturing System. *Sustainability*, 7(7), p 9031-9047. <https://doi.org/10.3390/su7079031>
- Durán, O., Capaldo, A., & Duran Acevedo, P. (2018). Sustainable Overall Throughputability Effectiveness (S.O.T.E.) as a Metric for Production Systems. *Sustainability*, 10(2), 362. <https://doi.org/10.3390/su10020362>
- Durga Prasad, N. V. P. R., & Radhakrishna, C. (2019). Key performance index for overall substation performance. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 6067–6071. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3797.078219>
- Elevli, S., & Elevli, B. (2010). Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE. *Acta Montanistica Slovaca Ročník*, 15(2), p 95-101. <https://www.researchgate.net/publication/47517712>
- Ericsson, J. (1997). *Disruption Analysis - An Important Tool in Lean Production* | Lund University Publications [Lund University]. <https://lup.lub.lu.se/search/publication/18276>
- Eswaramurthi, K. G., & Mohanram, P. V. (2013). Improvement of manufacturing performance measurement system and evaluation of overall resource effectiveness. *American Journal of Applied Sciences*, 10(2), 131–138. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.131.138>
- Folan, P., & Browne, J. (2005). A review of performance measurement: Towards performance management. *Computers in Industry*, 56(7), 663–680. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2005.03.001>

- Fortuin, L. (1988). Performance indicators — Why, where and how? *European Journal of Operational Research*, 34(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90449-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90449-3)
- García-Arca, J., Prado-Prado, J. C., & Fernández-González, A. J. (2018). Integrating KPIs for improving efficiency in road transport. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(9), p 931-951. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-05-2017-0199>
- Garza-Reyes, J. A. (2015). From measuring overall equipment effectiveness (OEE) to overall resource effectiveness (ORE). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(4), 506–527. <https://doi.org/10.1108/JQME-03-2014-0014>
- Garza-Reyes, J. A., Eldridge, S., Barber, K. D., & Soriano-Meier, H. (2010). Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: A relationship analysis. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 27(1), 48–62. <https://doi.org/10.1108/02656711011009308>
- Ghafoorpoor Yazdi, P., Azizi, A., & Hashemipour, M. (2018). An Empirical Investigation of the Relationship between Overall Equipment Efficiency (OEE) and Manufacturing Sustainability in Industry 4.0 with Time Study Approach. *Sustainability*, 10(9), 3031. <https://doi.org/10.3390/su10093031>
- Gleissner, H., & Femerling, J. C. (2013). *Logistics* (1st ed.). Springer Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-01769-3>
- Globerson, S. (2007). Issues in developing a performance criteria system for an organization. <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/00207548508904734>, 23(4), 639–646. <https://doi.org/10.1080/00207548508904734>
- González-Albo, B., & Bordons, M. (2011). Articles vs. proceedings papers: Do they differ in research relevance and impact? A case study in the Library and Information Science field. *Journal of Informetrics*, 5(3), 369–381. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2011.01.011>
- Gunasekaran, A., Patel, C., & McGaughey, R. E. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87(3), 333–347. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2003.08.003>

- Gutierrez, D. M., Scavarda, L. F., Fiorencio, L., & Martins, R. A. (2015). Evolution of the performance measurement system in the Logistics Department of a broadcasting company: An action research. *International Journal of Production Economics*, *160*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2014.08.012>
- Hazwani, K. N., Rahman Noorul, A., & Fitri, S. (2018). Warehousing Productivity Assessment on Logistics Service Sector. *Advances in Transportation and Logistics Research*, *1*(0), 889–903. <https://doi.org/10.25292/ATLR.V1I1.90>
- Huang, S. H., Dismukes, J. P., Shi, J., Su, Q., Wang, G., Razzak, M. A., & Robinson, D. E. (2002). Manufacturing system modeling for productivity improvement. *Journal of Manufacturing Systems*, *21*(4), p 249-259. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(02\)80165-0](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(02)80165-0)
- Hung, Y. H., Li, L. Y. O., & Cheng, T. C. E. (2022). Uncovering hidden capacity in overall equipment effectiveness management. *International Journal of Production Economics*, *248*, 108494. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2022.108494>
- Iannone, R., & Nenni, M. E. (2013). Managing OEE to optimize factory performance. In *Operations Management* (pp. 31–50). IntechOpen.
- Islam, D. M. Z., Fabian Meier, J., Aditjandra, P. T., Zunder, T. H., & Pace, G. (2013). Logistics and supply chain management. *Research in Transportation Economics*, *41*(1), 3–16. <https://doi.org/10.1016/J.RETREC.2012.10.006>
- Jauregui Becker, J. M., Borst, J., & van der Veen, A. (2015). Improving the overall equipment effectiveness in high-mix-low-volume manufacturing environments. *CIRP Annals*, *64*(1), 419–422. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.126>
- Jonsson, P., & Lesshammar, M. (1999). Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems - the role of OEE. *International Journal of Operations & Production Management*, *19*(1), p 55-78. <https://doi.org/10.1108/01443579910244223>
- Kamali, A. (2018). The way to optimize On-Time Delivery (OTD) in Logistics-Firms in Bahrain. *CiiT International Journal of Biometrics and Bioinformatics*, *10*(9), 198–204.

- Kareem, B., Alabi, A. S., Ogedengbea, T. I., Akinnuli, B. O., Aderoba, O. A., & Idris, M. O. (2020). Development of Oee Error-proof (OEE-EP)model for Production Process Improvement. *Journal of Engineering Research*, 17(2), 59–74. <https://doi.org/10.24200/TJER.VOL17ISS2PP59-74>
- Kennerley, M., & Neely, A. (2002). A framework of the factors affecting the evolution of performance measurement systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 22(11), 1222–1245. <https://doi.org/10.1108/01443570210450293/FULL/PDF>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. https://www.elsevier.com/__data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf
- Kotze, D. (1993). Consistency, accuracy lead to maximum OEE benefits. *TPM Newsletter*, 4(2).
- Krauth, E., Moonen, H., Popova, V., & Schut, M. (2005). Performance measurement and control in logistics service providing. *ICEIS 2005 - Proceedings of the 7th International Conference on Enterprise Information Systems*, 239–247. <https://doi.org/10.5220/0002536102390247>
- Larrañaga Lesaca, J. M., Zulueta Guerrero, E., Lopez-Guede, J. M., Ramos-Hernanz, J., Larrañaga Juaristi, A., & Akizu, O. (2017). Measuring global effectiveness of integrated electric energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 18121–18133. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.057>
- Li, X., Liu, G., & Hao, X. (2021). Research on Improved OEE Measurement Method Based on the Multiproduct Production System. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 490, 11(2), 490. <https://doi.org/10.3390/APP11020490>
- Logeshwaran, J., Nachiappan, R. M., Nallusamy, S., & Ethiraj, N. (2021). Evaluation of overall manufacturing line effectiveness with inventory between sustainable processes in continuous product line manufacturing system. *Journal of Green Engineering*, 11(1), 104–121.

- Lohman, C., Fortuin, L., & Wouters, M. (2004). Designing a performance measurement system: A case study. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 267–286. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00918-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00918-9)
- Lu, Z. P., & Lu, C. Y. (2011). Logistics performance evaluation of logistics enterprise integrated with KPIs and FAHP model. *2011 International Conference on Computer and Management, CAMAN 2011*. <https://doi.org/10.1109/CAMAN.2011.5778845>
- Mangan, J., & Lalwani, C. (2016). *Global logistics and supply chain management*. (3rd ed.). Wiley.
- Maskell, B. H. (1991). *Performance measurement for world class manufacturing: a model for American companies*. Productivity Press. https://books.google.com/books/about/Performance_Measurement_for_World_Class.html?hl=es&id=H5qxOXYZ7d0C
- Maté, A., Zoumpatianos, K., Palpanas, T., Trujillo, J., Mylopoulos, J., & Koci, E. (2014). A Systematic Approach for Dynamic Targeted Monitoring of KPIs. *CASCON*, 192–206.
- Mellinger, D., Shomin, M., Michael, N., & Kumar, V. (2012). Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 83 STAR, 545–558. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32723-0_39/COVER
- Mohammadi, M., Rai, P., & Gupta, S. (2017). Performance Evaluation of Bucket based Excavating, Loading and Transport (BELT) Equipment – An OEE Approach. *Archives of Mining Sciences*, 62(1), p 105-120. <https://doi.org/10.1515/amsc-2017-0008>
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), p 3517-3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>
- Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J., & Jaca, C. (2018). Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: A case study. *International Journal of Production Economics*, 197, 232–242. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.01.011>

- Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J., & Jesus Alvaréz, M. (2019). Improving effectiveness of parallel machine scheduling with earliness and tardiness costs: A case study. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 375–392. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.2.001>
- Muthiah, K. M. N., Huang, S. H., & Mahadevan, S. (2008). Automating factory performance diagnostics using overall throughput effectiveness (OTE) metric. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(7–8), 811–824. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0891-x>
- Nachiappan, R. M., & Anantharaman, N. (2006). Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17(7), p 987-1008. <https://doi.org/10.1108/17410380610688278>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TMP*. Productivity Press.
- Nakhla, M. (2018). Designing extended overall equipment effectiveness: application in healthcare operations. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17509653.2017.1373377>
- Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (2005). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations and Production Management*, 25(12), 1228–1263. <https://doi.org/10.1108/01443570510633639>
- Neely, A., Richards, H., Mills, J., Platts, K., & Bourne, M. (1997). Designing performance measures: A structured approach. *International Journal of Operations and Production Management*, 17(11), 1131–1152. <https://doi.org/10.1108/01443579710177888/FULL/PDF>
- Ng Corrales, L. D. C., Lambán, M. P., Morella, P., Royo, J., Sánchez Catalán, J. C., & Hernandez Korner, M. E. (2022). Developing and Implementing a Lean Performance Indicator: Overall Process Effectiveness to Measure the Effectiveness in an Operation Process. *Machines*, 10(2), 133. <https://doi.org/10.3390/MACHINES10020133>

- Ng Corrales, L. del C., Lambán, M. P., Hernandez Korner, M. E., & Royo, J. (2020). Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. *Applied Sciences*, 10(18), p 6469. <https://doi.org/10.3390/app10186469>
- Peng, W., Sun, T., Rose, P., Li, T., Freeman, J. R., & Causality, G. (2007). Semi-automatic system with an iterative learning method for uncovering the leading indicators in business processes. *American Journal of Political Science*, 27, 327–358.
- Pinto, M. M. O., Goldberg, D. J. K., & Cardoso, J. S. L. (2017). Benchmarking operational efficiency of port terminals using the OEE indicator. *Maritime Economics & Logistics*, 19(3), 504–517. <https://doi.org/10.1057/mel.2016.6>
- Pjevčević, D., Vladislavljević, I., Vukadinović, K., & Teodorović, D. (2011). Application of DEA to the analysis of AGV fleet operations in a port container terminal. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 816–825. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2011.08.090>
- Porter, M. E. (2001). *The value chain and competitive advantage. Understanding business processes*. (Vol. 2).
- Puvanasvaran, A. P., Yoong, S. S., & Tay, C. C. (2017). Effect of hidden wastes in overall equipment effectiveness calculation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(22), 6443–6448. www.arpnjournals.com
- Rachad, B. (2014). KPIs: winning tips and common challenges. *Performance May*, 6(2).
- Raja, P. N., Kannan, S. M., & Jeyabalan, V. (2010). Overall line effectiveness – a performance evaluation index of a manufacturing system. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 5(1), 38. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2010.029508>
- Rogers, D. S., Daugherty, P. J., & Ellinger, A. E. (1996). The relationship between information technology and warehousing performance. *Logistics and Transportation Review*, 32(4), 409–421.

- Romero, N. R., & Interrante, L. D. (1994). Expert system using simulation measures of effectiveness. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 2201–2206. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1994.400191>
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). *The handbook of logistics and distribution management* (5th ed.). Kogan Page Limited.
- Rutner, S. M., & Langley, C. J. (2000). Logistics Value: Definition, Process and Measurement. *The International Journal of Logistics Management*, 11(2), 73–82. <https://doi.org/10.1108/09574090010806173/FULL/XML>
- Samad, M. A., & Hossain, M. R. (2012). Analysis of Performance by Overall Equipment Effectiveness of the CNC Cutting Section of a Shipyard. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2(11), 1091–1096. <http://130.203.136.95/viewdoc/summary?doi=10.1.1.672.8219>
- Scott, D., & Pisa, R. (1998). Can overall factory effectiveness prolong Moore's Law? *Solid State Technology*, 41(3), 10.
- Sharma, R., Singh, J., & Rastogi, V. (2018). The impact of total productive maintenance on key performance indicators (PQCDSM): a case study of automobile manufacturing sector. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 24(2), 267. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2018.091794>
- Sheu, D. D. (2006). Overall Input Efficiency and Total Equipment Efficiency. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 19(4), 496–501. <https://doi.org/10.1109/TSM.2006.884718>
- Singh, N., Sarngadharan, P. v., Prabir, ., Pal, K., Singh, N., Pal, P. K., & Sarngadharan, P. v. (2009). AGV scheduling for automated material distribution: a case study. *Journal of Intelligent Manufacturing 2009* 22:2, 22(2), 219–228. <https://doi.org/10.1007/S10845-009-0283-9>
- Souza, T. A., Roehe Vaccaro, G. L., & Lima, R. M. (2020). Operating room effectiveness: a lean health-care performance indicator. *International Journal of Lean Six Sigma*, 11(5), 987–1002. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2017-0141/FULL/PDF>

- Stainer, A. (1997). Logistics - A productivity and performance perspective. *Supply Chain Management*, 2(2), 53–62. <https://doi.org/10.1108/13598549710166104/FULL/PDF>
- Supriyanto, H., & Mokh, S. (2018). Performance evaluation using lean six sigma and overall equipment effectiveness: An analyzing tool. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(8), 487–495. https://www.researchgate.net/publication/327528710_Performance_evaluation_using_lean_six_sigma_and_overall_equipment_effectiveness_An_analyzing_tool
- Tang, H. (2019). A new method of bottleneck analysis for manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 19, 21–24. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2019.01.003>
- Tsarouhas, P. (2019). Improving operation of the croissant production line through overall equipment effectiveness (OEE). *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68(1), 88–108. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2018-0060>
- Tsarouhas, P. H. (2013). Equipment performance evaluation in a production plant of traditional Italian cheese. *International Journal of Production Research*, 51(19), 5897–5907. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.807373>
- Tsarouhas, P. H. (2019). Overall equipment effectiveness (OEE) evaluation for an automated ice cream production line. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 69(5), 1009–1032. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2019-0126>
- Villarroel Valdemoro, S., & Rubio Ferrer, J. (2012). *Gestión de pedidos y stock*. <https://books.google.es/books?id=1C8bAgAAQBAJ&lpg=PA1&dq=Gesti%C3%B3n%20de%20pedidos%20y%20stocks&hl=es&pg=PA6#v=onepage&q=Gesti%C3%B3n%20de%20pedidos%20y%20stocks&f=false>
- Williamson, R. M. (2006). *Using Overall Equipment Effectiveness: the Metric and the Measures*. <https://swspitcrew.com/wp-content/uploads/2018/01/OEE.pdf>
- Wudhikarn, R. (2012). Improving overall equipment cost loss adding cost of quality. *International Journal of Production Research*, 50(12), 3434–3449. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.587841>

-
- Wudhikarn, R., Chakpitak, N., & Neubert, G. (2018). A literature review on performance measures of logistics management: an intellectual capital perspective. *International Journal of Production Research*, 56(13), 4490–4520. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1431414>
- Yadav, P. K., Gupta, S., & Kumar, D. (2020). Measurement and analysis of performance of mining dump trucks. *International Journal of Vehicle Performance*, 6(2), 129–150. <https://doi.org/10.1504/IJVP.2020.106984>
- Zammori, F. (2015). Fuzzy Overall Equipment Effectiveness (FOEE): capturing performance fluctuations through LR Fuzzy numbers. *Production Planning & Control*, 26(6), 451–466. <https://doi.org/10.1080/09537287.2014.920545>