

Prototipo para la Generación de Reportes de Eficiencia General de Equipo en Ignition-Sepasoft bajo un Entorno de Transformación Digital Industrial

Oscar Amaury Rojas Alvarado; Miguel Fernando Urbano Muñoz; Karen Dayana Vidal Rivera
Universidad del Cauca, Colombia, orojas@unicauca.edu.co, mfurbano@unicauca.edu.co, kdvidal@unicauca.edu.co

Resumen— En el contexto de la Transformación Digital Industrial (TDI), la Efectividad General de los Equipos (OEE) se ha convertido en una métrica clave para evaluar la eficiencia de la producción. Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo para generar informes OEE utilizando el módulo OEE Downtime de Ignition y Sepasoft. El objetivo es automatizar el cálculo del OEE en un proceso industrial de envasado para líneas de producción de arroz, minimizando los errores de recopilación manual de datos y mejorando la toma de decisiones en tiempo real. El sistema propuesto integra la adquisición de datos en tiempo real, el seguimiento del tiempo de inactividad y el análisis de eficiencia, proporcionando una herramienta integral para el monitoreo del rendimiento de los equipos. Los resultados demuestran que el seguimiento automatizado del OEE mejora la visibilidad operativa, permitiendo a las empresas optimizar la producción y reducir las ineficiencias. La investigación reafirma la relevancia de los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) y las tecnologías de la Industria 4.0 para mejorar la productividad manufacturera y la toma de decisiones basada en datos.

Palabras clave-- — OEE, MES, Transformación Digital Industrial, eficiencia operacional.

I. INTRODUCCIÓN

La Cuarta Revolución Industrial, o Industria 4.0 (I4.0), representa un cambio radical en la gestión de operaciones productivas mediante la incorporación de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), análisis de datos en tiempo real, computación en la nube y automatización. Este paradigma busca optimizar la eficiencia operativa y la productividad, impulsando la transición hacia fábricas inteligentes capaces de adaptarse dinámicamente a las demandas del mercado y las condiciones cambiantes del entorno industrial [1], [2], [3].

En el contexto actual, la competitividad y sostenibilidad de las organizaciones dependen de su eficiencia operativa y capacidad de respuesta ante los desafíos del sector manufacturero. Pese a los avances en automatización y digitalización, muchas empresas siguen enfrentando barreras para integrar sistemas tecnológicos que permitan la monitorización y optimización continua de sus operaciones. La falta de plataformas integradas y de una infraestructura adecuada limita la toma de decisiones en tiempo real, afectando la productividad y la rentabilidad [4].

En este escenario, los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) actúan como un puente entre los niveles operativo y estratégico de la producción. Estos sistemas permiten recopilar, procesar y visualizar datos en tiempo real, facilitando un control más preciso de los procesos industriales. Al ofrecer trazabilidad detallada y mejorar la eficiencia operativa, los MES posibilitan una producción flexible y adaptable, garantizando altos estándares de calidad y reduciendo el desperdicio de recursos [5].

Uno de los indicadores clave de desempeño (KPI) más utilizados en la industria es la Efectividad Global del Equipo (OEE, por sus siglas en inglés), el cual evalúa la eficiencia de fabricación considerando tres factores fundamentales: disponibilidad, rendimiento y calidad. A través del análisis del OEE, es posible identificar cuellos de botella y áreas de mejora dentro del proceso productivo, lo que permite la implementación de estrategias para minimizar tiempos muertos, optimizar el uso de maquinaria y reducir defectos en los productos finales [6], [7].

En la Industria 4.0, el cálculo del OEE se potencia con la integración de MES y tecnologías emergentes, creando un ecosistema de mejora continua basado en automatización, análisis predictivo y decisiones basadas en datos. El software avanzado permite la recolección y análisis de datos en tiempo real, así como la optimización de procesos mediante machine learning e inteligencia artificial. Esto transforma la fabricación al mejorar la detección de problemas, la planificación de la producción y reducir los costos operativos [8].

Este artículo explora el uso del software Ignition junto con el módulo OEE Downtime de Sepasoft para desarrollar un prototipo funcional que automatice el cálculo del OEE en entornos de fabricación. Su objetivo es validar su efectividad en la optimización operativa, demostrando su aplicabilidad para empresas que buscan alinearse con la Industria 4.0 y la transformación digital industrial. De esta forma, se busca facilitar la toma de decisiones basada en datos, mejorar la eficiencia general de la producción y establecer un modelo tecnológico replicable para la mejora continua en el sector manufacturero.

II. EXPLORACIÓN CONCEPTUAL

La Transformación Digital en la Industria ha dado lugar a nuevos modelos de producción más eficientes y automatizados. En este contexto, la integración de tecnologías avanzadas permite optimizar procesos, mejorar la toma de decisiones y aumentar la competitividad en el sector fabricante. A continuación, se explorarán conceptos clave como la Transformación Digital Industrial, los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) y la Efectividad Global del Equipo (OEE), los cuales desempeñan un papel fundamental en la evolución de los sistemas productivos.

A. *Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) en entornos de Transformación Digital Industrial*

La Industria 4.0 (I4.0) representa la integración de tecnologías inteligentes para optimizar la fabricación de productos y servicios, agregando valor a la industria [9]. Para adaptarse a este paradigma, las empresas han evolucionado hacia la "Fábrica del Futuro", basada en tres pilares fundamentales: digitalización de la planta (software), estructura física (hardware) y optimización de procesos industriales [10], [11].

El desarrollo de la I4.0 ha sido impulsado por las demandas del mercado, promoviendo la automatización y la adopción de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT) y el Big Data [12]. Estas innovaciones permiten la interconectividad entre máquinas, procesos y sistemas de información, facilitando la toma de decisiones basada en datos y mejorando la eficiencia operativa. Además, favorecen la producción flexible, la personalización y la optimización de recursos para responder de manera ágil a las necesidades del mercado [8].

La digitalización y automatización no solo han transformado la manufactura, sino que también han impactado profundamente en la sostenibilidad y competitividad de las empresas. La capacidad de predecir fallas de manera anticipada, reducir desperdicios mediante un control más preciso de los procesos y optimizar el consumo energético a partir de datos en tiempo real se ha convertido en un factor diferenciador clave en la industria moderna [13]. Estas capacidades permiten no solo una operación más limpia y eficiente, sino también una respuesta más ágil ante las exigencias regulatorias y de mercado.

En este contexto, la Transformación Digital Industrial (TDI) surge como un proceso estratégico que integra tecnologías de Industria 4.0 con el fin de optimizar las operaciones, mejorar la eficiencia global y agregar valor sostenido a la producción [10]. No obstante, la TDI va más allá de la mera adopción de herramientas tecnológicas; implica una reconfiguración profunda de los modelos de negocio, la automatización inteligente de procesos críticos y la digitalización integral de toda la cadena productiva, desde el aprovisionamiento hasta la distribución. Todo ello, alineado plenamente con los principios de la Industria 4.0, busca no

solo aumentar la productividad, sino también generar ventajas competitivas duraderas basadas en datos, resiliencia operativa y mejora continua [14].

Sin embargo, su implementación enfrenta diversos desafíos que pueden limitar su éxito y alcance. Entre ellos destacan la resistencia al cambio por parte del personal, derivada de la falta de cultura digital o temor a la obsolescencia de competencias; la compleja integración con sistemas heredados (legacy systems), que a menudo operan bajo tecnologías propietarias o desconectadas; y los crecientes riesgos de ciberseguridad, ya que la interconexión de equipos, sensores y plataformas amplía significativamente la superficie de ataque ante posibles amenazas informáticas [14], [17].

Precisamente para superar estas barreras de integración y fragmentación tecnológica, los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) se presentan como una solución estratégica. Estos sistemas son plataformas informáticas diseñadas para monitorear, coordinar y controlar en tiempo real los procesos productivos dentro de una planta, los cuales funcionan como un enlace crítico entre los sistemas de planificación empresarial (ERP) y los sistemas de automatización y control (SCADA, PLC, entre otros), permitiendo así una comunicación fluida y una gestión unificada que reduce los problemas de interoperabilidad y mejora la visibilidad operativa [19].

Su implementación permite optimizar la producción mediante la asignación eficiente de recursos, supervisión de operaciones, control de calidad, trazabilidad y mantenimiento, lo que mejora la productividad y reduce costos [20]. Según Mantravadi et al., los principales aspectos clave en la implementación de MES incluyen trazabilidad, información en tiempo real, reducción del tiempo de cambio, coordinación de la cadena de suministro, análisis perimetral, estándares abiertos y la integración de equipos heredados [21].

Para estandarizar la integración entre los distintos niveles de automatización y gestión, el estándar ISA-95 define la comunicación entre los sistemas empresariales y los de producción. Un Sistema MES que acoja las buenas prácticas del estándar no solo mejora la eficiencia operativa y minimiza errores, sino que también permite la toma de decisiones estratégicas fundamentadas en datos en tiempo real [22], [23]. Además de optimizar los procesos internos, el MES facilita la adaptación de las industrias a las cambiantes demandas del mercado, mejora la trazabilidad a lo largo de toda la cadena productiva y posibilita una producción flexible sin comprometer la rentabilidad. En consecuencia, su evolución hacia soluciones más avanzadas —como aquellas integradas con inteligencia artificial, IoT y analítica predictiva— refuerza su papel como pilar fundamental en la transformación digital industrial [20], [23].

B. *Efectividad Total de los Equipos (OEE)*

El cálculo de la eficiencia en los procesos industriales ha sido una prioridad para las empresas a lo largo del tiempo,

permitiéndoles identificar y reducir pérdidas para mejorar su competitividad. Con el avance de la automatización, contar con métricas de rendimiento confiables se ha vuelto esencial [24]. En este contexto, los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) juegan un papel fundamental al proporcionar datos cuantificables para monitorear y optimizar la eficiencia operativa [6].

Los KPI en la manufactura permiten evaluar atributos medibles como el consumo de materiales y energía, el tiempo de operación de máquinas y operarios, la calidad del producto y la capacidad de respuesta ante fallos. Gracias a estos indicadores, las empresas pueden tomar decisiones estratégicas basadas en información precisa y en tiempo real [25]. Entre ellos, la Eficacia General del Equipo (OEE), propuesta por Seiichi Nakajima en 1988, es uno de los más relevantes.

El OEE evalúa la eficiencia de los equipos de producción a través de tres dimensiones clave:

- **Disponibilidad:** Relación entre el tiempo efectivo de operación y el tiempo planificado.
- **Rendimiento:** Comparación entre la producción real y la capacidad teórica del equipo.
- **Calidad:** Proporción de productos conformes respecto al total fabricado [26].

Un OEE del 85 % se considera un estándar de clase mundial, basado en una disponibilidad del 90 %, un rendimiento del 95 % y una calidad del 99 % [27]. Aunque un OEE del 100 % es prácticamente inalcanzable, su implementación permite reducir pérdidas, optimizar la producción y mejorar la toma de decisiones estratégicas dentro del marco de la Industria 4.0 y la Transformación Digital Industrial (TDI) [8].

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del prototipo, se empleará una metodología inspirada en el Ciclo de Hevner tal como se presenta en la Figura 1, lo que permitirá una exploración estructurada y sistemática de los requisitos del sistema de informes de OEE.



Figura 1. Metodología basada en el Ciclo de Hevner.

Este enfoque garantizará que el prototipo responda a las necesidades del entorno de Transformación Digital Industrial (TDI).

El desarrollo se organizará en tres etapas clave:

- **Relevancia:** Define los conceptos fundamentales para el cálculo del OEE dentro del contexto de la TDI, los parámetros y datos necesarios, así como los módulos MES que asegure que el prototipo aborde las necesidades industriales actuales.
- **Diseño:** Comprende el proceso de exploración, análisis y planificación necesario para la construcción del prototipo, estableciendo los requisitos, arquitectura tecnológica y la simulación para una base sólida en el desarrollo.
- **Rigor:** Implica la ejecución de pruebas de Aceptación en Fábrica (FAT, por sus siglas en inglés), además de la prueba de usabilidad basada en los principios de usabilidad de Jakob Nielsen; validando el correcto funcionamiento del prototipo y garantizando su fiabilidad operativa.

A. Relevancia

El desarrollo del prototipo se centró en implementar un sistema basado en Ignition, integrando el módulo OEE Downtime de Sepasoft para el cálculo y análisis del OEE en el proceso de empaque. A partir de una revisión bibliográfica previa, se analizaron diversas metodologías para la evaluación del OEE, y se realizó un proceso de selección basado en su aplicabilidad al contexto específico del empaque. Inicialmente, se consideraron múltiples enfoques, cada uno con diferentes ventajas y limitaciones en la medición del desempeño operativo. Entre ellos se evaluaron el Modelo Normativo de Miragliotta et al. [28], la Aritmética Difusa de Soltanali et al. [29] y la Teoría del OEE de Seiichi Nakajima [30], tomando como criterios su capacidad para representar con precisión la eficiencia del sistema y su alineación con los objetivos del estudio.

Aunque estos enfoques aportan perspectivas valiosas, presentan ciertas restricciones para su aplicación en este caso específico. Algunos incluyen factores irrelevantes para el proceso de empaque, otros carecen de métricas claras para evaluar la disponibilidad de los equipos, y varios no consideran de manera integral las causas de pérdida de eficiencia. En particular, los modelos tradicionales del OEE tienden a centrarse en aspectos mecánicos y estadísticos, sin contemplar adecuadamente las interrupciones operativas y organizativas que afectan la productividad.

En contraste, la metodología propuesta por Stadnicka et al. [31] se identificó como la más adecuada, gracias a su enfoque integral para identificar y clasificar las perturbaciones que afectan la eficiencia del proceso. A diferencia de otros modelos, este enfoque no solo considera los tres componentes clásicos del OEE (Disponibilidad, Rendimiento y Calidad), sino que también analiza el impacto de interrupciones en el flujo de producción, fallos en la maquinaria, problemas

organizativos y defectos en los productos. Otro aspecto clave que refuerza su selección es su aplicabilidad en entornos de producción Batch, como el proceso de empaque en estudio. Además, su estructura permite evaluar el efecto acumulativo de los factores negativos sobre la productividad general, lo que proporciona una visión más realista y completa del desempeño del sistema.

A partir de este método, los datos del OEE se asignan estratégicamente a las distintas etapas del proceso de empaque, organizadas en cuatro células de trabajo: Llenado de bolsas, Etiquetado de bolsas, Control de Calidad y Paletizado (Ver Tabla 1).

TABLA 1.
PARÁMETROS Y DATOS UTILIZADOS EN EL PROCESO PARA EL CÁLCULO DEL OEE.

PARÁMETROS DEL OEE	DATOS PARA TENER EN CUENTA
DISPONIBILIDAD	-Falla del equipo. -Fallo del software en producción equipo. -Fallo de periférico. -Error de medios. -Parada posterior en flujo de salida de máquina. -Pausas y descansos no planificados y microrrupturas.
RENDIMIENTO	-Tiempo de espera para producto entrante o material. -Pérdida de velocidad. -Puesta en marcha.
CALIDAD	- Puesta en marcha. -Chatarra o producto no conforme. -Error humano. -Reprogramación.

Para el desarrollo del prototipo, se optó por utilizar Ignition en conjunto con los módulos MES y OEE Downtime de Sepasoft, herramientas ampliamente reconocidas en la industria por su capacidad para supervisar, analizar y optimizar procesos productivos. Con el fin de garantizar su idoneidad para el sistema de empaque, se realizó un análisis exhaustivo de sus funcionalidades y alcances.

El módulo OEE Downtime permite calcular la Efectividad General de los Equipos (OEE) mediante la evaluación de la disponibilidad, el rendimiento y la calidad del sistema. Asimismo, ofrece herramientas avanzadas para identificar y reducir tiempos improductivos, lo que contribuye directamente a mejorar la eficiencia operativa del proceso de empaque [33]. Por su parte, el módulo MES facilita la administración de

datos esenciales del proceso productivo, permitiendo la recolección, el almacenamiento y el análisis de información en tiempo real. Su integración con Ignition proporciona una plataforma centralizada para el seguimiento del desempeño del sistema, garantizando un control preciso y el desarrollo de estrategias de mejora continua [32].

Para la construcción del prototipo, se emplearon cuatro componentes fundamentales, cada uno con un propósito específico dentro del sistema:

- *Perspective*: Se empleó para desarrollar la interfaz gráfica de usuario, la cual permite visualizar en tiempo real los datos clave del proceso de empaque. Gracias a esta herramienta, los operadores pueden monitorear el estado del sistema, consultar métricas de OEE, identificar tiempos de inactividad y recibir alertas sobre eventos críticos. Además, su capacidad de acceso remoto facilita la supervisión desde cualquier dispositivo con conexión a internet.
- *Módulo OEE Downtime*: Se utilizó para el cálculo automático de la eficiencia operativa del sistema de empaque. Mediante la evaluación de los parámetros de disponibilidad, rendimiento y calidad, este módulo proporcionó información clave sobre los tiempos improductivos y las causas de las paradas del sistema. A partir de estos datos, fue posible identificar cuellos de botella y tomar medidas orientadas a optimizar la producción.
- *Módulo MES*: Se encargó de la gestión y almacenamiento de los datos del proceso de empaque, permitiendo un seguimiento preciso de la producción en tiempo real. Este módulo facilitó la generación de reportes detallados, el análisis de tendencias y la trazabilidad de los lotes de producción, lo que contribuyó a mejorar la toma de decisiones y la eficiencia global del sistema.

Gracias a la integración de estos cuatro componentes, el prototipo desarrollado logró proporcionar una plataforma robusta para el monitoreo y optimización del proceso de empaque.

B. Diseño.

Para garantizar el correcto desarrollo del prototipo, se cumplieron ciertos requisitos de usuario, los cuales establecen las condiciones mínimas de funcionamiento del sistema. Estos requisitos se muestran a continuación:

1. El sistema desarrollado debe estar en inglés.
2. El sistema debe tener todas las configuraciones, programaciones y simulaciones a nivel de interfaz para permitir el funcionamiento integral de la solución MES.
3. El sistema debe realizar cálculos de desempeño (OEE) de la línea de producción.
4. El sistema debe generar reportes automáticos de desempeño de la producción (OEE).

5. El sistema debe simular la lectura de órdenes de producción, debido a que no se contará con una conexión real a un ERP.
6. El usuario debe poder visualizar los reportes de desempeño y tener la opción de agregar filtros.

Para la implementación del prototipo, se partió de una definición detallada de las variables clave y los parámetros establecidos en la etapa de planificación, asegurando que cada celda de la línea —Filler, Sealer y Palletizer— contara con tags específicos para entradas, salidas, rechazos, estados y metas de producción. Estos datos alimentaron las expresiones necesarias para el cálculo automático de los tres componentes fundamentales del OEE: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad.

En cuanto a la arquitectura técnica, se contempló la instalación y configuración de un motor de base de datos *MySQL 8.0*, creado y gestionado mediante *MySQL Workbench*, el cual se integró como proveedor de datos en el Ignition Gateway a través del *JDBC Driver 4.2*. Posteriormente, dentro del *Designer*, esta base de datos se definió como predeterminada, garantizando que todos los scripts y componentes consumieran la información de forma centralizada y segura, tal como se muestra en la Figura 2.

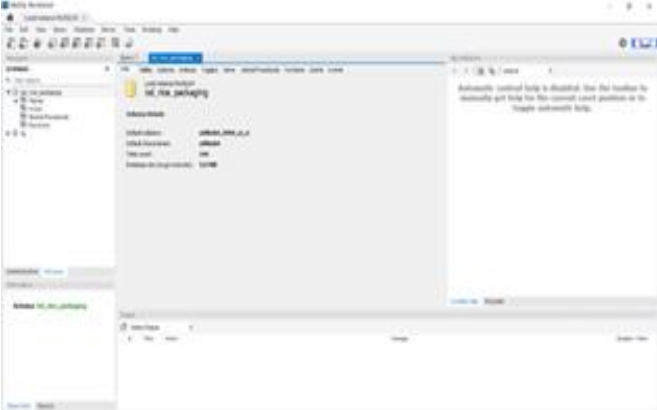


Figura 2. Creación y Configuración de la base de datos

La instalación del módulo OEE Downtime de Sepasoft permitió crear una jerarquía detallada de equipos dentro del sistema, así como definir de manera estructurada los distintos modos y estados operativos que intervienen en el proceso productivo, tal como se observa en la figura 3. En este esquema, cada celda del proceso fue configurada con modos de operación específicos —Production, Idle o Maintenance— junto con estados complementarios como Running, Blocked o Planned Downtime, según se muestra en la figura 4. Esta configuración facilitó el registro automático de paros, diferenciando claramente los planificados (mantenimientos o cambios de formato) de los no planificados (averías o faltas de material), lo que permitió una trazabilidad precisa de las pérdidas de disponibilidad.

El Palletizer se estableció como Key Cell (celda clave), actuando como referencia central para consolidar los valores

de toda la línea, aspecto fundamental para obtener resultados coherentes y estandarizados durante las simulaciones.

Sepasoft Inc.

View Certificate

Name	Version	Description	License	State	More	Restart
Batch Procedure	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) A module that provides batch and procedure functionality.	Total	Running	More	Restart
Document Management	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) A module that provides document management and procedural integration with the Design Time module.	Total	Running	More	Restart
DPP Downstream	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) A module that provides DPP and downstream functionality with task routing.	Total	Running	More	Restart
Production	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) Core module required for all Sepasoft software. It is the core of the system and provides the core functionality for the system.	Total	Running	More	Restart
SPC	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) A module that provides SPC functionality.	Total	Running	More	Restart
Trace	3.0.1.1.1 (3/2025/04/21)	(SP4) A module that provides trace and trace functionality.	Total	Running	More	Restart

Figura 3. Instalación de módulos (OEE Downtime)



Figura 4. Configuración de estados para el proceso

Dentro de la jerarquía, se verificó que cada entidad cumpliera su rol mediante los tags asociados, asegurando la coherencia del flujo de datos. Durante la ejecución de las pruebas, se comprobó que los *Reason Codes* impactaran directamente en el cálculo de Disponibilidad y Rendimiento, validando así la precisión de la lógica implementada. Lo anterior se realizó mediante la configuración del Gateway Timer para la simulación del proceso de empacado, tal como se muestra en la Figura 5.

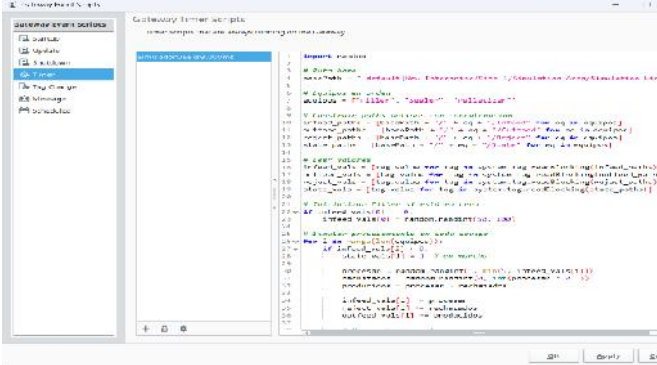


Figura 5. Configuración del Gateway Timer para la simulación del proceso de empacado

Se configuraron tablas MES específicas, como la *Material List Table*, en la que se definieron tres presentaciones de bolsas de arroz (500, 1000 y 3000 gramos) para simular la variedad de productos procesados, tal como se ilustra en la Figura 6.

Paralelamente, se utilizó la MES Work Order Table para crear, registrar y gestionar órdenes de trabajo simuladas, vinculadas directamente a las metas de producción de cada celda.

Figura 6. Material List Table.

Los scripts ejecutados desde el Gateway Timer automatizaron la actualización de valores, mientras que los scripts de control sincronizaron la cantidad producida con la meta definida en cada orden. Esta automatización garantizó que la simulación se comportara como un proceso real, generando datos válidos para alimentar los cálculos del OEE.

Para presentar los resultados de forma clara y dinámica, se desarrolló un Dashboard de Indicadores en Ignition Perspective. Este tablero muestra en tiempo real los valores de Disponibilidad, Rendimiento, Calidad y OEE consolidado, mediante gráficos tipo Gauge que cambian de color según rangos preestablecidos, basados en la Clasificación Empresarial del OEE. Durante la simulación, se verificó que los indicadores respondieran adecuadamente a las fluctuaciones generadas por los valores aleatorios, mostrando en todo momento datos coherentes, tal como se aprecia en la figura 7.

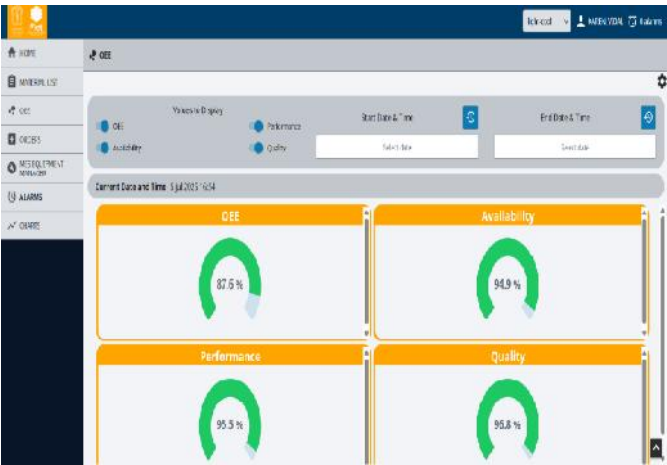


Figura 7. Gráficos de Gauge para valores de OEE.

Adicionalmente, se implementó un módulo de alarmas configurado para dispararse cuando los valores del OEE ingresaban en rangos críticos. Las alarmas se visualizaron junto con *timestamp* y criticidad, validando así el correcto funcionamiento de la lógica de notificación ante eventos no deseados.

La fase de pruebas funcionales demostró que la estructura de datos, la jerarquía de equipos y la configuración de indicadores funcionan de forma integrada y precisa. Los valores calculados se actualizaron correctamente, se almacenaron en la base de datos MySQL y se visualizaron mediante gráficas en el módulo Charts, mostrando tendencias históricas y estadísticas clave (mínimo, máximo, promedio). La selección del *Palletizer* como *Key Cell* permitió consolidar la eficiencia global de la línea, mientras que cada celda (Filler, Sealer y Palletizer) mostró sus métricas individuales, validando la coherencia del modelo, lo cual se presenta en la Figura 8.

Component	Value
Filler	
_prevOutfeed	0
Infeed	34
OrdenDone	
Outfeed	378
Reject	193
RemainingUnits	null
State	1
TargetQuantity	100
Palletizer	
Infeed	0
Outfeed	74
Reject	111
State	1
Sealer	
Infeed	3
Outfeed	187
Reject	0
State	1

Figura 8. Simulación del Proceso de Empacado en el Gateway Timer.

En conjunto, la implementación técnica desarrollada, sumada al análisis de alarmas y tendencias obtenidas durante las simulaciones, confirma que el prototipo cumple cabalmente con los objetivos propuestos. El sistema no solo demuestra su capacidad para calcular y desglosar el OEE en sus tres componentes fundamentales (Disponibilidad, Rendimiento y Calidad), sino que también proporciona información valiosa sobre las causas de pérdidas de eficiencia, permitiendo una comprensión más profunda del comportamiento del proceso de empaque.

Asimismo, los resultados y valores históricos de la Figura 9 evidencian que la arquitectura implementada con Ignition y los módulos MES y OEE Downtime de Sepasoft es altamente escalable y adaptable a nuevos requerimientos productivos. La flexibilidad de la solución permite incorporar líneas adicionales, modificar parámetros operativos o ampliar la lógica de análisis sin comprometer la estabilidad del sistema. De esta forma, el prototipo no solo valida su funcionamiento en un entorno simulado, sino que sienta las bases sólidas para una posible integración futura en un entorno industrial real, garantizando un monitoreo confiable, continuo y en tiempo real del desempeño de los equipos de producción.

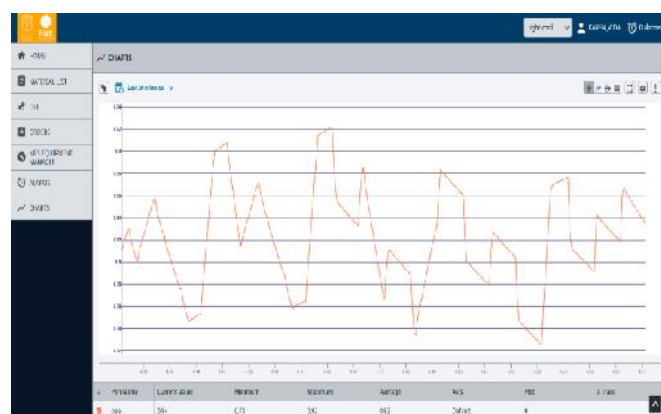


Figura 9. Gráficos y valores históricos del OEE.

C. Rigor.

Se llevaron a cabo Pruebas de Aceptación en Fábrica (FAT) para verificar el cumplimiento de los requisitos y pruebas de usabilidad basadas en los principios de Jakob Nielsen para evaluar la experiencia del usuario en la interfaz de Perspective. Durante estas pruebas, se comprobó que el sistema cumpliera con los requisitos establecidos y operara de manera eficiente dentro del entorno MES. Se evaluaron aspectos clave como la recopilación y procesamiento de datos, el cálculo del OEE, la generación automatizada de informes y la usabilidad de la interfaz en Perspective.

Para evaluar la experiencia del usuario con la interfaz desarrollada en Perspective, se llevaron a cabo pruebas de usabilidad basadas en las heurísticas de Jakob Nielsen. Estas pruebas permitieron identificar posibles problemas de navegación, interacción y diseño, asegurando que el sistema fuera intuitivo y fácil de usar.

Los resultados de estas pruebas permitieron detectar oportunidades de mejora en la interfaz y realizar ajustes necesarios antes de su implementación final. En general, la evaluación confirmó que la plataforma proporciona una experiencia de usuario clara y eficiente, facilitando la supervisión y gestión del sistema MES.

IV. RESULTADOS

Para evaluar la funcionalidad y usabilidad del prototipo desarrollado, se implementó la tercera versión del cuestionario de James R. Lewis, conocido como el Post-Study System Usability Questionnaire (PSSUQ). Este cuestionario está diseñado para medir la percepción de los usuarios sobre la calidad del sistema después de su interacción con él, proporcionando información clave sobre su facilidad de uso, eficiencia y nivel de satisfacción general. A través de esta evaluación, se buscó identificar posibles áreas de mejora y validar que la interfaz desarrollada en Perspective cumpliera con los estándares de usabilidad requeridos, garantizando una experiencia óptima para el usuario [34].

El Post-Study System Usability Questionnaire (PSSUQ) es una prueba diseñada para evaluar la experiencia de los usuarios después de interactuar con un sistema. Consta de 16 preguntas agrupadas en tres categorías principales:

- Calidad del sistema (eficiencia y facilidad de uso).
- Calidad de la información (claridad y utilidad de los datos proporcionados).
- Calidad de la interfaz (diseño y presentación visual).

Los participantes responden utilizando una escala Likert de 7 puntos, donde 1 representa una experiencia altamente positiva (muy de acuerdo) y 7 indica una experiencia negativa (muy en desacuerdo). Además, se incluye la opción "No aplica" para aquellos casos en los que una pregunta no sea relevante para el usuario.

El resultado final se obtiene promediando las respuestas, lo que permite identificar la percepción general del sistema. Un puntaje bajo indica una alta usabilidad y satisfacción, mientras que un puntaje alto sugiere la necesidad de mejoras en la interfaz o el funcionamiento del sistema.

El cuestionario se compone de 16 ítems, que se agrupan en cuatro puntuaciones principales:

- *Puntuación general (Overall Score)*: Se obtiene promediando las respuestas de los 16 ítems. Representa la satisfacción general del usuario con el sistema [34].
- *Calidad del sistema (System Quality - SysQual)*: Se calcula promediando los ítems 1 al 6. Evalúa la facilidad de uso, eficiencia y efectividad del sistema [34].
- *Calidad de la información (Information Quality - InfoQual)*: Se calcula promediando los ítems 7 al 12. Mide la claridad, utilidad y presentación de la información proporcionada por el sistema [34].
- *Calidad de la interfaz (Interface Quality - IntQual)*: Se calcula promediando los ítems 13 al 15. Evalúa la facilidad de navegación e interacción con la interfaz del sistema [34].

Para validar la usabilidad del prototipo desarrollado, se realizó una prueba piloto con la participación dos ingenieros

expertos y nueve ingenieros junior, quienes evaluaron el sistema bajo condiciones simuladas de operación. Los resultados promedios de cada dimensión fueron calculados aplicando la fórmula base del PSSUQ, permitiendo consolidar una medida representativa del desempeño percibido por los usuarios:

$$\text{Promedio Respuesta} = \frac{\sum \text{Respuestas Individuales}}{\text{Total Participantes}} \quad (1)$$

Por otra parte, con base en los resultados individuales recolectados, se calcularon los promedios específicos para cada subescala del cuestionario, lo cual permitió obtener valores representativos de cada dimensión evaluada. Este cálculo se realizó siguiendo la metodología del instrumento PSSUQ, aplicando la fórmula de promedio para cada categoría.

$$\text{Promedio Subescala} = \frac{\sum \text{Promedio Respuestas}}{\text{Número de ítems}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se muestran los resultados obtenidos, los cuales reflejan la percepción de los usuarios en cuanto a la utilidad del sistema, la calidad de la información presentada, la calidad de la interfaz y la satisfacción general con la experiencia de uso.

A. System Usefulness (Sysuse Average) Items 1–6

Esta subescala evalúa en qué medida el sistema resulta útil y facilita la realización de tareas clave. Los resultados obtenidos para la subescala evidencian una percepción general positiva por parte de los participantes. En la Figura 10 se observa que los promedios de las respuestas individuales para cada ítem oscilan entre 1,182 y 1,364, manteniéndose consistentemente en rangos cercanos a 1, lo cual indica un alto nivel de acuerdo con la afirmación de que el sistema es útil para los propósitos para los cuales fue diseñado.

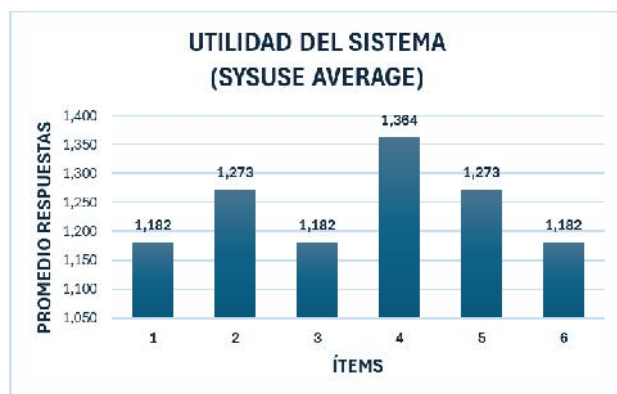


Figura 10. Resultados Obtenidos para la Subescala Sysuse Average.

El ítem con mayor promedio corresponde al cuarto ítem – “Me sentí cómodo usando este sistema”- (1,364), lo que sugiere que, aunque en general la percepción es favorable, este

aspecto específico podría beneficiarse de un análisis detallado para identificar mejoras puntuales.

B. Information Quality (Infoqual Average) Items 7–12.

Esta dimensión refleja la percepción de los usuarios sobre la claridad, precisión y suficiencia de la información generada por el prototipo. Los resultados asociados a la subescala Calidad de la Información presentados en la Figura 11 evidencian una percepción mixta por parte de los usuarios en cuanto a la utilidad, claridad y organización de la información ofrecida por el sistema. La gráfica muestra promedios individuales que oscilan entre 1,182 y 7,000, reflejando una notable variabilidad en la evaluación de los ítems.

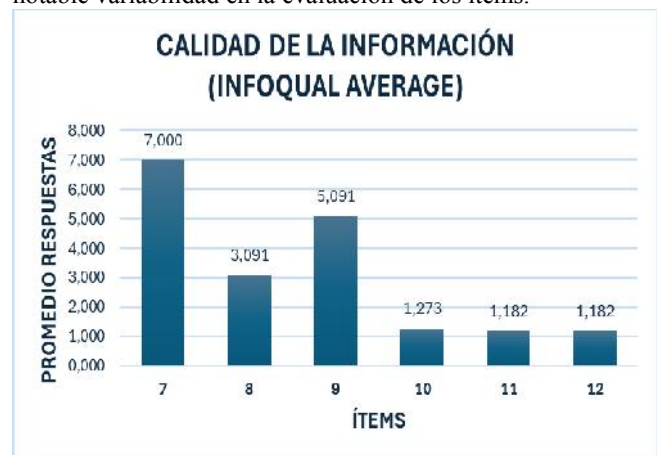


Figura 11. Resultados Obtenidos para la Subescala Infoqual Average.

El ítem 7 - “El sistema mostró mensajes de error que indicaron claramente cómo solucionar los problemas”- obtuvo el promedio más alto (7,0), lo que evidencia que los usuarios perciben que esta funcionalidad no está implementada o no aplica, ya que no recibieron mensajes de error útiles durante la interacción con el prototipo. De forma similar, el ítem 9 - “La información proporcionada por el sistema (como ayuda en línea, mensajes en pantalla y otra documentación) fue clara”- alcanzó un valor elevado (5,091), lo que sugiere que los usuarios identificaron la ausencia de ayudas contextuales o documentación complementaria dentro de la interfaz, limitando la orientación disponible para resolver dudas o comprender mejor ciertas funciones del sistema.

En contraste, los ítems 10, 11 y 12 presentan los promedios más bajos (1,273; 1,182 y 1,182, respectivamente), lo que refleja un alto nivel de conformidad respecto a la organización, claridad y utilidad de la información para resolver errores o dudas.

C. Interface Quality (Intqual Average) Items 13–15.

Los resultados de esta subescala que se muestran en la Figura 12 confirman la percepción positiva sobre la

organización, la presentación visual y la navegabilidad de la interfaz desarrollada.

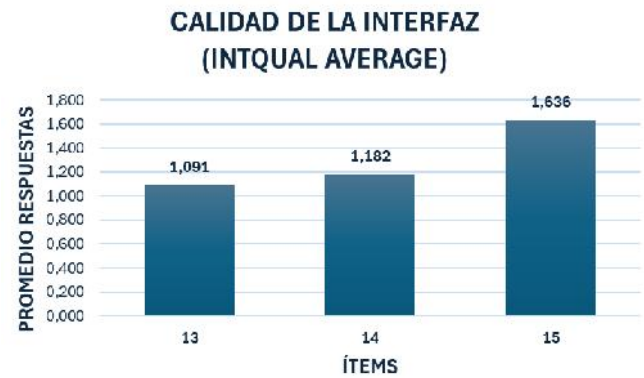


Figura 12. Resultados Obtenidos para la Subescala Intqual Average.

En particular, se observa que los usuarios valoraron satisfactoriamente la disposición de los elementos y la facilidad de navegación del prototipo. La gráfica muestra promedios individuales que oscilan entre 1,091 y 1,636, lo que indica un nivel de conformidad general alto. No obstante, los ítems 13 —“La interfaz de este sistema era agradable” (donde se aclara que la interfaz incluye elementos como teclado, mouse, micrófono y pantallas, junto con sus gráficos y lenguaje)— y 14 —“Me gustó usar la interfaz de este sistema”— presentaron los promedios más bajos, con valores de 1,091 y 1,182 respectivamente. Estos resultados reflejan un alto nivel de conformidad en cuanto a la claridad visual y la estructura general de la interfaz, aunque sugieren oportunidades de mejora en la experiencia estética y subjetiva del usuario.

El ítem 15 —“Este sistema tiene todas las funciones y capacidades que espero que tenga”— alcanzó un promedio de 1,636, ligeramente superior al del resto de los ítems. Este resultado podría sugerir oportunidades de mejora en aspectos específicos, como la organización de los menús, la capacidad de respuesta (responsividad) o la disposición de los elementos gráficos en pantalla.

No obstante, la media global de esta subescala, situada en torno a 1,3, reafirma una percepción positiva general de la experiencia visual, respaldando la idoneidad del diseño gráfico y la coherencia entre los elementos desplegados. Esta retroalimentación valida la efectividad de la interfaz desarrollada en Perspective, consolidándola como un entorno amigable y funcional para supervisar y analizar indicadores de OEE, lo que aporta un valor significativo a la experiencia del usuario final.

D. Overall Average Items 1–16.

El promedio consolidado de todos los ítems, presentado en la Figura 13, alcanzó un valor de 1,955, lo que reafirma que, en términos generales, el prototipo es percibido como una

herramienta funcional, clara y fácil de utilizar. Esta tendencia general respalda la pertinencia de la arquitectura técnica y visual implementada con Ignition y Sepasoft MES. Aunque se identificaron aspectos puntuales susceptibles de mejora — como la inclusión de mensajes de error y ayudas contextuales—, la valoración global obtenida respalda el uso del prototipo como base sólida para una futura implementación en entornos industriales reales.

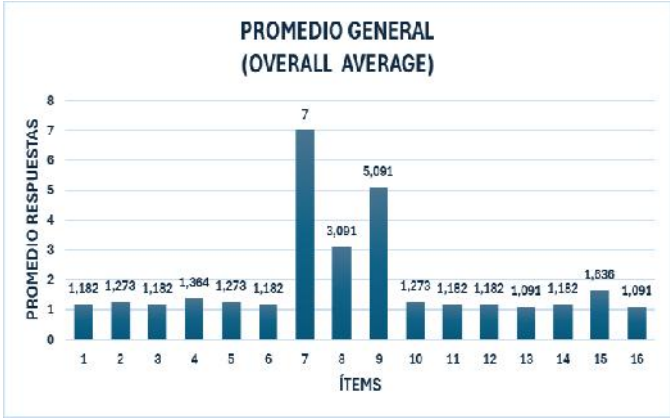


Figura 13. Resultados Generales obtenidos.

Los valores obtenidos en cada subescala del PSSUQ, presentados en la Figura 14, validan la funcionalidad y el aporte práctico del prototipo como una solución digital para el monitoreo del OEE. La sólida integración entre Ignition y Sepasoft MES permitió desarrollar un sistema flexible, escalable y adaptable a entornos productivos reales, que facilita de forma automatizada la recolección, el cálculo y la visualización de indicadores clave de desempeño.



Figura 14. Resultados obtenidos por subescalas.

Los resultados obtenidos confirman diversas fortalezas del prototipo, entre las que destacan la utilidad general del sistema, la calidad visual de la interfaz desarrollada en Perspective y la facilidad de interacción por parte de los usuarios. Estos aspectos reflejan que la solución logra cumplir con los objetivos fundamentales de monitoreo y análisis del OEE en un entorno intuitivo y accesible.

Asimismo, se identificaron oportunidades claras para enriquecer la calidad de la información presentada, tales como la incorporación de mensajes de ayuda contextuales, tooltips explicativos y documentación complementaria integrada en la interfaz. Estos elementos permitirían orientar mejor al usuario durante la interpretación de los indicadores y la navegación del sistema.

De esta forma, los hallazgos obtenidos no solo validan el desempeño actual del prototipo, sino que también sientan las bases para iterar mejoras futuras orientadas a garantizar una experiencia de usuario cada vez más completa, intuitiva y alineada con las necesidades del entorno industrial.

V. CONCLUSIONES

El presente artículo adquiere una relevancia significativa en el contexto de la transformación digital industrial, al demostrar cómo la integración de herramientas accesibles como Ignition y el módulo OEE Downtime de Sepasoft permite automatizar el cálculo del OEE en entornos de manufactura, incluso en etapas de simulación. Esta capacidad resulta especialmente valiosa en un escenario donde muchas empresas aún dependen de métodos manuales o herramientas ofimáticas básicas para estimar su eficiencia operativa, lo que introduce errores, retrasos y subjetividad en la toma de decisiones. Al ofrecer una alternativa tecnológica funcional desde una fase temprana de diseño, el estudio demuestra que es posible reducir la brecha entre los entornos de prueba y las condiciones reales de operación.

Más allá del desarrollo técnico, este trabajo aporta un modelo replicable y escalable que puede ser adoptado por pequeñas y medianas empresas que buscan iniciar su transición hacia la Industria 4.0 sin realizar inversiones elevadas en infraestructura. La elección de Ignition como plataforma de desarrollo —basada en licenciamiento por servidor y no por etiqueta o dispositivo— reduce significativamente las barreras económicas de entrada, mientras que el módulo OEE Downtime de Sepasoft proporciona una capa funcional especializada que acelera la implementación sin necesidad de desarrollar lógica desde cero. Esta combinación resulta especialmente atractiva para entornos productivos con recursos técnicos y financieros limitados.

Asimismo, la evaluación de usabilidad basada en las heurísticas de Jakob Nielsen y el uso del cuestionario PSSUQ (Post-Study System Usability Questionnaire) constituyen un enfoque metodológico riguroso que integra tanto la validación funcional como la experiencia del usuario, aspecto frecuentemente descuidado en desarrollos industriales tradicionales. Mientras que gran parte de la literatura técnica se centra en indicadores de desempeño —como disponibilidad, rendimiento o calidad—, este estudio reconoce que la adopción efectiva de cualquier sistema MES depende también de la percepción, la curva de aprendizaje y la satisfacción de los operadores y supervisores que interactúan diariamente con la herramienta. Incorporar esta dimensión humana permite no

solo identificar oportunidades de mejora tempranas, sino también anticipar posibles resistencias al cambio.

De esta forma, la investigación no solo resuelve una necesidad práctica de monitoreo de eficiencia —como lo es el cálculo automatizado del OEE—, sino que establece un precedente metodológico y tecnológico para futuras implementaciones centradas en el usuario, la interoperabilidad y la mejora continua en entornos productivos reales. El prototipo desarrollado actúa como un puente entre la simulación controlada y la validación en campo, ofreciendo una base sólida sobre la cual construir soluciones industriales de mayor escala, profundidad analítica y rigurosidad estadística. En consecuencia, este trabajo invita a continuar explorando líneas de investigación que combinen métricas objetivas de eficiencia con evaluaciones subjetivas de usabilidad, cerrando así el ciclo entre la tecnología, el dato y las personas que operan los sistemas de producción.

REFERENCES

- [1] M. Ko, C. Lee y Y. Cho, "Design and Implementation of Cloud-Based Collaborative Manufacturing Execution System in the Korean Fashion Industry," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 18, 2022.
- [2] W. Sardjono, I. R. M. Arum, A. Rahmasari, and E. Lusia, "Impact of Track and Trace (T&T) in Industrial Revolution 4.0 of the Pharmaceutical Industry (Pharma 4.0)," in *E3S Web of Conferences*, vol. 388, EDP Sciences, 2023.
- [3] V. V. Martynov, D. N. Shavaleeva, and A. A. Zaytseva, "Information Technology as the Basis for Transformation into a Digital Society and Industry 5.0," in *2019 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, pp. 539–543, 2019.
- [4] H. Petri and V. V. Thai, "Logistics 4.0 – digital transformation with smart connected tracking and tracing devices," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 275, p. 109336, 2024.
- [5] K. Wang, P. Liu, A. Zhao, Q. Zhang, L. Wang, Y. Xue, X. Gao, and D. Gao, "Development and application of MES based on cloud platform for steel structure enterprises," in *Proc. 2019 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. (IEEM)*, pp. 521–525, 2019.
- [6] O. Witzel, S. Wilm, D. Karimanzira, and D. Baganz, "Controlling and regulation of integrated aquaponic production systems – An approach for a management execution system (MES)," *Inf. Process. Agric.*, vol. 6, no. 3, pp. 326–334, 2019.
- [7] K. He, H. Li, H. Cao, E. Chen, and D. Huang, "An intelligent identification approach of overall equipment effectiveness for machine tool based on power information," *J. Chongqing Univ.*, vol. 45, no. 9, pp. 39–50, 2022.
- [8] M. B. Maulana and D. Widyaningrum, "Analysis of the Effectiveness of Automatic Lathes Using the OEE and FMEA Methods," *Adv. Sustain. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, 2023.
- [9] V. V. Martynov, D. N. Shavaleeva, and A. A. Zaytseva, "Information Technology as the Basis for Transformation into a Digital Society and Industry 5.0," in *2019 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, pp. 539–543, 2019.
- [10] B. S. Chohan, X. Xu, and Y. Lu, "MES Dynamic interoperability for SMEs in the Factory of the Future perspective," *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 1329–1335, 2022.
- [11] H. Ullah, M. Uzair, Z. Jan, and M. Ullah, "Integrating industry 4.0 technologies in defense manufacturing: Challenges, solutions, and potential opportunities," *Array*, vol. 23, p. 100358, 2024.
- [12] R. Yusianto, Marimin, Suprihatin, and H. Hardjomidjojo, "Intelligent Spatial Logistics DSS for tracking and tracing in horticultural food

- security,” in 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic), pp. 1–5, 2019.
- [13] H. Cañas, J. Mula, M. Díaz-Madroñero, and F. Campuzano-Bolarín, “Implementing Industry 4.0 principles,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 158, p. 107379, 2021.
- [14] K. Duraivelu, “Digital transformation in manufacturing industry – A comprehensive insight,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 68, pp. 1825–1829, 2022.
- [15] C. Hu, J. Lu, K. Ben, W. Cao, and L. Zhang, “Research and Application of Key Technologies for Development and Integration of Multi-Tenant Discrete MES,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, pp. 337–341, 2020.
- [16] L. Budde, C. Benninghaus, R. Hänggi, and T. Friedli, “Managerial practices for the digital transformation of manufacturers,” *Digital*, vol. 2, no. 4, pp. 463–483, 2022.
- [17] M. F. Ahmad, N. A. A. Husin, A. N. A. Ahmad, H. Abdullah, C. S. Wei, and M. N. M. Nawawi, “Digital Transformation: An Exploring Barriers and Challenges Practice of Artificial Intelligence in Manufacturing Firms in Malaysia,” *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 110–117, 2022.
- [18] T. Gigova, K. Valeva, and V. Nikolova-Alexieva, “Digital Transformation – Opportunity for Industrial Growth,” in 2019 International Conference on Creative Business for Smart and Sustainable Growth (CREBUS), pp. 1–4, 2019.
- [19] R. Addo-Tenkorang, N. Gwangwava, E. N. Ogunmuyiwa, and A. U. Ude, “Advanced animal track-&-trace supply-chain conceptual framework: An internet of things approach,” in *Procedia Manufacturing*, vol. 30, Elsevier B.V., pp. 56–63, 2019.
- [20] S. Mantravadi and C. Møller, “An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0?,” in *Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 588–595, 2019.
- [21] S. Mantravadi, J. S. Srai and C. Møller, “Application of MES/MOM for Industry 4.0 supply chains: A cross-case analysis,” *Computers in Industry*, vol. 148, 2023.
- [22] A. Lobov and K. R. Haapala, “Towards sustainable manufacturing by extending Manufacturing Execution System functions,” 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 1329–1335, 2019.
- [23] S. Mantravadi, C. Møller, C. Li and R. Schnyder, “Design choices for next-generation IIoT-connected MES/MOM: An empirical study on smart factories,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 73, 2022.
- [24] N. Stricker, M. Micali, D. Dornfeld, and G. Lanza, “Considering Interdependencies of KPIs – Possible Resource Efficiency and Effectiveness Improvements,” *Procedia Manuf.*, vol. 8, pp. 300–307, 2017.
- [25] S. Dewi, J. Alhilman and F. T. D. Atmaji, “Evaluation of Effectiveness and Cost of Machine Losses using Overall Equipment Effectiveness (OEE) and Overall Equipment Cost Loss (OECL) Methods, a case study on Toshiba CNC Machine,” in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 847, no. 1, Institute of Physics Publishing, 2020.
- [26] C. G. Schmidt and S. M. Wagner, “Blockchain and supply chain relations: A transaction cost theory perspective,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 25, no. 4, p. 100552, 2019.
- [27] C. F. Liew, J. Prakash, and K. S. Ong, “Equipment cost efficiency: A comprehensive metric for evaluating operational and financial performance in manufacturing,” *Manufacturing Letters*, vol. 39, pp. 16–19, 2024.
- [28] G. Miragliotta, A. Sianesi, E. Convertini, and R. Distanti, “Data driven management in Industry 4.0: a method to measure Data Productivity,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 19–24, 2018.
- [29] H. Soltanali, M. Khojastehpour, and J. Torres Farinha, “Measuring the production performance indicators for food processing industry,” *Measurement*, vol. 173, p. 108394, 2021.
- [30] Hendri, M. Kholil, B. Hanum, and A. A. Hidayat, “Measurement of the Overall Equipment Effectiveness (OEE) and the Process Improvement on Radiator Crimping Line,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1529, no. 4, 2020.
- [31] D. Stadnicka and K. Antosz, “Overall equipment effectiveness: Analysis of different ways of calculations and improvements,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, A. Hamrol, O. Ciszak, S. Legutko, y M. Jurczyk, Eds. Springer Heidelberg, pp. 45–55, 2018.
- [32] Introducing ignition. Inductiveautomation.com. Recuperado de: <https://www.docs.inductiveautomation.com/docs/8.1/getting-started/introducing-ignition>.
- [33] OEE Downtime - maximize manufacturing effectiveness. (2018, marzo 9). Sepasoft.com; Sepasoft MES Solutions. Recuperado de: <https://www.sepasoft.com/products/oeo-downtime-tracking/>
- [34] J. Sauro and J. R. Lewis, “Standardized usability questionnaires,” in *Quantifying the User Experience (2nd ed.)*, J. Sauro and J. R. Lewis, Eds. Morgan Kaufmann, pp. 185–248, 2016.