

## Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial

### Calculation of the Overall Equipment Effectiveness (OEE) Based on the Digital Twin Concept under an Industrial Digital Transformation Environment

Oscar Amaury Rojas Alvarado <sup>a</sup>, Johan Felipe Benavidez <sup>b</sup>, Wilmer Pascuas <sup>c</sup>

Departamento de Electrónica Instrumentación y Control, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia

<sup>a</sup> [orojas@unicauca.edu.co](mailto:orojas@unicauca.edu.co) | <https://orcid.org/0000-0002-4824-4114>

<sup>b</sup> [jhoanf@unicauca.edu.co](mailto:jhoanf@unicauca.edu.co)

<sup>c</sup> [wilmerp@unicauca.edu.co](mailto:wilmerp@unicauca.edu.co)

**Citation:** Rojas Alvarado, O. A., Benavidez, J. F., y Pascuas, W. (2023). Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial. *Mutis*, 13(2), 1 - 27. <https://doi.org/10.21789/22561498.2019>

**Recibido:** 25 de noviembre de 2022  
**Aceptado:** 6 de marzo de 2023

**Copyright:** © 2023 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

#### RESUMEN

Este artículo propone un método para calcular el indicador de OEE (Eficacia General del Equipo). Esta propuesta se basa en utilizar el concepto de gemelo digital de un equipo para calcular el indicador OEE, teniendo en cuenta aspectos relacionados con la transformación digital industrial que requieren las empresas actualmente.

**Palabras clave:** OEE; transformación digital industrial; Industria 4.0; gemelo digital; ingeniería.

#### ABSTRACT

This article proposes a method to calculate the OEE (Overall Equipment Effectiveness) indicator. This proposal is based on using the concept of a digital twin of a team to calculate the OEE indicator, considering aspects related to the industrial digital transformation that are currently required by companies.

**Keywords:** OEE (Overall Equipment Effectiveness); Industrial digital transformation; Industry 4.0; Digital twin; Engineering.

#### INTRODUCCIÓN [T1]

En la última década se ha visto un crecimiento en el estudio y adopción de conceptos y tecnologías relacionados con la Cuarta Revolución Industrial, también llamada Industria 4.0 (Buchi et al., 2020; Liao et al., 2017), la cual se apoya en el proceso de transformación digital de la industria y presenta un nuevo paradigma de producción autónoma e inteligente que integra profundamente sistemas de operaciones de fabricación con tecnologías de comunicación, información e inteligencia buscando así aportar modelos comerciales rentables, mayor eficiencia, calidad y mejores condiciones de trabajo a las empresas manufactureras (Bai et al., 2020). Sin embargo, existe poca transparencia en los efectos reales de la Industria 4.0 para saber si las acciones desarrolladas están dando sus frutos o no se progresa como se esperaba. Se utilizan Indicadores Claves de Rendimiento (KPI); los más conocidos incluyen, por ejemplo, tiempo de producción, tasa de rechazo, espacio, utilización y el más usado el índice de Efectividad Global

del Equipo (OEE) (Joppen, et al., 2019; Shanin & Isfahani, 2015; Andersson & Bellgran, 2015).

El OEE es capaz de indicar en manera porcentual la eficacia real de cualquier proceso productivo, partiendo principalmente de la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Esto es un factor clave para poder identificar y corregir posibles ineficiencias que se originen en la fabricación (Shiraldi & Varisco, 2020). Así, es necesario contar con los datos de producción para el cálculo de dicho indicador; por esto, y la propia definición del indicador, cabe resaltar que se limita al comportamiento de productividad a nivel de equipo y que es necesario contar con una planta en operación para la toma de datos (Schleich et al., 2017). Por consiguiente, no se usa el OEE en la fase de diseño y otras fases tempranas del proceso productivo. El conocer el valor de este indicador en las etapas más tempranas de un proyecto de automatización implicaría, no solo un ahorro significativo de tiempo y dinero en las áreas que afecta el OEE, sino también la pronta inclusión a la cultura de mejora continua con todos los beneficios que esta conlleva.

En el contexto de Industria 4.0, los Gemelos Digitales se definen como representaciones virtuales, funcionales y ampliamente detalladas de productos físicos o de conceptos de estos. Los gemelos digitales contienen información específica que podría ser útil en las fases actuales o futuras del ciclo de vida del producto, aprovechando los beneficios de los entornos virtuales y físicos en beneficio de todo el sistema (Schleich et al., 2017; Jones, et al. 2020). La utilización de estos supondrá una solución al problema del cálculo de OEE en las primeras fases de un proyecto de automatización. En consecuencia, este trabajo propone un método para el cálculo de OEE que consiste en el uso del gemelo digital del concepto de un equipo como herramienta para determinar este indicador.

En este artículo se profundiza en los conceptos necesarios para entender cómo se relaciona el gemelo digital y OEE en el entorno de transformación digital industrial en el que se encuentran las empresas actualmente, destacando el papel que juega la tecnología, las personas, los procesos y los equipos en este entorno. Con estos conceptos se presenta el método sugerido para el cálculo de OEE basado en el gemelo digital, y se explican los puntos clave tenidos en cuenta para la selección de la herramienta usada y el equipo seleccionado para la evaluación. Además de las funciones y el proceso llevado a cabo para la generación del gemelo digital, se describe de forma detallada el proceso que ejecuta el Miniload y explica cómo se realizaron las pruebas sobre el gemelo digital generado. Posteriormente, se encuentran las consideraciones tomadas para el cálculo de OEE, la recopilación de datos obtenidos con base al experimento y la interpretación de los valores de OEE obtenidos a través de un análisis estadístico de los datos de producción obtenidos, para finalmente presentar las conclusiones del trabajo desarrollado.

## CONCEPTOS PARA EL CÁLCULO DEL OEE EN ENTORNOS DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL INDUSTRIAL

Dentro del proceso de transformación digital en el que se encuentran actualmente las industrias, es de gran interés estudiar cómo las herramientas tecnológicas desempeñan un papel importante para fortalecer las estrategias que se están llevando a cabo. Tendencias como el gemelo digital que permiten acercar a los operarios y demás interesados en los procesos sin necesidad de afectar los activos reales podrían permitir tomar mejores decisiones al respecto, aunque es imprescindible contar con indicadores adecuados para evaluar estos cambios y es en donde OEE entraría en un rol pertinente

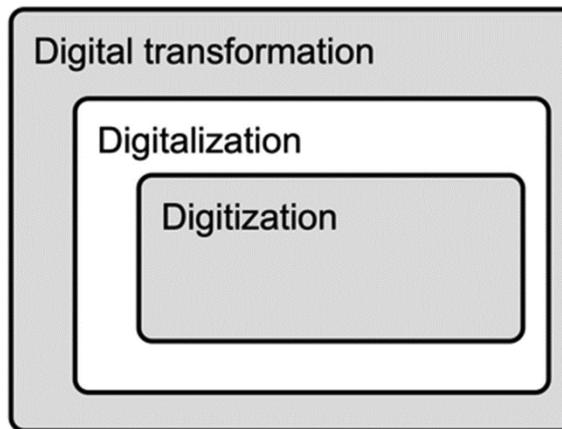
para cumplir estos objetivos, por lo cual un método adecuado para su cálculo a través del gemelo digital de un equipo puede aportar grandes beneficios dentro de un proyecto de automatización.

### Transformación Digital Industrial

En las últimas décadas, debido al desarrollo de la tecnología de la información en la industria manufacturera se ha llevado a cabo un cambio significativo en los métodos y herramientas que respaldan las fábricas del futuro. Las tendencias actuales vinculadas con la fabricación inteligente y la Industria 4.0 apuntan a una transformación digital enorme y a la reingeniería organizacional asociada para que se transformen las fábricas tradicionales y los sistemas industriales (Eynar & Cherfi, 2020).

En el contexto actual, con la aparición de diferentes fenómenos que surgen donde los mundos físico y virtual se cruzan, se suele confundir la transformación digital o su alcance con los de otros términos como digitalizar y digitalización, que si bien no son lo mismo, tienen una relación que se puede describir tomando como base que digitalizar es un componente de la digitalización que a su vez se incluye en la transformación digital, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Dominios digitales.



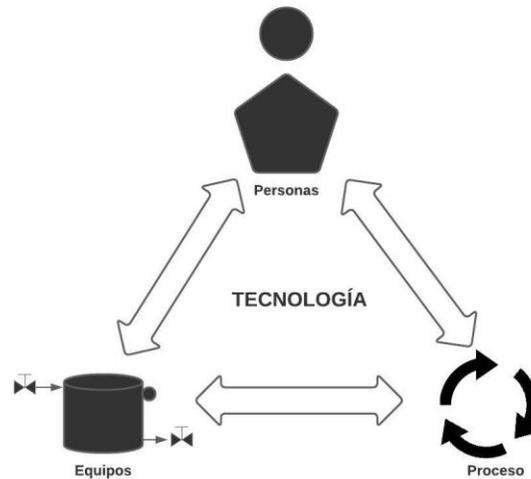
Fuente: Saarikko et al. (2020)

Digitalizar es el proceso de convertir señales analógicas en señales digitales, lo que permite el desacoplamiento de forma, función y acceso y la condición previa fundamental para todo. La digitalización hace referencia al proceso socio técnico de aprovechar los productos o sistemas digitalizados para desarrollar nuevos procedimientos organizativos, modelos de negocio u ofertas comerciales, siendo importante destacar que, mientras digitalizar describe una tecnología o un sistema de tecnologías en términos de lo que es y sus capacidades, digitalización responde al porqué esta tecnología es importante en un proceso u organización específico. Por otra parte, la transformación digital, la cual es estudiada en diversos artículos, es el proceso sociocultural de adaptar las empresas a las nuevas estrategias organizativas y conjuntos de habilidades necesarios para seguir siendo viables e importantes en un panorama digital. Otra definición

que se encuentra en la literatura menciona que la transformación digital implica aprovechar las tecnologías digitales para permitir importantes mejoras comerciales, como la mejora de la experiencia del cliente o creando nuevos modelos de negocio (Vial, 2019).

De lo descrito anteriormente se puede destacar que la transformación digital tanto a nivel general como industrial depende más de la estrategia que acogen las empresas que estar impulsada por sus avances tecnológicos. Incluso, en la mayoría de los casos el acceso a la tecnología no es un problema; en cambio, la necesidad de implementar modelos productivos, administrativos y comerciales de carácter digital viables es el verdadero desafío (Saarikko et al., 2020). Por eso, siendo un proceso sociocultural y abarcando al fenómeno de la digitalización pueden reconocerse como ejes de la transformación digital industrial las personas, los procesos y los equipos, en donde la tecnología juega un papel de vinculador o impulsador de estos ejes y comprender y tener en cuenta la cultura organizacional que tiene la empresa es primordial, tal como se presenta en la Figura 2.

**Figura 2.** Ejes de la transformación digital.



*Fuente:* Elaboración propia

Resulta indispensable definir términos como proceso, equipo y cultura organizacional. Un proceso es una secuencia de actividades químicas, físicas o biológicas para la conversión, transporte o almacenaje de material o energía; equipo o entidad de equipo es una colección de procesamiento físico y equipos de control o grupos de equipos de control con cierta función o conjunto de funciones de control asociadas (ISA, s.f.). Por otra parte, la cultura organizacional es definida normalmente en términos de cómo las personas piensan, lo cual tiene influencia directa en la forma en que se comportan dentro de una organización. Se considera adecuado tomar las definiciones brindadas por Martínez-Caro et al. (2020), quienes definen la cultura organizacional como el “conjunto complejo de valores, creencias, supuestos y símbolos que definen la forma en que una empresa lleva a cabo sus actividades de negocio”, o también como patrón de supuestos básicos que un grupo dado ha inventado, descubierto o desarrollado al aprender a hacer frente a su problema de adaptación externa e integración interna, y que han

funcionado suficientemente bien para ser considerado válido y, por tanto, para ser enseñado a nuevos miembros como la forma correcta de percibir, pensar y sentir en relación con estos problemas.

En ese sentido, la cultura organizacional representa una fuerte ventaja competitiva y un factor clave para la efectividad organizacional. También es importante para el éxito de los proyectos que involucran cambios organizacionales, como los que involucran la introducción de nuevas tecnologías digitales en la empresa.

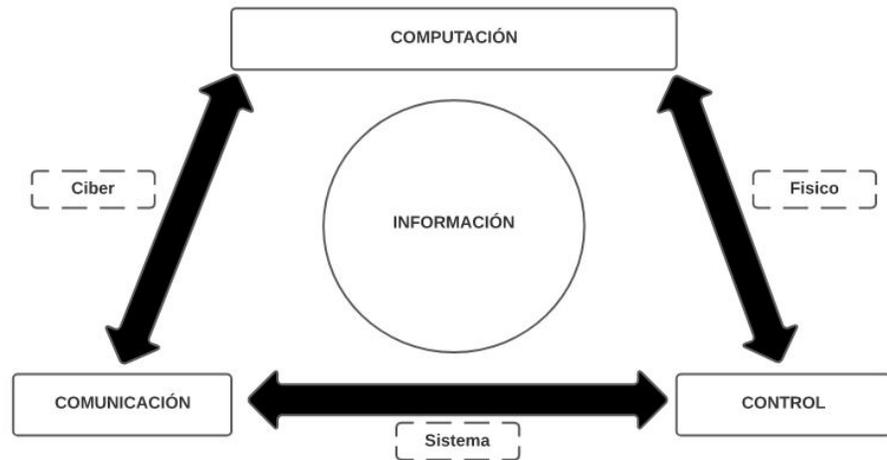
Como se ha mencionado, la transformación digital, más allá de implicar el uso de nuevas tecnologías, hace referencia a esa transformación en la cultura de las personas dentro de la organización en el nuevo panorama tecnológico digital que se está presentando, influyendo directamente en la tradicional cultura organizacional que tenían las empresas. Es interesante analizar cómo la manera en que los operarios llevan a cabo los procesos o el manejo de los equipos dentro de estos mismos influye en la eficiencia y cómo, con base a la tecnología que nace a partir de la Industria 4.0, puede evaluarse y generar estrategias.

### **Conceptualización y caracterización de un gemelo digital**

La esencia de esta revolución se basa en los sistemas ciber físicos como medio para lograr la “fábrica inteligente” de la Industria 4.0 (Bai et al., 2020), en donde el concepto de línea de producción fija desaparece, por lo cual se promoverá la “fabricación estandarizada”, y con esta estandarización del modelo de producción, la fábrica se extenderá al mercado internacional con el fin de desarrollar el modelo de innovación tecnológica. Esta revolución tiene 4 características principales: interconectada, datos, integración e innovación. Además, sus 9 pilares tecnológicos son realidad virtual, inteligencia artificial, internet industrial, big data industrial, robots industriales, impresión 3D, computación en la nube, conocimiento en automatización y seguridad de redes industriales (Cheng et al., 2016).

Los sistemas ciberfísicos conectan el espacio virtual con la realidad física, que integra la informática, comunicación y almacenamiento y puede llegar a usarse en tiempo real de manera confiable, estable y eficiente. El núcleo de su concepto es 3C que hace referencia a computación, comunicación y control, para alcanzar la interacción colaborativa y en tiempo real entre el mundo físico y el mundo digital o virtual a través de circuitos para la interacción entre los procesos computacionales y los procesos físicos (Cheng et al., 2016), tal como se presenta en la Figura 3.

**Figura 3.** Sistema ciberfísico.



Fuente: Cheng et al. (2016)

Se debe tener en cuenta que el gemelo digital permite que el objeto real tenga una imagen digital que consta de distintos modelos. Estos modelos tienen 5 funciones principales, que son, según Adamenko (2020):

- Reproducir con precisión las propiedades, el comportamiento y las reglas del objeto físico para crear una imagen precisa
- Operación autónoma de los modelos; por lo tanto, simulación de diferentes comportamientos del objeto, que luego pueden usarse como pautas para la operación del objeto físico.
- Monitoreo remoto del estado de los activos
- Capacidad para predecir problemas antes de que ocurran.
- Validar el rendimiento incluso antes de que el producto esté terminado.

### **Efectividad Global de Equipo (OEE)**

Para competir en el mercado global, las empresas de manufactura están constantemente en la necesidad de mejorar sus cadenas de producción y aumentar calidad y volumen de fabricación mientras se reducen recursos y costos de producción. Estos puntos claves para aumentar la competitividad de una empresa, por lo que deben crear sistemas de producción flexibles pero, a la par, robustos, que brinden mejores condiciones para la excelencia operativa. Conceptos como “Manufactura esbelta y ecológica”, “Producción ajustada” y “Lean” son considerados buenas maneras de crear oportunidades para desarrollar sistemas de fabricación eficientes en el uso de recursos (Muchiri & Pintelon, 2008).

El Mantenimiento Productivo Total (TPM) fundado por Nakajima es una metodología Lean ampliamente conocida y utilizada para mejorar el rendimiento de la producción considerando que está diseñada para optimizar la confiabilidad del equipo y garantizar una gestión eficiente de los activos de la planta mediante el uso de la participación de los empleados, vinculando la fabricación, el mantenimiento y la ingeniería (Ahuja & Khamba, 2008). La OEE es una medida importante dentro del concepto de TPM y es uno de los KPI más utilizados en la actualidad.

La definición original de OEE presentada por Nakajima establece seis grandes pérdidas divididas en tres categorías denominadas disponibilidad (A), rendimiento (P) y calidad (Q), las cuales se presentan en la Figura 4 y permiten identificar: 1. baja productividad y pérdida de rendimiento debido a mala calidad, 2. Configuración y ajuste para el cambio de mezcla de productos, 3. Producción pérdidas cuando ocurren fallas temporales, 4. Diferencias en la velocidad de diseño del equipo y velocidad de funcionamiento real, 5. Defectos causados por mal funcionamiento del equipo, y 6. Puesta en marcha y pérdidas de rendimiento en la etapa inicial de producción (Andersson & Bellgran, 2015).

El indicador OEE se usa comúnmente para monitorear el desempeño de la producción como parte del sistema de medición del desempeño de una empresa. El indicador OEE podría utilizarse tanto para las mejoras de cuantificación de referencia interna, para la comparación interna del rendimiento, como un indicador para las actividades de mejora de procesos en un contexto de producción, como sugiere el estudio de Sohal et al. (2010) y para identificar la máquina de peor rendimiento para el enfoque TPM.

Figura 4. Cálculo de OEE basado en Nakajima.



Fuente: Marco (2020)

### METODO PARA EL CÁLCULO DEL OEE BASADO EN UN GEMELO DIGITAL

Ahora se describirá el método general sugerido para el cálculo de OEE basado en el gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial que se aplicará a un equipo específico a lo largo de este documento.

Es necesario mencionar que los pasos correspondientes al gemelo digital, en especial los pasos 1 y 2 se usan solo si no se cuenta con un gemelo digital y el paso 3 es la adecuación del mismo para el experimento, toma de datos y cálculo de OEE. Así pues, en caso de contar con un gemelo digital es posible empezar el cálculo del OEE a partir del paso 4.

## Gemelo Digital

Los primeros pasos corresponden a la generación del gemelo digital considerando los aspectos para tener en cuenta para el cálculo de OEE:

**1. Obtención del modelo CAD:** este paso se lleva a cabo si no se cuenta con los modelos CAD del equipo y se empezará desde su creación. Para comenzar con el diseño del modelo CAD del equipo a estudiar es importante, en primer lugar, definir dos aspectos: el equipo, incluyendo su funcionalidad; y el software que se empleará.

Una vez se ha especificado el equipo a analizar, es necesario comprender la dinámica que tendrá durante el proceso a estudiar, así como cuáles aspectos serán los que se quieren evaluar con el cálculo de OEE para así poder hacer una adecuada selección de los componentes software que se requieren usar en el paso de generación. Una de las razones para empezar desde la creación de los modelos CAD puede deberse a que el equipo se encuentra en la parte conceptual de su ciclo de vida, por lo cual se recomienda hacer un análisis de las dinámicas que tendrán los distintos componentes para poder comprenderlas bien y facilitar el proceso de generación. Se recomienda realizar una descripción del proceso y del funcionamiento del equipo; además, generar diagramas que faciliten o permitan un entendimiento de su comportamiento.

Las herramientas software serán las encargadas de facilitar el proceso de diseño y ensamblaje de los modelos CAD de ser necesario, además de la generación del gemelo digital, así como la comunicación entre el entorno de simulación y el o los controladores externos a la herramienta que se utilicen. Cabe resaltar que, si bien hay herramientas que permitirán el funcionamiento por sí solo del modelo sin necesidad de entidades externas, lo ideal es que el gemelo funcione con los componentes que lo harían su homólogo físico para que la variación que puede arrojar OEE sea la menor posible. Básicamente se necesitan definir las herramientas para el diseño, ensamblado de los componentes y la generación del gemelo digital.

Otro aspecto por considerar es el tipo de archivos que generan las herramientas debido a que podrían no ser compatibles con otras que se usen, aspecto que facilita el hecho de trabajar con software de un mismo fabricante, pero, de igual manera, es necesario cerciorarse de esta compatibilidad, debido a que los archivos generados a partir de la creación de los modelos podrían no ser leídos por el software de ensamblado y así mismo estos por el entorno de generación.

Finalmente, es necesario definir los aspectos relacionados a la comunicación entre componentes, lo cual podría requerir herramientas para comunicación OPC entre los componentes software o elementos externos de control, cuyo aspecto puede generar problemas en el momento de controlar el equipo o interferencias que se podrían ver percibidas en los datos recolectados.

Al finalizar este paso se contará, adicional al equipo ensamblado, con un documento que permita entender el funcionamiento que tiene el equipo y los diagramas que enseñen su comportamiento, así como las herramientas software necesarias para el proceso de generación del gemelo digital.

**2. Generación del Gemelo Digital:** la generación del gemelo se realiza desde el modelo CAD del equipo, tomando en cuenta el funcionamiento que tendría su homólogo físico, para lo cual se debe basar en los datos recogidos en el paso 1, como la descripción

del proceso y los diagramas elaborados, para que de esta manera el digital funcione de la manera más similar posible.

En cuanto a la asignación de características al modelo es importante tener en cuenta que, a mayor número de estas, se incrementará la capacidad computacional requerida para su simulación, pero sin la cantidad adecuada el funcionamiento del equipo digital no será el necesario para compararse con su homólogo físico, por lo cual es necesario definir los elementos del modelo a los cuales es indispensable su asignación y, por el contrario, omitir las que no son indispensables para el estudio como, por ejemplo, el rozamiento entre tornillos o asignaciones a estructuras y, en general, componentes que no hacen parte del análisis. Esto puede variar de un proceso o equipo a otro, así como algunos otros aspectos como la funcionalidad u objetivo.

Una vez concluido este paso, se contará con los archivos de los modelos CAD que conforman el gemelo digital.

**3. Adecuación del Gemelo Digital:** como último paso en lo que concierne al gemelo digital, se deben configurar los parámetros o los distintos softwares que se requieran para su funcionamiento. Algunos de los parámetros son los correspondientes a los elementos que funcionarán como sensores o actuadores dentro del modelo, por lo cual se debe configurar velocidades, rangos de los sensores, entre otros aspectos. Es importante recordar que estos serán los que suministren los datos que se requerirán para el cálculo de OEE, por lo cual es indispensable su adecuada disposición y configuración, además de tener en cuenta el tipo de señal que se transfiere o recibe para así configurar adecuadamente los componentes externos.

De este paso se obtendrá un gemelo digital adecuadamente configurado para su análisis.

### **Diseño experimental**

**4. Caso de estudio:** a partir del gemelo digital se define el proceso o la parte de este que se analizará, así como otros aspectos que son importantes para el estudio que se quiera realizar. Además, esta información servirá para diseñar la lógica de control. El equipo por analizar podría ser el encargado de un proceso completo o parte de uno, por lo cual se debe definir el punto de inicio desde el que se evaluara el gemelo digital porque esto se verá también reflejado en los resultados de eficiencia que se obtengan. Así, por ejemplo, podría definirse que los tiempos tomados comiencen desde el sensado de un producto en la etapa de inicio del equipo y finalizar con la activación de un determinado actuador, entre cuyos aspectos también se debe definir lo que podría tomarse como alteraciones o disturbios dentro del sistema, destacando en este punto aquellos debidos a manejo de personal, que como se ha mencionado en el entorno actual de transformación digital en el que se encuentran las empresas, afectan también al equipo y, por tanto, al proceso.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que en este punto se deben definir algunas variables que serán necesarias para el cálculo de OEE, tales como unidades producidas a la primera, retrabajos, producción real, unidades defectuosas y que con base al funcionamiento del gemelo digital bajo la descripción del caso de estudio se pueda formular un experimento que permita recolectar otras como tiempos de producción planificados, tiempo disponible, tiempo productivo, tiempo de ciclo y capacidad de producción, así como las variables correspondientes a las pérdidas descritas por

Nakajima, como tiempos programados de descanso, tiempo de arranque, tiempos de paradas no programadas y microparadas.

Con base al caso de estudio descrito se debe desarrollar la lógica de control del proceso, así como la programación del mismo, para lo cual se sugiere apoyarse en métodos gráficos de representación como Grafcet, Redes de Petri, etc., así como la elaboración de tablas de entradas y salidas para facilitar el proceso de programación.

Al finalizar este paso, se tendrá definido y documentado los aspectos generales y algunos específicos dentro del estudio que se quiere realizar, entre los cuales se destaca el proceso a analizar, además de contar con las representaciones gráficas del proceso y el código de programación.

**5. Experimentación:** de acuerdo con cada experimento será importante definir qué conocimientos o habilidades básicas deben tener las personas que participarán. De igual manera, se sugiere que estas tengan un proceso de acercamiento al equipo digital y a las herramientas indispensables para su funcionamiento para que sea utilizado de manera adecuada, aspectos que serán definidos por el o los encargados del experimento.

En este punto también se deben definir, con respecto al estudio realizado, las herramientas estadísticas (en caso de ser necesarias) que se utilizarán para el análisis, teniendo en cuenta aspectos de la información que se recoge, así como al tipo o número de datos que se tratarán, entre otros.

Al finalizar este paso se tendrá documentado la estructura o la manera en que se llevó a cabo el experimento, además, los resultados arrojados en tablas, listas y gráficos, dependiendo del estudio, así como todos aquellos elementos necesarios para un posterior análisis. Los primeros pasos corresponden a la generación del gemelo digital considerando los aspectos a tener en cuenta para el cálculo de OEE.

## OEE

**6. Definición de la fórmula para el cálculo del OEE:** OEE cuenta con una fórmula general para su cálculo, como se ha presentado en la Figura 4. Para esto es necesario tener en cuenta las pérdidas de eficiencia englobadas en las categorías Disponibilidad (A), Rendimiento (P) y Calidad (Q); y para la obtención de las mismas, según Nakajima (Ahuja & Khamba, 2008), se establece que:

$$\%Disponibilidad = \frac{TP}{TD} \quad (1)$$

%Disponibilidad(A): Cociente del Tiempo Productivo (TP) entre el Tiempo Disponible (TD) para un período de producción determinado. Así mismo, el TD se calcula de restar los Tiempos Programados de Descanso (TPD) al Tiempo de Producción Planificado (TPP); a la vez, el TP se calcula a partir de restar los tiempos de pérdida no programados al TD. Así la disponibilidad se ve afectada por las paradas que se producen en el proceso de fabricación como, por ejemplo, arranques de máquinas, cambios, averías y esperas.

$$\%Rendimiento = \frac{PR}{CP} \quad (2)$$

%Rendimiento (P): Cociente de la Producción Real (PR) entre la Capacidad Productiva (CP) que se calcula a partir del Tiempo de Ciclo Ideal (TC), multiplicado por el TP, para un período de producción determinado. El rendimiento se ve afectado por las microparadas y la velocidad reducida.

$$\%Calidad = \frac{PB}{PR} \quad (3)$$

%Calidad (Q): Cociente de la Producción Buena (PB) entre la Producción Real (PR). El porcentaje de calidad se ve reducido por retrabajos o piezas defectuosas.

$$OEE = A * P * Q \quad (4)$$

Finalmente, la ecuación de OEE que relaciona los tres factores es un producto entre A, P y Q.

Por otra parte, existen modificaciones que suelen hacerse para poderla adaptar a procesos específicos. Debido a esto se sugiere un análisis tanto del gemelo digital como del caso de estudio para poder determinar las consideraciones que se utilizarán para cada caso, para lo cual debe tener en cuenta aspectos como el tipo de proceso continuo, discreto o Batch.

Como ya se conocen las variables a analizar dentro del estudio, lo siguiente que se debe realizar será el reconomiento de los parámetros dentro de la fórmula con respecto al caso de estudio y definirlos de manera adecuada.

Al finalizar este paso se tendrá documentado la fórmula para cálculo de OEE que se utilizará, así como las características de esta y se comprenderán sus distintos parámetros.

**7. Calcular el OEE:** una vez se ha realizado el experimento se debe hacer un tratamiento de datos, ubicando los resultados obtenidos en tablas de conteo o de frecuencias si es necesario, diferenciando debidamente la información necesaria para el cálculo de OEE apoyándose en el anterior.

Luego, se debe calcular la Efectividad Global Del Equipo partiendo de la información y las ecuaciones del paso anterior o con las variaciones pertinentes.

Al finalizar este paso se debe contar con los valores de Disponibilidad, Rendimiento y Calidad asociados al gemelo digital y con la Efectividad Global del Equipo.

Contando con los resultados de OEE es necesario analizarlos. Se aconseja evaluar factor por factor y determinar qué pérdidas de efectividad se ven reflejadas en la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, así como una vista muy general a las posibles causas y, finalmente, se debería usar esta información para la mejora del proceso y, una vez aplicadas las mejoras, volver a ejecutar el experimento.

En este punto del proceso se obtendrán los fallos y pérdidas de producción que deben atacarse para el aumento de la efectividad del proceso.

**8. Análisis de resultados:** este paso se propone como medio para garantizar la confiabilidad estadística de los datos de producción recolectados y los valores obtenidos de OEE a partir del método.

Primero, se selecciona de acuerdo con caso el tipo de estadística apropiada para el estudio. Se recomienda el uso de estadística inferencial, debido a que permite un análisis de la población a partir de una muestra, por lo cual, primero se debe analizar la naturaleza de los datos para elegir si es apropiado el uso de herramientas paramétricas o no paramétricas; con base a esto se selecciona un método adecuado para ver la certeza de los datos.

### GENERACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

En la generación del gemelo digital se realiza la asignación de las características físicas y eléctricas que necesita el modelo virtual para presentar un comportamiento similar al de su homólogo físico. Para llevar a cabo este paso se realiza la selección de la herramienta software adecuada para los objetivos del gemelo digital, y posteriormente se asignan las características correspondientes a los elementos necesarios para el funcionamiento adecuado del sistema.

Para la validación del método para el cálculo del OEE basado en un Gemelo Digital se utilizaron los componentes software de la solución PLM de Siemens, el cual permite gestionar esta información a lo largo del ciclo de vida de un producto de manera eficaz, desde la idea inicial y la fabricación hasta el mantenimiento del producto y su eliminación.

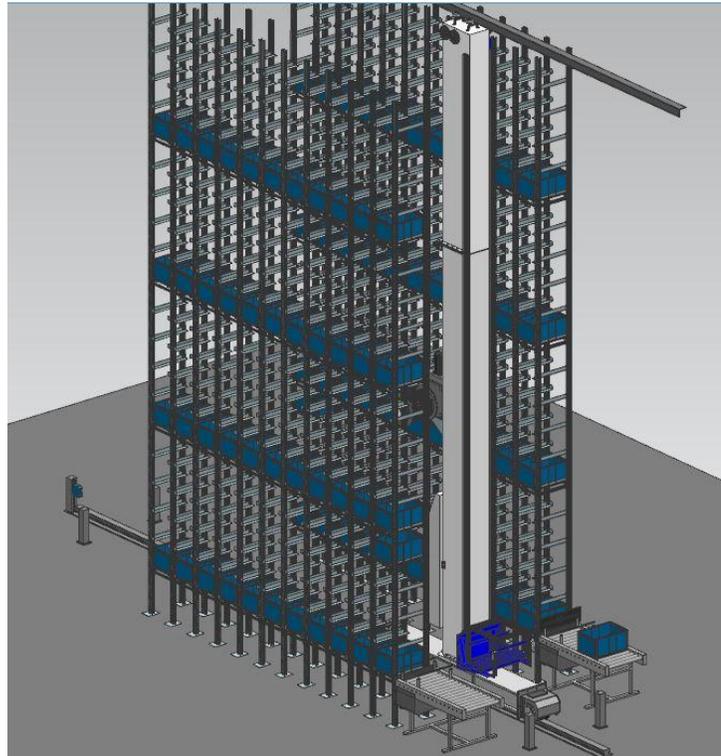
Siemens ofrece un portafolio de herramientas con base a PLM que son adecuadas no solo para la generación del modelo, sino para el modelado y ensamblado de los componentes, lo que permite una integración del proceso completo, facilitando las tareas necesarias y los análisis que se requieran realizar posteriormente. Las herramientas seleccionadas son NX 12, TIA PORTAL (TIA V15) y PLC SIM ADVANCED.

El equipo que se buscaba representar está basado en un concepto simple de Miniload, que es un sistema de almacenamiento para cajas de plástico, cajas de cartón o bandejas; está compuesto por 2 estanterías encargadas del almacenamiento de las cajas, 2 bandas transportadoras: una para la entrada y otra para salida de las cajas, cada una con un pequeño elevador o soporte para cajas para hacer el proceso de carga y descarga más sencillo y 1 transelevador equipado en la cuna móvil con una horquilla extensible de doble dirección con espacio para una caja, el cual será el encargado del transporte de las cajas entre las estanterías, bandas o espacio de trabajo.

Este sistema robotizado organiza, coloca y extrae las cajas que se encuentran dispuestas en pasillos de estanterías, reduciendo el tiempo y coste de la preparación de pedidos, especialmente en aquellos almacenes en los que se da un Picking intensivo. A diferencia de los sistemas de almacenaje automático con transelevadores para estibas, los Miniloads como su propio nombre indica, tienen integrada una pequeña grúa diseñada para la manipulación de pequeñas cargas, que no suelen superar los 150 kg.

Como se ha mencionado anteriormente, la generación del gemelo digital parte de un modelo CAD. En la Figura 5 puede verse el modelo del sistema Miniload desde el cual se empezó a agregar las diversas características tanto físicas y eléctricas requeridas.

**Figura 5.** Concepto de Miniload propuesto en NX MCD.



Fuente: NX MCD.

A cada uno de los componentes del Miniload de la Figura 5 se configuraron las características físicas, mecánicas y funcionales para la obtención del sistema.

Una vez se realizaron las configuraciones básicas en cuanto a movimiento mecánico y características eléctricas al modelo, se podría controlar el gemelo digital desde este mismo entorno o hacer uso de una herramienta extra para este fin. En este trabajo se realizó la conexión con un software externo también de Siemens debido a que esto podría ser útil si se quisiera seguir trabando con los distintas etapas del ciclo de vida del producto; por lo tanto, las configuraciones adicionales hacen referencia a la asignación de sensores o representaciones de estos dentro de la simulación que contribuirán a la recolección de datos de posiciones y distancias de los distintos elementos para posteriormente ser tratados y enviados a un PLC virtual y a uno físico.

Es importante tener en cuenta que, mientras estas configuraciones representarán los sensores dispuestos en el modelo, otras funciones o características eléctricas asociadas, como por ejemplo, control de velocidad, de posición o de superficie de transporte, representan a los actuadores que se tendrán en este.

Para algunos de los sensores fue necesario el modelado de soportes para su ubicación, al contrario de los que fueron dispuestos en la cuna debido a que esta fue diseñada para que su estructura tuviese una forma similar a un riel que facilita el acoplamiento de instrumentos como estos; por otra parte, a algunos de estos sensores y soportes les fue asignada la característica física de junta fija.

Por último, vale la pena mencionar que las pruebas de control o comisionamiento virtual se pueden realizar tanto con un PLC virtual como los que se simulan a partir de PLCSIM ADVANCED o un controlador o PLC real, pero para las pruebas que se usarán para la evaluación de OEE lo recomendable es utilizar el PLC o controlador real con el que trabajaría el equipo. Lo anterior, con el fin de que los resultados obtenidos tengan en cuenta factores más fieles a los reales como la capacidad de procesamiento del controlador, aunque en caso de no contar con el PLC real o no tener la suficiente disposición del controlador para las pruebas se puede probar la programación con PLCSIM ADVANCED como se ha mencionado, pero se sugiere que la simulación se haga en un PC externo al que trabaja el equipo a evaluar para que el procesamiento no se vea afectado por el controlador virtual. En este trabajo se utilizó un PLC Siemens SIMATIC ST-1500 para controlar el MiniLoad.

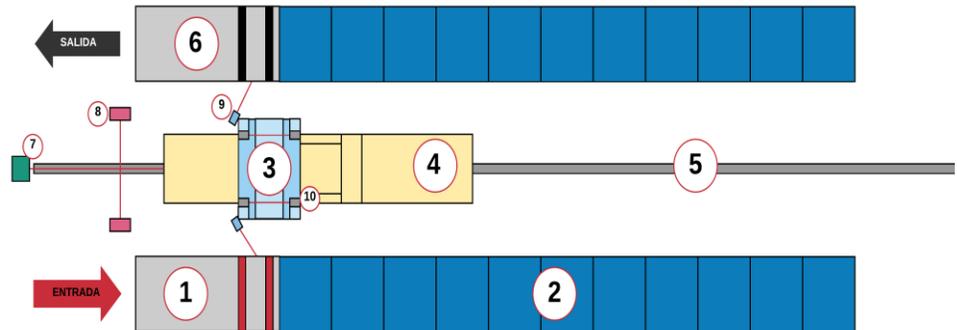
## DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación, se aborda el experimento usado para la obtención de datos de producción a partir del gemelo digital. Para esto se explican las características del experimento, se define de manera detallada el funcionamiento del MiniLoad dentro del proceso a evaluar y se enseña la representación en GRAFCET de la lógica de control usada y algunos de los parámetros físicos de la simulación.

El transelevador puede realizar los procesos de ubicación y extracción de manera semiautomática. El proceso de ubicación o guardado empieza en la cinta transportadora de entrada con la aparición de una caja y un paquete; la caja se desplaza por la cinta transportadora hasta la posición de carga, y un operario debe asignar el lugar deseado del almacén (fila, columna y estantería) y dar la orden de “Guardar” para que, a continuación, el transelevador recoja la caja en la cinta de entrada y cuando los sensores de barrera infrarrojos detectan que la caja está correctamente ubicada dentro de la cuna, el transelevador procede a desplazarse hacia el lugar deseado para el almacenaje, el desplazamiento que tiene la estructura del transelevador es realizado a través de movimientos en el eje X (movimiento horizontal) y, por otra parte, la cuna montada en la estructura se encarga del movimiento en el eje Z (movimiento vertical). Finalmente, la horquilla deposita la caja en el lugar seleccionado moviéndose en el eje Y (movimiento lateral).

De la misma manera, el operario puede indicar el lugar y dar la orden de “Extraer”, si desea realizar el proceso de extracción de una caja en particular: el transelevador se mueve hasta esa posición y retira la caja para luego llevarla a la cinta de salida, esta posteriormente desaparece. Cabe resaltar que la extracción se puede ejecutar justo después de depositar una caja; de manera que, en caso de no haberse indicado la extracción de ninguna caja, el transelevador se moverá a la posición de inicio en medio de las dos cintas transportadoras (HOME) a la espera de una orden, tal como se puede ver en la Figura 6.

**Figura 6.** 1) Banda de entrada. 2) Estantería. 3) Cuna. 4) Estructura del transelevador. 5) Riel inferior. 6) Banda de salida. 7) Sensor de distancia horizontal. 8) Sensores de barrera de seguridad. 9) Sensor laser. 10) Sensores de barrera.



Fuente: Elaboración propia

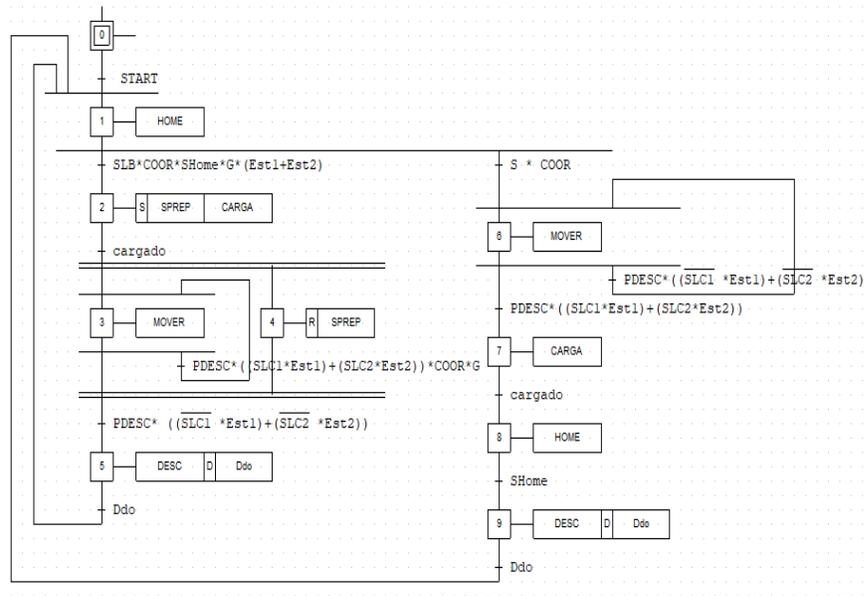
Es importante mencionar que, para este trabajo, una caja que pase por el proceso de ubicación o extracción de forma correcta será equivalente a una unidad producida y, si es necesario reubicarla, se tomará como un retrabajo; por otra parte, ya que el sistema solo puede cargar una caja, este debe terminar de producir una unidad para empezar con la siguiente y que tanto el proceso de ubicación como extracción tardan el mismo tiempo en completarse, pues son las mismas actividades, pero en diferente orden.

Con la descripción anterior se aprecia que el funcionamiento del transelevador está ampliamente influenciado por el manejo por parte del operario. Seleccionar un espacio de almacenamiento incorrecto o los tiempos de espera entre procesos afectarán directamente la eficiencia del Miniload, pues al no contar con un software integrado de inventarios, la velocidad de las instrucciones y la eficiencia de ubicación corresponderá al correcto manejo, la memorización de los estados de los espacios de almacenaje y un posible algoritmo de almacenaje que funcione como apoyo al operario.

Los tres factores mencionados anteriormente pueden ser entrenados y evaluados sin poner en riesgo el proceso real gracias al gemelo digital desarrollado en este trabajo, aportando así al entrenamiento de nuevos operarios, a la implementación y estudio de nuevos algoritmos de almacenaje en inventarios y cambios de funcionamiento. Incluso, podría usarse para la prueba de efectividad de operarios y la implementación de un sistema integrado de inventarios, actividades que desarrolladas en entornos tanto digitales como ciberfísicos se ven englobadas en la transformación digital industrial.

El GRAFCET de la Figura 7 proporciona no solo una manera gráfica de representación de los procesos a automatizar, sino que también permitió verificar el funcionamiento, dar seguimiento y paralelamente facilitó la programación del PLC así como la corrección de errores y la optimización del código, ya que el LADDER se generó a partir de la transcripción de este GRAFCET.

**Figura 7.** Grafcet del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se pueden observar los dos procesos (ubicación y extracción) que no pueden ejecutarse al mismo tiempo y que al finalizar cada proceso el sistema vuelve a la posición de espera de instrucciones (HOME) que se encuentra justo en medio de las bandas de entrada y salida de cajas. Por otra parte, se pueden identificar los diferentes ID de las señales de los sensores y las operaciones lógicas que deben hacer entre ellos para que se activen las transiciones.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros usados para la simulación basados en un Miniload de la empresa de origen español MECALUX S.A [22].

**Tabla 1.** Parámetros de simulación.

	Velocidad (mm/s)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )	Desaceleración (mm/s <sup>2</sup> )
<b>Cuna</b>	1700	300	300
<b>Estructura</b>	3000	300	300
<b>Horquillas*</b>	600	250	250
<b>Banda</b>	200	-	-
<b>Soporte Cajas</b>	100	-	-

Fuente: elaboración propia

La lógica de control se probó en una primera simulación en un PLC virtual simulado en PLCSIM ADVANCED para posteriormente corregir errores y programar con esta un PLC Siemens SIMATIC ST-1500, siendo necesaria la configuración de comunicaciones adecuada entre los distintos componentes tanto NX con el PLC virtual y el real. Cabe resaltar que las pruebas para cálculo de OEE se hicieron bajo el control del proceso por parte del PLC real, con el objetivo de tener una mejor y más certera evaluación del proceso llevado

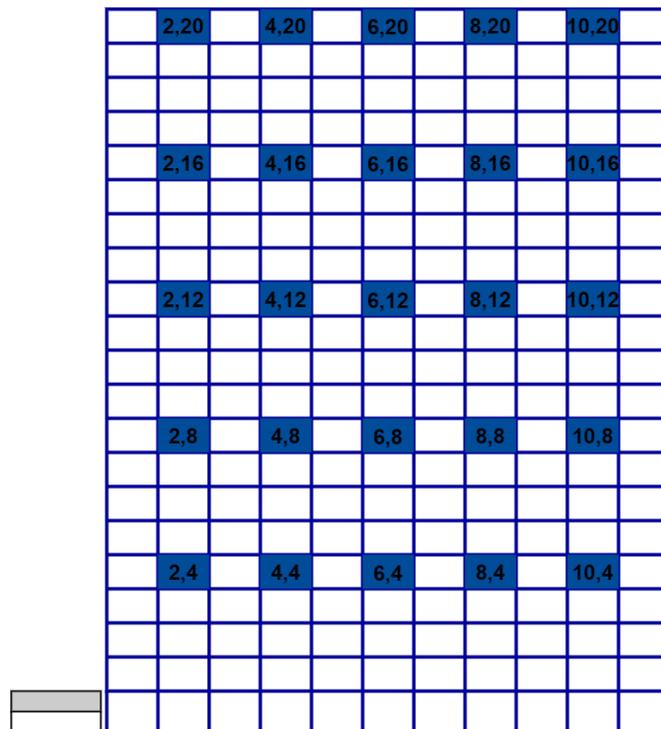
a cabo por el equipo, además de aprovechar de mejor manera los recursos de procesamiento del computador para la simulación del gemelo digital.

Por limitaciones tecnológicas fue necesario reducir los espacios de almacenamiento. Así pues, se usaron 25 espacios distribuidos de manera uniforme en la estantería como se muestra en la Figura 8, denominados espacios de almacenamiento útiles y son nombrados de acuerdo con su distribución en coordenadas (filas y columnas).

Las pruebas se realizaron de forma individual: cada sujeto realizó 4 turnos (muestras) de 1 hora cada uno con descansos de 1 hora entre turnos. A cada sujeto y en cada turno se les entregó el Gemelo Digital con el almacén vacío y con el Miniload apagado, de manera que estos debieron encender el Miniload, todo esto con el fin de que contaran con las mismas condiciones de arranque.

En la cinta transportadora de entrada se generaba una caja cada vez que se terminaba una iteración del proceso de guardar y el sujeto debía ubicarla en un lugar del almacén a su elección, indicando la dirección del lugar y presionando "Guardar". Por otra parte, de manera aleatoria se le ordenaba al sujeto que retirara una caja, tratando de simular lo que pasaría en un sistema de picking tradicional. El sujeto también tuvo que estar pendiente de las alertas que se producían al intentar guardar en un lugar ya ocupado o extraer una caja de un lugar vacío y corregirlo rápidamente. De manera simultánea se tomaron los datos de producción del turno en una hoja de cálculo genérica.

**Figura 8.** Almacenamientos útiles dentro de la estantería.



Fuente: Elaboración propia

### CALCULO DEL OEE

A continuación, se realizará el cálculo de OEE a partir de los datos obtenidos con base al experimento realizado. Para esto, en primera medida se describirá las consideraciones tomadas de la fórmula general de cálculo de OEE para el caso específico del sistema Miniload; posteriormente, las tablas con los datos recopilados con base al experimento planteado, y finalmente se realiza una interpretación de los valores de OEE obtenidos.

De acuerdo con lo definido anteriormente se puede observar que la forma de Nakajima para el cálculo de OEE solo sirve para un lote o para varios lotes donde el TC sea el mismo. Este no es el caso del transelevador que, aunque las acciones que realiza son las mismas en cada iteración, cada espacio de almacenamiento se encuentra a una distancia diferente a los demás con respecto a la posición HOME del transelevador (excepto su equivalente en la estantería de enfrente), por lo cual analizando una sola estantería se puede considerar que producir una unidad vinculada a un espacio de almacenamiento específico posee un TC propio, para lo que tomamos el TC de producir una unidad vinculada a cada espacio de almacenamiento y calculamos el OEE de una producción multilotes de la siguiente manera:

%Disponibilidad(A): se usa la misma ecuación 1 para encontrar la disponibilidad, puesto que tanto el TP como el TD engloban los tiempos que el transelevador está encendido sin importar los lotes.

%Rendimiento (P): en este caso hay que usar como unidad de medida el tiempo, en lugar de PR y CP. Para ello, basta con sumar los tiempos resultantes de las unidades producidas asociadas a cada espacio de almacenamiento (TTx) en función de su TC, que llamaremos Tiempo de Trabajo Total (TTT) y dividirlo entre el TP, tal como se describe a continuación:

$$\%Rendimiento = \frac{(TT1 + TT2 + \dots + TTn)}{TP} \quad (5)$$

%Calidad (Q): en este caso también se usó como unidad de medida el tiempo, en lugar de PB y PR. Para ello, basta con sumar los tiempos resultantes de las unidades producidas buenas asociadas a cada espacio de almacenamiento (TTBx) en función de su TC (que llamaremos Tiempo de trabajo TTB) y dividirlo entre el TTT, como se presenta a continuación:

$$\%Calidad = \frac{(TTB1 + TTB2 + \dots + TTBn)}{TTT} \quad (6)$$

Los datos del experimento que se registraron fueron: Tiempo de Ciclo (TC), Tiempo de Arranque, Unidades Buenas (OK) que corresponde a los procesos realizados satisfactoriamente en el primer intento, y Retrabajos (RT): Reubicaciones.

En primer lugar, se calcula el TP vislumbrando que se cuenta con los tiempos de arranque registrados en las pruebas que se presentan en la Tabla 2; además, no se cuenta con TDP, así que TD es igual a TP.

**Tabla 2.** Tiempos de producción

	Muestras	Tiempo de Arranque (seg)	TP (seg)
<b>Sujeto 1</b>	<b>1</b>	15	3585
	<b>2</b>	49	3551
	<b>3</b>	20	3580
	<b>4</b>	35	3565
<b>Sujeto 2</b>	<b>1</b>	29	3571
	<b>2</b>	24	3576
	<b>3</b>	45	3555
	<b>4</b>	32	3568

Fuente: elaboración propia.

Las tablas 3 y 4 muestran los TC asociados a cada espacio de almacenamiento útil y las unidades producidas por cada sujeto en cada muestra haciendo distinción entre unidades buenas (OK), retrabajos (RT) y la suma de unidades producidas (Prod).

**Tabla 3.** Tiempos de ciclo y conteo de unidades del sujeto 1

Espacio de almacenamiento	Tiempo de ciclo (T <sub>c</sub> )	Sujeto 1												
		Muestra1			Muestra2			Muestra3			Muestra4			
		OK	RT	Prod										
1	2,4	30,09	3	0	3	7	2	9	3	0	3	3	0	3
2	4,4	32,76	2	0	2	5	0	5	4	0	4	4	0	4
3	2,8	33,47	1	0	1	2	0	2	4	1	5	5	0	5
4	4,8	34,12	1	1	2	2	1	3	3	1	4	2	0	2
5	6,4	34,24	0	0	0	4	0	4	2	0	2	4	0	4
6	8,4	35,69	6	0	6	2	0	2	3	0	3	5	0	5
7	6,8	35,95	7	0	7	2	1	3	1	0	1	2	0	2
8	8,8	36,31	1	0	1	2	0	2	2	1	3	2	0	2
9	2,12	37,28	2	1	3	2	0	2	2	1	3	3	0	3
10	4,12	37,71	2	0	2	2	0	2	4	0	4	5	0	5
11	10,4	38,18	2	0	2	5	0	5	2	0	2	4	2	6
12	6,12	38,20	3	0	3	2	0	2	2	0	2	2	1	3
13	10,8	38,27	5	0	5	2	0	2	2	0	2	2	0	2
14	8,12	38,82	2	0	2	2	0	2	2	0	2	1	0	1
15	10,12	39,90	1	0	1	2	1	3	2	0	2	1	0	1
16	2,16	40,28	4	0	4	2	0	2	2	0	2	1	0	1
17	4,16	40,62	1	0	1	2	1	3	4	0	4	5	1	6
18	6,16	40,77	2	0	2	3	1	4	4	1	5	1	0	1
19	8,16	41,42	4	1	5	2	0	2	2	1	3	1	0	1
20	10,16	41,63	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	1	3
21	2,20	42,21	3	0	3	4	0	4	4	0	4	6	0	6
22	4,20	42,63	6	0	6	4	0	4	4	0	4	3	0	3
23	6,20	42,94	3	1	4	2	0	2	2	0	2	2	0	2
24	8,20	43,01	2	0	2	2	1	3	2	0	2	2	0	2
25	10,20	43,04	4	0	4	4	0	4	5	0	5	4	0	4
Sumatoria			69	4	73	70	8	78	69	6	75	72	5	77

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Tiempos de ciclo y conteo de unidades del sujeto 2.

Espacio de almacenamiento	Tiempo de ciclo (T <sub>c</sub> )	Sujeto 2												
		Muestra1			Muestra2			Muestra3			Muestra4			
		OK	RT	Prod										
1	2,4	30,09	2	0	2	3	1	4	5	1	6	3	0	3
2	4,4	32,76	10	0	10	2	0	2	4	2	6	3	0	3
3	2,8	33,47	3	0	3	7	0	7	3	0	3	3	0	3
4	4,8	34,12	2	0	2	2	0	2	2	0	2	4	0	4
5	6,4	34,24	2	0	2	2	0	2	5	0	5	4	0	4
6	8,4	35,69	1	0	1	2	0	2	2	0	2	4	0	4
7	6,8	35,95	4	1	5	2	0	2	4	0	4	3	0	3
8	8,8	36,31	3	0	3	2	0	2	2	0	2	4	0	4
9	2,12	37,28	7	0	7	3	0	3	3	0	3	4	0	4
10	4,12	37,71	4	2	6	2	0	2	2	0	2	4	0	4
11	10,4	38,18	3	1	4	8	0	8	3	0	3	3	0	3
12	6,12	38,20	4	0	4	4	2	6	3	0	3	4	0	4
13	10,8	38,27	0	0	0	2	0	2	3	0	3	3	0	3
14	8,12	38,82	3	0	3	3	0	3	4	1	5	3	0	3
15	10,12	39,90	8	0	8	4	0	4	6	0	6	3	0	3
16	2,16	40,28	0	0	0	2	0	2	2	0	2	2	0	2
17	4,16	40,62	2	0	2	5	0	5	1	0	1	3	0	3
18	6,16	40,77	0	0	0	3	0	3	2	0	2	3	0	3
19	8,16	41,42	2	0	2	2	0	2	3	0	3	2	0	2
20	10,16	41,63	0	0	0	4	0	4	3	0	3	0	0	0
21	2,20	42,21	0	0	0	2	0	2	3	0	3	4	0	4
22	4,20	42,63	4	0	4	2	1	3	4	0	4	3	0	3
23	6,20	42,94	0	0	0	2	0	2	1	0	1	2	0	2
24	8,20	43,01	4	0	4	2	0	2	2	0	2	2	0	2
25	10,20	43,04	6	0	6	4	0	4	3	0	3	2	0	2
Sumatoria			74	4	78	76	4	80	75	4	79	75	0	75

Fuente: elaboración propia

En la tabla 5 y 6 se obtienen los tiempos de trabajo totales TTT y TTB a partir de la suma del tiempo usado en producir unidades en función del TC para cada espacio de almacenamiento.

**Tabla 5.** Tiempos de producción de unidades buenas del sujeto 1.

Espacio	Sujeto 1							
	Muestra1		Muestra2		Muestra3		Muestra4	
	TT	TTB	TT	TTB	TT	TTB	TT	TTB
(2,4)	90,27	90,27	270,81	210,63	90,27	90,27	90,27	90,27
(2,8)	33,47	33,47	66,94	66,94	167,35	133,88	167,35	167,35
(2,12)	111,84	74,56	74,56	74,56	111,84	74,56	111,84	111,84
(2,16)	161,12	161,12	80,56	80,56	80,56	80,56	40,28	40,28
(2,20)	126,63	126,63	168,84	168,84	168,84	168,84	253,26	253,26
(4,4)	65,52	65,52	163,8	163,8	131,04	131,04	131,04	131,04
(4,8)	68,24	34,12	102,36	68,24	136,48	102,36	68,24	68,24
(4,12)	75,42	75,42	75,42	75,42	150,84	150,84	188,55	188,55
(4,16)	40,62	40,62	121,86	81,24	162,48	162,48	243,72	203,1
(4,20)	255,78	255,78	170,52	170,52	170,52	170,52	127,89	127,89
(6,4)	0	0	136,96	136,96	68,48	68,48	136,96	136,96
(6,8)	251,65	251,65	107,85	71,9	35,95	35,95	71,9	71,9
(6,12)	114,6	114,6	76,4	76,4	76,4	76,4	114,6	76,4
(6,16)	81,54	81,54	163,08	122,31	203,85	163,08	40,77	40,77
(6,20)	171,76	128,82	85,88	85,88	85,88	85,88	85,88	85,88
(8,4)	214,14	214,14	71,38	71,38	107,07	107,07	178,45	178,45
(8,8)	36,31	36,31	72,62	72,62	108,93	72,62	72,62	72,62
(8,12)	77,64	77,64	77,64	77,64	77,64	77,64	38,82	38,82
(8,16)	207,1	165,68	82,84	82,84	124,26	82,84	41,42	41,42
(8,20)	86,02	86,02	129,03	86,02	86,02	86,02	86,02	86,02
(10,4)	76,36	76,36	190,9	190,9	76,36	76,36	229,08	152,72
(10,8)	191,35	191,35	76,54	76,54	76,54	76,54	76,54	76,54
(10,12)	39,9	39,9	119,7	79,8	79,8	79,8	39,9	39,9
(10,16)	83,26	83,26	83,26	83,26	83,26	83,26	124,89	83,26
(10,20)	172,16	172,16	172,16	172,16	215,2	215,2	172,16	172,16
<b>TOTAL</b>	<b>2832,7</b>	<b>2676,94</b>	<b>2941,91</b>	<b>2647,36</b>	<b>2875,86</b>	<b>2652,49</b>	<b>2932,45</b>	<b>2735,64</b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 6.** Tiempos de producción de unidades buenas del sujeto 2.

Espacio	Sujeto 2							
	Muestra1		Muestra2		Muestra3		Muestra4	
	TT	TTB	TT	TTB	TT	TTB	TT	TTB
(2,4)	60,18	60,18	120,36	90,27	180,54	150,45	90,27	90,27
(2,8)	100,41	100,41	234,29	234,29	100,41	100,41	100,41	100,41
(2,12)	260,96	260,96	111,84	111,84	111,84	111,84	149,12	149,12
(2,16)	0	0	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56
(2,20)	0	0	84,42	84,42	126,63	126,63	168,84	168,84
(4,4)	327,6	327,6	65,52	65,52	196,56	131,04	98,28	98,28
(4,8)	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	136,48	136,48
(4,12)	226,26	150,84	75,42	75,42	75,42	75,42	150,84	150,84
(4,16)	81,24	81,24	203,1	203,1	40,62	40,62	121,86	121,86
(4,20)	170,52	170,52	127,89	85,26	170,52	170,52	127,89	127,89
(6,4)	68,48	68,48	68,48	68,48	171,2	171,2	136,96	136,96
(6,8)	179,75	143,8	71,9	71,9	143,8	143,8	107,85	107,85
(6,12)	152,8	152,8	229,2	152,8	114,6	114,6	152,8	152,8
(6,16)	0	0	122,31	122,31	81,54	81,54	122,31	122,31
(6,20)	0	0	85,88	85,88	42,94	42,94	85,88	85,88
(8,4)	35,69	35,69	71,38	71,38	71,38	71,38	142,76	142,76
(8,8)	108,93	108,93	72,62	72,62	72,62	72,62	145,24	145,24
(8,12)	116,46	116,46	116,46	116,46	194,1	155,28	116,46	116,46
(8,16)	82,84	82,84	82,84	82,84	124,26	124,26	82,84	82,84
(8,20)	172,04	172,04	86,02	86,02	86,02	86,02	86,02	86,02
(10,4)	152,72	114,54	305,44	305,44	114,54	114,54	114,54	114,54
(10,8)	0	0	76,54	76,54	114,81	114,81	114,81	114,81
(10,12)	319,2	319,2	159,6	159,6	239,4	239,4	119,7	119,7
(10,16)	0	0	166,52	166,52	124,89	124,89	0	0
(10,20)	258,24	258,24	172,16	172,16	129,12	129,12	86,08	86,08
<b>TOTAL</b>	<b>2942,56</b>	<b>2793,01</b>	<b>3058,99</b>	<b>2909,87</b>	<b>2976,56</b>	<b>2842,13</b>	<b>2838,8</b>	<b>2838,8</b>

Fuente: elaboración propia

Finalmente, usando las ecuaciones 1, 5, 6 se calcula A, P y Q respectivamente, y con la ecuación 4 se calcula el OEE, los cuales se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** OEE obtenidos.

	Muestra	%Disponibilidad	%Rendimiento	%Calidad	%OEE
Sujeto 1	1	99,58%	79,02%	94,50%	<b>74,36%</b>
	2	98,64%	82,85%	89,99%	<b>73,54%</b>
	3	99,44%	80,33%	92,23%	<b>73,68%</b>
	4	99,03%	82,26%	93,29%	<b>75,99%</b>
Sujeto 2	1	99,19%	82,40%	94,92%	<b>77,58%</b>
	2	99,33%	85,54%	95,13%	<b>80,83%</b>
	3	98,75%	83,73%	95,48%	<b>78,95%</b>
	4	99,11%	79,56%	100,00%	<b>78,86%</b>

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se obtuvo que el promedio de OEE del Miniload siendo operado por el sujeto 1 es de 74,39%, y el del sujeto 2 es de 79,05 %, mostrando cómo el operario y el cambio de este puede afectar directamente la producción del Miniload y, por consiguiente, el OEE.

Como se puede observar en la Tabla 7, la disponibilidad de todas las muestras excede el 98%, lo cual se debe a que para estas muestras la única pérdida por paros no programados que se tuvo en cuenta fue el tiempo de arranque, el cual es muy poco en

comparación con el tiempo de producción. Así mismo, el factor de calidad muestra valores superiores al 89% que indican que pocas de las unidades producidas fueron fallos de producción o tuvieron que pasar por un proceso de retrabajo.

En cuanto al porcentaje de rendimiento, expresa que no se alcanza la producción ideal por un amplio margen en ambos casos, lo cual se debe, principalmente, a pequeños tiempos de espera entre instrucciones, lo cual podría reducirse con entrenamiento o un algoritmo de almacenamiento más eficiente.

Finalmente, el OEE resultante se puede interpretar a partir de lo descrito en Cercós et al. (2019) y, a partir de las tablas 7 y 8, indicando que la Efectividad Global del Miniload siendo operado por el sujeto 1 es Regular, lo que representa pérdidas económicas considerables y una baja competitividad, en comparación con el sujeto 2, que es Aceptable, lo que representa ligeras pérdidas económicas y una competitividad ligeramente baja.

**Tabla 8.** Niveles OEE.

OEE	Valoración	Descripción
OEE < 65%	Inaceptable	Se producen importantes pérdidas económicas. Muy baja competitividad.
65% < OEE < 75%	Regular	Pérdidas económicas. Baja competitividad.
75% < OEE < 85%	Aceptable	Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
85% < OEE < 95%	Buena	Buena competitividad.
OEE > 95%	Excelencia	Excelente competitividad.

Fuente: Cercós et al. (2019)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante conocer la naturaleza de los datos para saber qué tipo de herramienta se puede utilizar. En primera medida se verificó que los datos de la muestra de producción de cada sujeto tuvieran una distribución normal, lo que se puede hacer a través distintas pruebas, tales como Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk o sesgo y curtosis (Flores-Ruiz et al., 2017). Para este caso se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, obteniendo los resultados de la Tabla 9.

**Tabla 9.** Estadístico W.

	Muestra1	Muestra2	Muestra3	Muestra4
Sujeto 1	0,92517	0,71178	0,87685	0,89967
Sujeto 2	0,91397	0,74216	0,87899	0,81605

Fuente: Elaboración Propia

En este caso se tuvo en cuenta un valor de significancia del 0.05 lo que da un nivel de confianza del 95% y tomando como hipótesis nula  $H_0 =$  "Los datos de las muestras presentan una distribución normal", y como hipótesis alternativa  $H_1 =$  "Los datos de las muestras no presentan una distribución normal". Para esta prueba el valor de contraste o referencia es de 0.918 debido a que la tabla de contraste de Shapiro-Wilk para 25 datos y el valor de significancia escogido sugiere este valor.

Si el valor estadístico  $W$  obtenido de la muestra específica es menor que el valor de contraste, se rechaza la hipótesis nula. Como se puede observar, la mayoría de los datos sugieren que la población no presenta una distribución normal y la única muestra que la presenta está muy cerca al valor límite de referencia, por lo cual se optó por la búsqueda de métodos no paramétricos para el análisis, los cuales son usados para distribuciones libres.

Los datos a analizar corresponden, en primer lugar, a los referentes a la producción realizada durante el proceso por cada sujeto. Esto para comprobar que el método permite recolectar de manera confiable información del gemelo digital, y de esta manera también analizar que los OEE que se obtienen tienen un nivel adecuado de certeza estadística.

Tomando en cuenta los resultados anteriores y aspectos tales como que la cantidad de muestras a analizar son mayores a 2 y, además, se busca analizar las muestras por sujeto (datos pareados). La herramienta estadística seleccionada fue la prueba de Friedman, la cual se recomienda para comparar muestras cuando son 3 o más y estas están relacionadas; esta herramienta se usó para verificar que los datos estaban estadísticamente relacionados.

Para usar esta prueba se planteó como hipótesis nula  $H_0 =$  "Los datos están estadísticamente relacionados", y como hipótesis alterna  $H_1 =$  "Los datos no están estadísticamente relacionados"; además, se asignó un valor de significancia al igual que en el caso anterior de 0.05 y se obtuvo de la tabla de Chi-cuadrado un valor de referencia de 7.815 con un GL de 3.

Para rechazar la hipótesis nula, el valor estadístico  $F_r$  debe ser mayor al valor crítico de la tabla de Chi-cuadrado, como se puede visualizar en la tabla 10 el valor obtenido en cada caso es menor, por lo cual no se puede rechazar la hipótesis nula con un 95% de confiabilidad y se dice que los datos están estadísticamente relacionados.

**Tabla 10.** Estadístico  $F_r$ .

	$F_r$
Sujeto 1	0,480
Sujeto 2	0,276

Fuente: Elaboración Propia

Con base en los resultados obtenidos se pueden concluir que las muestras tomadas están vinculadas con el manejo del usuario y no se ven muy afectadas por la aleatoriedad y errores del método. Las muestras presentan una coherencia estadística que las relaciona y, por tanto, este método basado en el gemelo digital permite realizar una recolección fiable de información.

Por otra parte, el método de cálculo de OEE permite a través del gemelo digital y el estudio del proceso por medio de este, elegir una fórmula de OEE adecuada para el cálculo, por lo que es pertinente analizar si los resultados obtenidos por los sujetos en

las distintas muestras tomadas tienen la suficiente certeza estadística para indicar que la fórmula seleccionada brinda datos confiables.

Debido a que estos resultados de OEE no son suficientes para estimar una distribución; además, al igual que los datos anteriores, están relacionados. Se optó por analizarlos también con la prueba de Friedman, pero esta vez, como el número de individuos a estudiar es menor a 10 se recurre a observar la tabla de valores de significancia para una prueba de Friedman.

Para usar esta prueba se utilizó un valor de significancia de 0.05. En este caso, la hipótesis nula es  $H_0 =$  "Hay relación estadística entre los OEE de los distintos grupos", y la hipótesis alterna es  $H_1 =$  "No existe una relación entre los OEE obtenidos". Se debe tomar el valor del estadístico Fr e ir a la tabla de Friedman para obtener el valor correspondiente, el cual se compara con el valor de significancia y, si es menor a este, la hipótesis se rechaza. Para este caso el valor obtenido de la tabla de Friedman es que se visualiza en la Tabla 11 y, como se observa es mayor, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula.

**Tabla 11.** Estadístico Fr y p-value de OEE.

	Fr
Sujeto 1	0,480
Sujeto 2	0,276

Fuente: Elaboración propia

De estos resultados se puede concluir que existe una relación entre los OEE de los distintos grupos, lo que implica que sí hay confiabilidad en la fórmula seleccionada para el cálculo de OEE por este método.

## CONCLUSIONES

Este trabajo propone un método para el cálculo y análisis de OEE basado en el concepto de un equipo, representado como un gemelo digital, lo que brinda distintos beneficios tanto para la mejora continua del sistema como para las empresas que pueden usar estos prototipos digitales en su estrategia de transformación digital industrial, acercando a los trabajadores por medio de entrenamientos a la digitalización, al tiempo que se mejora la estructura del proceso y se acerca más a una cultura empresarial digital.

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que hay una alta fiabilidad en cuanto al análisis que se puede obtener con base en pruebas de un gemelo digital, debido a que se evidencia certeza estadística en cuanto a los datos recolectados en las distintas pruebas, lo que se puede observar con el análisis estadístico realizado, indicando que los datos recogidos a partir del gemelo digital usando el método propuesto presentan un adecuado grado de confiabilidad, al igual que aquellos obtenidos a partir de la fórmula seleccionada con este método para el cálculo de OEE.

Un aspecto importante al momento de trabajar con simulaciones de este tipo es que, a medida que se aumenta el nivel de detalle o las características que estas poseen, se aumentará el nivel de recursos computacionales necesarios y es probable que,

de acuerdo con el objetivo que se plantee con el gemelo digital en un punto, ya no sea justificable aumentar la fidelidad en los detalles, debido a que los resultados obtenidos podrían ya no variar en la misma proporción con la cual se agregan estos. Además, trabajar con el nivel adecuado de diseño permite reducir el tiempo requerido en el modelado. Por otra parte, el reducir el uso de funciones a las necesarias para el objetivo del análisis también permite aprovechar de mejor manera los recursos.

Este método propuesto a partir de la digitalización del equipo también permite tener una mejor visión del proceso y así elegir de manera adecuada la forma en que se hará el cálculo de OEE debido a que, como se mencionó en este trabajo, no es conveniente aplicar la fórmula general en todos los procesos y existen variaciones más adecuadas para cada uno, como lo fue en el concepto de Miniload propuesto en donde los tiempos de carga y descarga de cada paquete dependían de la ubicación asignada, por lo cual era importante la selección o adecuación de la fórmula a estas peculiaridades.

El uso del gemelo digital desde la fase del concepto de un proyecto permite tener en cuenta o mejorar muchos aspectos, entre ellos algunos a nivel estructural como la ubicación de sensores, soportes para dispositivos, actuadores, el diseño de los distintos mecanismos o partes dentro del sistema y otros como las características de la instrumentación, tales como velocidad en motores, alcance de sensores, rangos en la instrumentación, etc.

El paquete de Siemens PLM representa una gran herramienta para la generación de gemelos digitales debido a su integración y al posible seguimiento en el ciclo de vida del equipo.

Finalmente, se puede concluir que, bajo los parámetros adecuados, así como los indicadores y el método peculiar para cada caso, puede darse una primera estimación del rendimiento de los equipos y una primera evaluación en la parte conceptual al proyecto, sin ser necesario contar con el equipo físico y así poder tomar decisiones con base a dichos datos.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen la colaboración de la empresa Siemens Industry en Colombia y en especial al ingeniero Andrés Mauricio Sandoval, quien confió en la Universidad del Cauca y dispuso las herramientas tecnológicas para el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

Adamenko, D., Kunnen, S., Pluhnau, R., Loibl, A. & Nagarajah, A. (2020). Review and comparison of the methods of designing the digital twin. *Procedia CIRP*, 91, pp. 27 – 32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.146>

Ahuja, I. P. S. & Khamba, J. S. (2008). Assessment of contributions of successful tpm initiatives towards competitive manufacturing. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. <https://doi.org/10.1108/13552510810909966>

Andersson, C. & Bellgran, M. (2015). On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining oee and productivity. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, pp. 144 – 154. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.003>

Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, p. 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>

Büchi, G., Cugno, M. & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, p. 119790. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>

Cercós, M. P., Calvo, L. M. & Domingo, R. (2019). An exploratory study on the relationship of overall equipment effectiveness (OEE) variables and co2 emissions. *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.050>

Cheng, G., Liu, L., Qiang, X. & Liu, Y. (2016). Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. in *2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI)*, (pp. 407–410). <https://doi.org/10.1109/ISAI.2016.0092>

Eynard, B. & Cherfi, Z. (2020). Digital and organizational transformation of industrial systems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, p. 106197. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106197>

Flores-Ruiz, E. Miranda-Novales, M. G. & Villasís-Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación vi: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. *Revista Alergia México*, 64(3), pp. 364–370. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>

ISA (s.f.). *Isa88, batch control*. <https://www.isa.org/standards-andpublications/isa-standards/isa-standards-committees/isa88>

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, pp. 36 – 52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>

Joppen, R., von Enzberg, S., Gundlach, J., Kühn, A. & Dumitrescu, R. (2019). Key performance indicators in the production of the future. *Procedia CIRP*, 81, pp. 759 – 764. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.190>

Liao, Y., Deschamps, F., de Freitas, E. & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), pp. 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>

Marco, C. (2016). *Cómo poner en marcha el oee*. <https://excelencemanagement.wordpress.com/2016/08/02/comoponer-en-marcha-el-oe/>

Martínez-Caro, E., Cegarra-Navarro, J. G. & Alfonso Ruiz, F. J. (2020). Digital technologies and firm performance: The role of digital organisational culture. *Technological Forecasting and Social Change*, 154, p. 119962. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119962>

Mecalux (s.f.). Miniloads mecalux. <https://www.mecalux.com.co/>

Muchiri, P. & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (oee): literature review and practica application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), pp. 3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>

Roda, I. & Macchi, M. (2019). Factory-level performance evaluation of buffered multi-state production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, pp. 226 – 235. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.12.008>

Saarikko, T., Westergren, U. H. & Blomquist, T. (2020). Digital transformation: Five recommendations for the digitally conscious firm. *Business Horizons*. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.07.005>

Schiraldi, M. M. & Varisco, M. (2020). Overall equipment effectiveness: consistency of iso standard with literature. *Computers & Industrial Engineering*, 145, p. 106518. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106518>

Sleich, B., Answer, N., Mathieu, L. & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), pp. 141 – 144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

Shahin, A. & Isfahani, N. G. (2015). Estimating overall equipment effectiveness for continuous production lines: with a case study in Esfahan steel company. *International Journal of Services and Operations Management*, 21(4), pp. 466–478. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2015.070252>

Sohal, A., Olhager, J., O’Neill, P. & Prajogo, D. (2010). Implementation of oee—issues and challenges. *Competitive and sustainable manufacturing products and services*, pp. 1–8.

Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), pp. 118 – 144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>