

Distribución de planta 4.0

Maillmann, Fernando

fmaillma@itba.edu.ar

Instituto Tecnológico de Buenos Aires (Argentina).

De Bernardez, Leopoldo

ldb@itba.edu.ar

Instituto Tecnológico de Buenos Aires (Argentina).

Fecha de recepción RIII: 29/01/2025

Fecha de aprobación RIII: 14/02/2025

RESUMEN

En este trabajo se aborda el diseño de proyectos de implantación de herramientas de captura de datos en tiempo real en planta, también conocidas como tecnologías de Internet Industrial de las Cosas (IIoT por sus siglas en inglés). Estas herramientas son fundamentales para optimizar la gestión de las operaciones industriales. Se discute que una concepción equivocada, que no considere las diferencias clave entre una distribución por proceso y una distribución por producto, puede generar una serie de dificultades que impidan la transformación de los datos obtenidos en información útil para la mejora continua. Se han encontrado diferencias muy significativas: mientras que un monitoreo inicial indicaba un OEE del 88%, la realidad, desconocida hasta entonces, reveló un valor catorce puntos inferior, situándose en el 74%. Esta brecha provoca que no se ataque correctamente la identificación y eliminación de desperdicios (mudas), dificultando la optimización del estado de resultados de la compañía. Se demostrará que la diferencia observada es consecuencia de la incorrecta imputación de retrabajos generados al realizar un seguimiento de la actividad basado en el tiempo de ocupación de los operarios, en lugar de hacerlo sobre el tiempo efectivo en producir unidades buenas de forma continua. Este estudio es de carácter descriptivo y se basó en datos empíricos obtenidos de forma asincrónica durante el año 2023. La investigación se realizó sobre una muestra representativa de una empresa manufacturera especializada en la producción de instrumentos de pesaje comercial para el mercado argentino y latinoamericano.

Palabras clave: IIoT; OEE; Operaciones; Distribución; Industria

Plant Layout 4.0

ABSTRACT

This paper addresses the design of projects for the implementation of real-time data capture tools in plants, also known as Industrial Internet of Things (IIoT) technologies. These tools are essential for optimizing the management of industrial operations. It is discussed that an erroneous conception, which does not consider the key differences between a distribution by process and a distribution by product, can generate a series of difficulties that prevent the transformation of the data obtained into useful information for continuous improvement. Very significant differences have been found: while initial monitoring indicated an OEE of 88%, the reality, unknown until then, revealed a value fourteen points lower, standing at 74%. This gap causes the identification and elimination of waste (mudas) to not be addressed correctly, making it difficult to optimize the company's income statement. It will be shown that the observed difference is a consequence of the incorrect allocation of rework generated when monitoring the activity based on the time of occupation of the operators, instead of doing so on the effective time to produce good units continuously. This study is descriptive in nature and was based on empirical data obtained asynchronously during the year 2023. The research was carried out on a representative sample of a manufacturing company specialized in the production of commercial weighing instruments for the Argentine and Latin American markets.

Keywords: IIOT; OEE; Operations; Distribution; Industry

Layout da Planta 4.0

RESUMO

Este artigo aborda o desenho de projetos para implementação de ferramentas de captura de dados em tempo real em plantas, também conhecidas como tecnologias de Internet Industrial das Coisas (IIoT). Essas ferramentas são essenciais para otimizar a gestão das operações industriais. Argumenta-se que um equívoco, que não considere as principais diferenças entre uma distribuição por processo e uma distribuição por produto, pode gerar uma série de dificuldades que impedem a transformação dos dados obtidos em informações úteis para a melhoria contínua. Foram encontradas diferenças muito significativas: enquanto o monitoramento inicial indicava um OEE de 88%, a realidade, até então desconhecida, revelou um valor quatorze pontos menor, situando-se em 74%. Essa lacuna significa que a identificação e eliminação de desperdícios (mudanças) não são tratadas adequadamente, dificultando a otimização da demonstração de resultados da empresa. Será demonstrado que a diferença observada é consequência da alocação incorreta do retrabalho gerado ao monitorar a atividade com base no tempo de ocupação dos operadores, em vez de fazê-lo com base no tempo efetivo de produção contínua de unidades boas. Este estudo é de natureza descritiva e foi baseado em dados empíricos obtidos de forma assíncrona durante o ano de 2023. A pesquisa foi realizada em uma amostra representativa de uma empresa fabricante especializada na produção de instrumentos de pesagem comerciais para os mercados argentino e latino-americano.

Palavras chave: IIOT; OEE; Operações; Distribuição; Indústria

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia global de equipamiento, conocida internacionalmente como OEE por las siglas en inglés de Overall equipment effectiveness, es un indicador clave de actividad que resume el grado de salud operativa de una organización, ya que se define como la relación de productividad entre la fabricación real y lo que podría fabricarse idealmente (Braglia, Frosolini & Zammori, 2008). Es una forma eficaz de medir la eficiencia de una máquina, una línea de producción o la planta completa. Usualmente forma parte de los tableros de comando de mandos directivos y permite identificar, para diferentes períodos temporales, el correcto funcionamiento de la actividad (Ng Corrales, Lambán, Hernandez Korner & Royo, 2020).

En su denominador usualmente se establece un valor objetivo, el cual puede estar expresado en unidades físicas o en tiempo, mientras que en su numerador se indican las unidades buenas o tiempo efectivo logrado. Valores elevados, cercanos al cien por ciento (100%), serán interpretados como una ausencia de pérdidas, también llamadas mudas según la escuela de la manufactura esbelta, mientras que valores bajos despertarán una alarma que impulsará la toma de acciones correctivas. Ejemplos conocidos de mudas son: retrabajos, sobre procesamientos, generación de material defectuoso o scrap, paros correctivos, entre otros.

Las nuevas tecnologías, enmarcadas en el concepto de Industria 4.0 (Ng Corrales, Lambán, Hernandez Korner & Royo, 2020), han permitido que las PYMES argentinas puedan acceder con mayor rapidez y precisión al conocimiento de los distintos eventos productivos. Si bien publicaciones tales como Travesía 4.0: Hacia la transformación industrial argentina (3) indican que tan sólo una de cada diez empresas tiene implementado algún habilitador tecnológico en sus procesos en la actualidad, se estima que, para principios de 2030, la creciente competencia en los mercados globales impulse al menos una duplicación de este nivel.

Tradicionalmente, la toma de información primaria operativa de planta se efectuaba en base a planillas en papel compuestas por una serie de datos diarios, tales como la identificación por código de la orden de trabajo, seguida por la pieza a fabricar, nombre del operador, turno, cantidad producida y eventos.

Para el caso de producciones continuas con tres turnos ininterrumpidos en serie, se generaban en el mismo sentido tres hojas reporte entregadas por sus respectivos líderes de equipo a la jefatura de producción o gerente de planta. Finalmente, estos datos se volcaban a formato digital en planillas históricas para su posterior procesamiento y generación de indicadores clave (KPI). La desventaja de este método de trabajo es que retrasa la toma de decisiones del mando medio directivo hasta la mañana siguiente, lo que a menudo implica una reacción con hasta 24 horas de demora frente a la aparición de una anomalía.

La incorporación de dispositivos móviles, como tabletas con acceso a Wi-Fi, junto con software de procesamiento de datos de bajo costo, ha permitido a las pequeñas y medianas empresas replantear sus sistemas de información integrados para optimizar sus operaciones.

La baja inversión asociada a estos proyectos, acompañada por la presión accionaria de mejorar los estados de resultados, provocaron que muchas empresas argentinas pusieran sobre la mesa proyectos de recambios tecnológicos antes de lo previsto.

La toma de información operativa tiene carácter sensible, ya que en una gran parte de las organizaciones se encuentra asociada a una tasa de rendimiento productivo (TRP) que se refleja en las remuneraciones quincenales o mensuales del personal en planta. La concepción del sistema de la información integrada (SIG) lleva consigo una gran responsabilidad para la alta dirección, que deberá adecuarse a las realidades de cada actividad para que la misma pueda brindar la información más fidedigna y justa para con su personal.

El presente trabajo busca ilustrar, con un caso real, aspectos de diseño de proyecto de transformación digital que será necesario tener en cuenta para lograr el éxito en su implementación.

Para ello, se analizaron dos tipos de distribución de planta, cada uno con sus particularidades: la distribución por producto, donde la secuencia de las operaciones no es un factor crítico, y la distribución por proceso, predominante en plantas con líneas de producción continua. Un ejemplo del primer caso es un taller mecánico, mientras que dentro del segundo se encuentra una industria de bebidas, donde el proceso de llenado de envases sigue una serie de etapas definidas, desde la disposición de la materia prima hasta la

obtención del producto terminado. Las conclusiones presentadas en este trabajo buscan brindar a las PYMES argentinas una guía más clara para la toma de decisiones en la implementación de estas tecnologías.

2. MARCO TEÓRICO

La Industria 4.0 representa una transformación radical en los procesos de manufactura (Albrieu, Basco, Brest López, De Azevedo, Peirano, Rapetti & Vienni, 2019), impulsada por la integración de tecnologías avanzadas que fusionan el mundo físico con el digital. Este concepto engloba un conjunto de tecnologías, como los sistemas ciberfísicos (CPS) (Frank, Dalenogare & Ayala, 2019), Internet de las Cosas (IoT) (Aouedi, Vu, Sacco, Nguyen, Piamrat, Marchetto & Pham, 2024), la inteligencia artificial (IA) (Leng, Zhu, Huang, Li, Zheng, Zhou & Liu, 2024), la robótica avanzada (Soori, Dastres, Arezoo & Jough, 2024) y la computación en la nube (Javaid, Haleem, Singh & Sinha, 2024). Los CPS permiten monitorear y controlar procesos físicos en tiempo real, creando réplicas virtuales que facilitan la toma de decisiones descentralizada. La IA junto con IoT permite que máquinas y dispositivos se comuniquen y aprendan unos de otros, mejorando la eficiencia y reduciendo errores. La computación en la nube y el análisis de grandes cantidades de datos (Big data) (Udeh, Orieno, Daraojimba, Ndubuisi & Oriekhoe, 2024) ofrecen acceso a vastos volúmenes de información, optimizando la producción y la cadena de suministro. Estas tecnologías se combinan para crear fábricas inteligentes, donde los procesos son más flexibles, personalizados y eficientes. La Industria 4.0 no solo mejora la productividad, sino que también facilita la adaptación rápida a las demandas cambiantes del mercado, posicionándose como un pilar esencial en la evolución hacia un futuro industrial más sostenible y competitivo. El diseño de un proyecto de transformación digital en el contexto de Industria 4.0 requiere un enfoque meticuloso que considere las particularidades de la distribución de planta. Para los dos tipos de distribución consideradas en este trabajo se exploran las potenciales mejoras en la Eficiencia Global de Equipamiento (OEE) que pueden lograrse utilizando las tecnologías aplicadas en Industria 4.0.

La distribución por producto se caracteriza por la disposición de las operaciones en función de los productos fabricados y donde cada producto puede seguir rutas diferentes dentro del taller o fábrica. Este enfoque es común en entornos de manufactura flexible como talleres mecánicos. Dentro de las tecnologías de I4.0 aplicables, las que en principio muestran mayor potencial en este caso serían IoT, análisis de datos y robótica.

Esta tecnología, que también se conoce a nivel industrial como IIoT (Industrial Internet of Things) (Khan, Solvang, & Yu, 2024), se basa en la interconexión de dispositivos y máquinas dentro de un entorno industrial. Esta red de dispositivos conectados permite la recopilación, intercambio y análisis de datos en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones, la optimización de procesos y la mejora de la eficiencia operativa.

Los sensores conectados a la red envían datos con la frecuencia requerida a sistemas centralizados o a la nube, donde es posible analizarlos para identificar patrones, detectar anomalías o predecir fallos. La implementación de sensores conectados puede permitir un monitoreo en tiempo real del estado de las máquinas y herramientas, mejorando la capacidad de respuesta ante fallos y optimizando el mantenimiento preventivo.

En cuanto al análisis de datos, la recolección de datos operativos, potenciada por la utilización de recursos de IoT y su análisis mediante herramientas de machine learning, permite identificar patrones que posibilitan la mejora continua, reduciendo tiempos muertos y mejorando la calidad del producto.

Por otra parte, la integración de robots, especialmente los colaborativos (cobots) puede aumentar la flexibilidad operativa, permitiendo una reconfiguración rápida de las líneas de producción para adaptarse a las variaciones en la demanda.

En una distribución por producto, la implementación de estas tecnologías puede entonces reducir significativamente los tiempos de inactividad no planificados mediante el mantenimiento predictivo, aumentando la disponibilidad de los equipos. La calidad también se ve beneficiada por el análisis de datos en tiempo real, que permite detectar defectos de manera temprana. Sin embargo, la eficiencia del conjunto podría no mejorar tan significativamente debido a la naturaleza variable y personalizada de la producción.

Por otra parte, La distribución por proceso es común en industrias con líneas de producción continua, como la industria de bebidas, donde el producto sigue una secuencia específica de operaciones. Las tecnologías que tendrían mayor impacto positivo en este caso serían IoT, automatización y control avanzado, desarrollo de gemelos digitales (Tao, Wang & Nee, 2019) y digitalización de la cadena de suministro.

IoT permite obtener continuamente datos de los equipos. La automatización mediante controladores analógicos y PLCs integrados en sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (Nechibvute & Mafukidze, 2024), junto con el procesamiento de la información mediante algoritmos de machine learning, permite un control preciso y adaptable de la línea de producción, optimizando cada etapa del proceso. También se pueden desarrollar herramientas de machine learning para mantenimiento predictivo aprovechando información obtenida mediante IoT.

Los gemelos digitales, particularmente útiles en plantas con distribución por proceso pueden simular la operación completa de la línea de producción, permitiendo probar cambios y simular situaciones de contingencia sin interrumpir la producción real. Esto mejora la planificación y reduce riesgos.

La digitalización de la cadena de suministro permitiría una coordinación más eficiente entre el aprovisionamiento de materias primas y la producción, asegurando el cumplimiento de la planificación y mejorando la eficiencia.

Comparando los efectos de la implementación de tecnologías de I4.0 en la OEE encontramos que, si la distribución es por producto, en principio parece posible lograr una mejora en la disponibilidad de los equipos y la calidad de los productos, pero solo un impacto moderado de la eficiencia. Por otra parte, si la distribución es por proceso podría lograrse en una mejora tanto en la disponibilidad de equipos, como en la calidad de producto y la eficiencia, resultando por lo tanto en una optimización global de la OEE.

3. EL PRODUCTO

El producto que se analiza en este trabajo responde al mercado de soluciones de pesaje electrónico, abordando tres grandes líneas de clientes: comerciales, industriales y personas.

Podemos decir que es un producto de manufactura compleja porque engloba diferentes etapas compuestas por: (1) una parte electrónica, que requiere equipamientos de manufactura con tecnología sofisticada, (2) otra parte de cableado interno en lo referido a alimentación eléctrica y comunicación y (3) piezas plásticas tercerizadas producidas mediante moldeo por inyección con herramientas propios para conformar el esqueleto de soporte para el ensamblaje del producto final.

4. EL MERCADO

La empresa bajo estudio, en adelante Empresa X, comercializa el 70% de su producción en el mercado local y exporta el 30% restante a países de Latinoamérica, con Brasil y México como principales destinos. Dado el alto nivel de exigencia en términos de calidad, sus soluciones deben cumplir con estrictos estándares y controles productivos para minimizar fallas eléctricas, de diseño y funcionales.

Además, las regulaciones eléctricas establecidas por la IEEE, junto con los requisitos de las normas ISO 9001 y 14001, imponen elevados estándares que deben ser cumplidos por las distintas áreas de la empresa.

5. EL PROCESO PRODUCTIVO

En la figura 1 se presenta esquemáticamente el lay Out de la planta donde se muestran los diferentes sectores operativos.

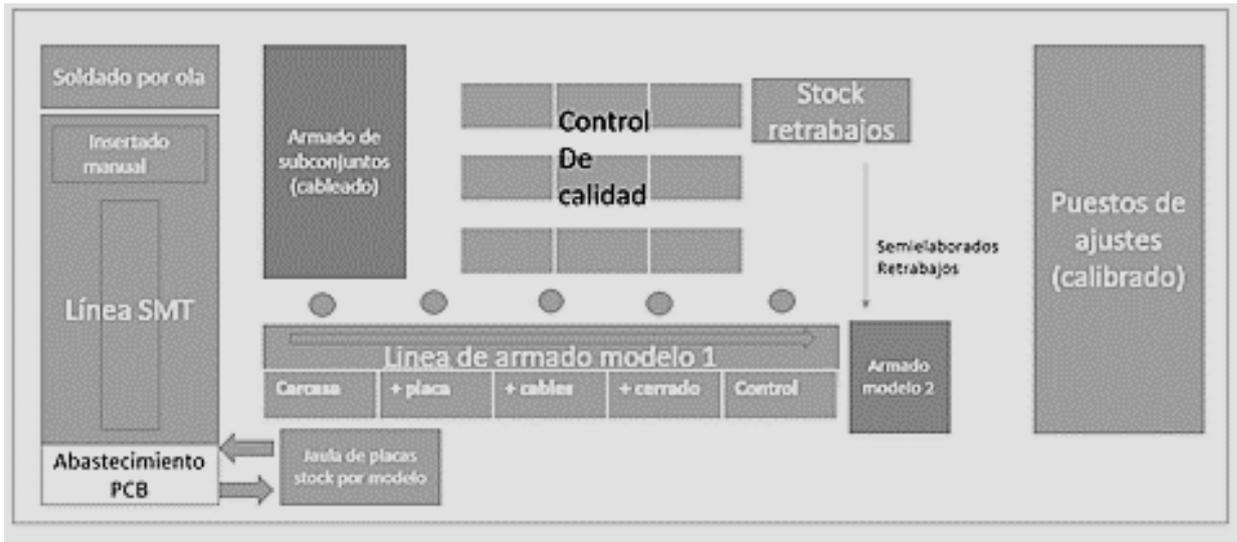


Figura 1 Lay Out de Planta

5.1 Área de soldadura

La nave productiva cuenta con un área de electrónica organizada en una línea continua de producción. El proceso inicia con el abastecimiento y almacenamiento de circuitos impresos (PCBs), diseñados previamente por el Departamento de Ingeniería y cuya fabricación es tercerizada a proveedores externos en Buenos Aires. Una vez recepcionados por el área de logística, los PCBs son sometidos a un control de calidad antes de ser utilizados en la producción.

Según el modelo y lote de fabricación, las placas son suministradas a la etapa de tecnología de montaje superficial (SMT), donde se les aplica un recubrimiento de flux, una pasta compuesta por estaño y plomo que facilita la posterior inserción de componentes electrónicos a alta velocidad (aproximadamente cinco por segundo). Estos componentes, de pequeño tamaño y peso, incluyen chips SMD, resistencias y diodos.

Para finalizar, sobre una línea continua *conveyor* los PCBs ya insertados y bañados por la mezcla de soldadura pasan a una fase de horneado a altas temperaturas, alrededor de los 250°C, para finalmente enfriarse y ser depositados en *magasines* como productos semielaborados.

Posteriormente, dichas placas procesadas por la SMT son abastecidas por los operarios del área, pasando a una siguiente etapa de inserción manual de componentes a los que llamaremos “pesados”, tales como capacitores, *switchs* de alimentación, entre otros.

La inserción manual es acompañada por la soldadura con estaño aplicada por lápices con puntas de calentamiento eléctrico. Una vez que se finaliza dicha operación con los componentes “pesados”, se pasa a una siguiente etapa llamada soldadura por olas, en donde las placas son llevadas y trasladadas por cinta continua a un baño de estaño tipo cascada para terminar de asegurar la fijación de las partes en la placa PCB.

Para finalizar, las placas son recuperadas y llevadas a estaciones de control donde los diversos circuitos son testeados en probadores equipados con programas diseñados específicamente para esta función por parte del Equipo de Ingeniería.

Una vez que se asegura que las placas funcionen correctamente, son depositadas fuera del área de soldadura en un rack compuesto por gavetas plásticas de almacenaje con separadores para ser tomadas por el sector productivo de armado de balanzas en un paso posterior.

5.2 Zona de armado de cables

El siguiente semielaborado productivo que debe ser preparado para el armado de las balanzas previamente a su ensamblaje corresponde a los cables, los cuales son de diferentes diámetros según el amperaje que deban soportar, en el caso de los de alimentación, y de diferente número de pines, para el caso de aquellos destinados a la comunicación de información a ser traducida como datos de lectura en los visores del equipo (pantalla LCD) para el cliente final.

En todos los casos, los cables se componen tanto por filamentos como terminales de diferentes tipos y modelos.

Los operarios especializados en el armado de cables seleccionan los distintos insumos almacenados en gavetas y distribuidos en sus estaciones de trabajo. Durante el ensamblaje, realizan pruebas de calidad para garantizar el correcto funcionamiento, poniendo especial atención en el crimpado de los terminales para evitar falsos contactos y asegurar la durabilidad del producto.

Una vez finalizado el proceso, los cables terminados se agrupan en cantidades estándar mediante bandas elásticas y se almacenan en gavetas destinadas a productos semielaborados, quedando listos para su posterior utilización.

5.3 Línea de armado por proceso – Producto TIPO A

El objetivo de este trabajo es analizar y distinguir dos diseños de flujo de proceso. En esta ocasión, nos enfocaremos en la línea continua de montaje para el ensamblaje de balanzas, cuya dotación de operarios puede ajustarse según el nivel de productividad requerido.

En la Empresa X, esta línea de montaje suele contar con un equipo de entre cuatro y seis operarios distribuidos de manera contigua. Cada trabajador ensambla componentes específicos según su posición en la línea, de modo que el producto se va conformando progresivamente, desde la primera estación hasta la última etapa de ajuste.

Este diseño de línea continua por proceso se aplica a los productos de mayor demanda mensual, cuya producción justifica una capacidad aproximada de 200 unidades por turno de ocho horas. En adelante, nos referiremos a este producto como TIPO A.

5.4 Estación de armado por producto – Producto TIPO B

Por otro lado, los productos TIPO B presentan un volumen de producción mensual que no justifica la inversión ni la instalación de una línea de manufactura continua. En su lugar, se organizan en lotes de producción más reducidos, con un promedio de 20 unidades por turno de ocho horas.

La distribución de este proceso se asemeja a la de un taller, donde las secuencias operativas dentro de un mismo turno pueden alternarse con otras estaciones según las necesidades de la planta en cada momento. Esto da lugar a un flujo de trabajo menos lineal y más flexible, permitiendo que, según la demanda operativa, se prioricen diferentes actividades, como la fabricación de semielaborados o el retrabajo de productos provenientes de un buffer de reparaciones o con insumos pendientes.

5.5 Puestos de ajuste y calibrado

La etapa de ajuste y calibración es una de las fases finales antes de que el producto sea considerado terminado. En esta instancia, los equipos provenientes de las líneas de ensamblaje TIPO A o TIPO B son sometidos a pruebas de funcionamiento para garantizar el cumplimiento de los estándares de pesaje exigidos por el mercado.

El proceso consiste en verificar que cada punto de contacto con el objeto a pesar—en sus diferentes esquinas y en el centro—arroje valores consistentes y precisos, expresados en kilogramos (kg) y gramos (g). Para ello, se emplean pesas cilíndricas patrón, seleccionadas según la capacidad de cada modelo, con la asistencia de una pluma mecánica que facilita su manipulación y mejora la ergonomía del operario a cargo.

Una vez completados los ajustes y la calibración, el software del equipo valida electrónicamente el procedimiento, generando automáticamente un resultado de aprobación o desaprobación del funcionamiento del dispositivo.

5.6 Control de calidad

El proceso productivo está certificado bajo normas ISO 14011 e ISO 9001.

Dentro del Manual de Calidad se exige que los equipos, una vez calibrados, sean dispuestos en buffers de estacionamiento por un período de 48 horas, de modo de poder detectar durante este tiempo posibles desperfectos eléctricos de apagado o intermitencia.

Una vez cumplido este lapso, el equipo es acondicionado en su correspondiente embalaje de cartón y partes amortiguadoras, con el fin de que no se dañe al momento de distribución y transporte al intermediario o cliente final. A su vez, es identificado por una etiqueta con su respectivo número de serie para asegurar la correcta trazabilidad (Schuitemaker & Xu, 2020).

Por otro lado, el equipo es sometido por muestreo a diferentes tipos de ensayos, dentro de los cuales los funcionales adquieren mayor relevancia.

6. ANÁLISIS DEL OEE

La eficiencia operativa se monitorea en la empresa mediante el OEE por ser un indicador clave en la gestión de operaciones. Existen dos enfoques principales para su cálculo, a saber:

6.1 Cálculo del OEE

Existen dos enfoques principales para su cálculo:

Seguimiento por unidades: se divide la cantidad de unidades buenas producidas por la cantidad teórica que debería haberse fabricado según el ciclo estándar definido.

Seguimiento por tiempo: se mide la relación entre el tiempo real consumido y el tiempo teórico requerido, generalmente expresado en minutos u horas.

La Empresa X bajo estudio eligió en una primera instancia el seguimiento por unidades.

6.2 Metodología

Los datos se obtuvieron de los registros de la empresa que fueron volcados a la base de datos en formato digital a partir de las planillas de turno. Se tomaron los datos generados durante todo el año 2023. En la Tabla 1 se detallan las [UN plan] como aquellas unidades planificadas, [UN realizadas] como las tomadas buenas según control de calidad, [UN capacidad] como la máxima cantidad de unidades standard que podrían fabricarse. Si las [UN plan] difieren de las [UN capacidad], significará que hubo parte del mes no aprovechado, por ejemplo, por falta de demanda comercial, mientras que las diferencias que se obtengan entre [UN realizadas] y [UN plan], indicarán ineficiencias en la operación, ya que hubo carga comercial, pero por algún motivo, sea productivo, humano, técnico, no se realizó lo acordado.

Según el tiempo de ciclo definido, las UN realizadas se pueden traducir en [Suma de TO], que corresponde al Tiempo Operativo insumido en realizar las piezas reales buenas y es, a fin de cuentas, el tiempo utilizado de manera efectiva. Dividiendo [Suma de TO] por el tiempo total disponible, sin considerar mantenimientos y paradas preventivas o anticipadas asumidas, dará como resultado el OEE calculado en función del tiempo en lugar de las unidades producidas.

La tabla 1 muestra los datos obtenidos en cada mes del año 2023. Se incluyen las unidades planificadas, las realizadas, la capacidad de producción, la suma de tiempo operativo (TO), los tiempos perdidos por fallas de

mantenimiento (MNTO) y por falta de abastecimiento (ABAS), así como la eficiencia porcentual según el cálculo de OEE.

Tabla 1 Resultados operativos en 2023 por mes

Mes	UN plan	UN realizadas	UN capacidad	Suma de TO	MNTO	ABAS	RETRAB	Suma Fallas	% Tasa paros MNTO	% Eficiencia
2023	51.023	45.017	61.907	418.134	7.457	26.708	0	34.165	8,17%	88%
1	2.782	2.555	6.493	36.960	702	2.365	0	3.068	8,30%	92%
2	3.346	2.648	4.719	26.900	215	1.695	0	1.910	7,10%	79%
3	3.480	2.985	6.565	33.320	1.133	2.083	0	3.215	9,65%	86%
4	4.101	3.522	5.148	34.572	1.106	2.143	0	3.250	9,40%	86%
5	1.914	1.693	2.771	31.324	470	1.723	0	2.193	7,00%	88%
6	5.947	5.497	6.136	31.723	571	2.062	0	2.633	8,30%	92%
7	6.194	5.407	6.486	46.900	844	3.283	0	4.127	8,80%	87%
8	4.212	3.755	4.360	40.621	284	2.640	0	2.925	7,20%	89%
9	5.310	4.932	5.490	37.440	861	2.059	0	2.920	7,80%	93%
10	6.114	5.185	6.178	38.979	1.130	2.339	0	3.469	8,90%	85%
11	5.147	4.758	5.127	35.498	248	3.017	0	3.266	9,20%	92%
12	2.476	2.080	2.434	23.897	96	1.434	0	1.529	6,40%	84%

El OEE fue elevado, con un valor promedio anual del 88% y un volumen de 45.017 unidades producidas. Es importante tener en cuenta, a modo de referencia, que valores superiores al 80% son considerados buenos a nivel industrial.

Las fallas registradas en los equipos totalizaron 7.457 minutos, mientras que los inconvenientes relacionados con el abastecimiento de insumos alcanzaron 26.708 minutos, generando paros productivos debido a la imposibilidad de continuar con las tareas en tiempo y forma.

Cabe destacar que en la columna de retrabajos [RETRAB] se registró 0 minutos. Esto se debe a que los retrabajos se realizaron en el puesto asignado a los productos TIPO B. Dado que estas actividades no interrumpieron el flujo de trabajo continuo en la línea de productos TIPO A, no fueron registradas ni consideradas como paros al calcular el OEE de dicha línea.

7. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se considera en este trabajo el caso de una línea operando con una distribución por proceso y uno o más puestos de trabajo que tienen una distribución por producto. Para el caso en análisis la forma más eficiente de aplicar tecnologías con impacto positivo en la empresa es digitalizar las operaciones incorporando Internet de las cosas (IoT).

Para el caso en análisis se propone implementar una solución de identificación de productos en proceso utilizando códigos de barras. A cada producto se le asigna un código de barras único al inicio del proceso de producción. Este código de barras contendrá información sobre el código de producto (2 dígitos), fecha (4 dígitos), hora y minuto de fabricación (4 dígitos). En el momento en que comienza el montaje de un producto se genera una etiqueta autoadhesiva mediante una impresora de códigos de barra. La etiqueta se pega en el chasis del equipo que se está montando y lo lee el primer operario de la línea actualizando la base de datos

con la información incluida en el código. Además, ingresa su código de identificación personal y la hora de finalización de la tarea. Los códigos de barras pueden leerse en diferentes etapas del proceso. A lo largo de la línea de producción, se instalan escáneres en los puntos donde se realizan las diferentes operaciones que leerán el código de barras y actualizarán la información de la base de datos como en el primer caso. Esto permite registrar en qué etapa del proceso se encuentra cada producto. Si un producto necesita ser reprocesado, debido a un fallo o defecto detectado, la base de datos se actualizará con esta nueva información permitiendo un seguimiento continuo del estado del producto.

El sistema de identificación de códigos de barras puede integrarse con un Sistema de Ejecución de Manufactura (MES) para un control exhaustivo de la producción. Esto permite que todos los datos recopilados se almacenen y analicen, facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

8. BENEFICIOS DE LA SOLUCIÓN PLANTEADA

Los beneficios de la solución propuesta se pueden resumir como:

- Permite rastrear cada producto desde los insumos hasta el producto terminado, incluyendo cualquier etapa de reprocesamiento.
- Minimiza los errores humanos en la identificación y clasificación de productos.
- Mejora la eficiencia del proceso al permitir una gestión más ágil y precisa de los flujos de trabajo, ya que asegura que se mantenga un control preciso sobre cada producto en cada fase del proceso de fabricación, mejorando tanto la trazabilidad como la calidad del producto final.

A partir de los datos recopilados en la base, presentados en la Tabla 1, se puede calcular el OEE en el contexto de la solución propuesta considerando tres factores clave: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad (Ullah, Molla, Siddique, Siddique & Abedin, 2023). Las ecuaciones 1 a 4 muestran cómo realizar el cálculo.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad} \quad (1)$$

La disponibilidad mide cuánto tiempo estuvo realmente disponible la máquina o el proceso para producir en comparación con el tiempo programado.

$$\text{Disponibilidad} = T_o / T_p \quad (2)$$

Siendo:

T_o el Tiempo de operación real o tiempo en que la máquina estuvo en funcionamiento.

T_p el Tiempo Programado, o tiempo total disponible para la producción.

En este caso, se debe considerar el tiempo que la máquina estuvo en producción

El rendimiento mide la velocidad a la que se produce en comparación con la capacidad máxima teórica.

$$\text{Rendimiento} = C_R / C_T \quad (3)$$

Siendo:

C_R la cantidad real producida, o el número total de unidades producidas

C_T la cantidad teórica máxima, o número de unidades que deberían haberse producido en ese tiempo, basado en la capacidad teórica de la máquina.

Calidad

La calidad mide la proporción de productos que cumplen con las especificaciones respecto al total de productos fabricados.

$$\text{Calidad} = U_B / U_T \quad (4)$$

Siendo:

U_B la cantidad de unidades buenas o productos que cumplen con las especificaciones sin necesidad de reprocesamiento.

U_T el total de unidades producidas, que incluye todas las unidades, tanto las buenas como las defectuosas que requieren reprocesamiento.

Un OEE menor al 100% significa que el sistema está funcionando por debajo de su capacidad óptima. Este indicador revela oportunidades de mejora en disponibilidad, rendimiento y calidad, y permite tomar decisiones informadas para optimizar el proceso.

9. ANÁLISIS DE OEE CON PROCESO CORREGIDO

A continuación, aplicaremos la solución propuesta para dimensionar cuál es el efecto de considerar los retrabajos como tiempo improductivo. En este sentido, aun cuando el operario esté trabajando y aprovechando su tiempo para transformar un producto defectuoso en producto terminado de la calidad esperada, a nivel de la operación general consideraremos que el tiempo utilizado es un retrabajo y no debe incluirse como tiempo operativo (TO), ya que es una tarea no deseada.

La Tabla 2 muestra los datos presentados en la Tabla 1. Incluye el tiempo utilizado en retrabajos, los que se descuentan del tiempo operativo de la línea de fabricación de producto TIPO A, ya que fueron realizados por operarios asignados a la fabricación de productos TIPO B.

Los resultados obtenidos son alarmantes, pasando de un OEE de TABLA 1 del 88% anual a 12 puntos menos en TABLA 2 del 74%. Este cálculo pone en evidencia que existen ineficiencias en la línea de productos TIPO A que quedan ocultas si el cálculo del OEE se hace en forma incorrecta.

Tabla 2 Resultados operativos 2023 corregidos

Mes	UN plan	UN realizadas	UN capacidad	Suma de TO	MNTO	ABAS	RETRAB	Suma Fallas	% Tasa paros MNTO	% Eficiencia
2023	51.023	45.017	61.907	353.386	7.457	26.708	64.288	98.453	23,55%	74%
1	2.782	2.555	6.493	31.046	702	2.365	5.914	8.981	24,30%	77%
2	3.346	2.648	4.719	24.614	215	1.695	2.287	4.196	15,60%	72%
3	3.480	2.985	6.565	28.155	1.133	2.083	5.165	8.380	25,15%	73%
4	4.101	3.522	5.148	28.522	1.106	2.143	6.050	9.300	26,90%	71%
5	1.914	1.693	2.771	25.372	470	1.723	5.952	8.144	26,00%	71%
6	5.947	5.497	6.136	27.123	571	2.062	4.600	7.233	22,80%	79%
7	6.194	5.407	6.486	38.693	844	3.283	8.208	12.335	26,30%	72%
8	4.212	3.755	4.360	35.137	284	2.640	5.484	8.409	20,70%	77%
9	5.310	4.932	5.490	32.573	861	2.059	4.867	7.788	20,80%	81%
10	6.114	5.185	6.178	33.327	1.130	2.339	5.652	9.121	23,40%	73%
11	5.147	4.758	5.127	28.753	248	3.017	6.745	10.010	28,20%	75%
12	2.476	2.080	2.434	20.073	96	1.434	3.824	5.353	22,40%	71%

10. CONCLUSIONES

Se ha demostrado en el presente trabajo que conceptualizar la operación de planta desde el punto de vista del tiempo de trabajo del operario es un error, que deriva en no tomar acciones correctivas sobre los efectos contrarios de destinar mano de obra a retrabajos, con su respectiva pérdida económica originados por horas de mano de obra directa no productiva en los resultados de la empresa.

Una vez corregida la configuración de la aplicación de registro de fallas utilizando recursos de IIOT como facilitador de trazabilidad de operaciones, en conjunto con las etiquetas de código de barra, se registraron a nivel anual 64.288 minutos imputados a tareas no productivas en el puesto TIPO B, distribución por producto, lo que se tradujo en corregir el valor calculado de OEE de 88% a 74%.

Cuando un operario de un puesto TIPO B realizaba tareas de retrabajo de productos TIPO A, el evento quedaba evidenciado en la base de datos por la lectura del código de barras, el que se había asignado al producto cuando se iniciaba su producción. De esta forma, el tiempo dedicado no se incluía en el tiempo operativo total de la línea. Se ajustaron las fórmulas de cálculo para diferenciar dos rendimientos: la tasa de ocupación del operario, por un lado, y la tasa de rendimiento de planta por el otro, en donde la primera toma como válido el uso de tiempo para realizar retrabajo y la segunda lo resta del numerador del KPI (OEE).

La forma de identificar un producto en estado bueno continuo, y en estado retrabajo fue asociar dichos estados al número de serie vinculados al código de barras (único).

De no haberse realizado las correcciones mencionadas, la eliminación de la causa raíz de los retrabajos se habría retrasado, asumiendo erróneamente que la operación se mantenía dentro de parámetros aceptables.

11. REFERENCIAS

- Albrieu, R., Basco, A. I., Brest López, C., De Azevedo, B., Peirano, F., Rapetti, M., & Vienni, G. (2019). Travesía 4.0: hacia la transformación industrial argentina. <https://doi.org/10.18235/0001731>
- Aouedi, O., Vu, T. H., Sacco, A., Nguyen, D. C., Piamrat, K., Marchetto, G., & Pham, Q. V. (2024). A survey on intelligent Internet of Things: Applications, security, privacy, and future directions. *IEEE communications surveys & tutorials*.
- Braglia, M., Frosolini, M., & Zammori, F. (2008). Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML) An integrated approach to assess systems performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(1), 8-29.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies". *International journal of production economics*, 210, 15-26.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Sinha, A. K. (2024). Digital economy to improve the culture of industry 4.0: A study on features, implementation and challenges. *Green Technologies and Sustainability*, 100083.
- Khan, N., Solvang, W. D., & Yu, H. (2024). Industrial Internet of Things (IIoT) and Other Industry 4.0 Technologies in Spare Parts Warehousing in the Oil and Gas Industry: A Systematic Literature Review. *Logistics*, 8(1), 16.
- Leng, J., Zhu, X., Huang, Z., Li, X., Zheng, P., Zhou, X. & Liu, Q. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 349-363.
- Nechibvute, A., & Mafukidze, H. D. (2024). Integration of scada and industrial iot: Opportunities and challenges. *IETE Technical Review*, 41(3), 312-325.
- Ng Corrales, L. D. C., Lambán, M. P., Hernandez Korner, M. E., & Royo, J. (2020). "Overall equipment effectiveness: Systematic literature review and overview of different approaches". *Applied sciences*, 10(18), 6469.
- Schuitemaker, R., & Xu, X. (2020). "Product traceability in manufacturing: A technical review". *Procedia cirp*, 93, 700-705.
- Soori, M., Dastres, R., Arezoo, B., & Jough, F. K. G. (2024). Intelligent robotic systems in Industry 4.0: A review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2024007-0.

- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). "Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison". *Engineering*, 5(4), 653-661.
- Udeh, C. A., Orieno, O. H., Daraojimba, O. D., Ndubuisi, N. L., & Oriekhoe, O. I. (2024). Big data analytics: a review of its transformative role in modern business intelligence. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(1), 219-236.
- Ullah, M. R., Molla, S., Siddique, I. M., Siddique, A. A., & Abedin, M. M. (2023). "Optimizing performance: a deep dive into overall equipment effectiveness (OEE) for operational excellence". *Journal of industrial mechanics*, 8(3), 26-40.