



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Mapa de ruta con enfoque 4.0 para un proceso de ensamble de un dispositivo didáctico en una célula de manufactura

Route map with a 4.0 approach for a didactic device assembly process of a teaching device in a manufacturing cell

Rodríguez-Alvarado, L.W.*, Loyo-Quijada, J., Silva-Rivera, U.S., Robles-Solís, A.M., González-González, P.M.

Departamento de Sistemas; Universidad Autónoma Metropolitana, UAM-Azacapotzalco; C.P. 02200, CDMX, México.

lwra@azc.uam.mx*; lqj@azc.uam.mx; ussr@azc.uam.mx; al2173074712@azc.uam.mx;
al2193041924@azc.uam.mx

Innovación tecnológica: Metodología para la implementación de tecnología 4.0 en un contexto industrial.

Área de aplicación industrial: Área de producción, tecnología avanzada y desarrollo de nuevos procesos.

Recibido: 10 enero 2025

Aceptado: 06 agosto 2025

Abstract

This work is an adaptation and evaluation of a roadmap for implementing assembly process with a 4.0 approach for a didactic device, representative of a scalable model in industrial applications. The proposed five stage roadmap, considers the characteristics and constraints of the process and establishes the technological requirements of an integrated cyber-physical system, in which the operator acts as a process manager for timely decision-making. To validate the proposed roadmap, the transition from a manual assembly process to a semi-automatic one was analyzed, considering replicable characteristics in a real production environment, such as the impact on process performance. The results showed a significant improvement in the overall equipment effectiveness by 20% and in the quality of the final product as in-process inventory by 100%, respectively, despite a 23% reduction in production capacity. The proposed methodology proved to be effective in achieving an intermediate level of maturity in the implementation of Industry 4.0, even in a small-scale environment as is the analyzed case involving an assembly process. The proposed roadmap highlights that, based on the definition of interest criteria, technological needs can be

established, and for the final evaluation, a comparative criterion focused on the added value of the process is suggested. Finally, to address the challenges of cultural transition and expert knowledge, a combination of expert knowledge and performance of those involved together with technological advantages is suggested. The results of this study suggest that the implementation of 4.0 assembly processes can generate significant benefits in terms of efficiency, quality, modularity, and flexibility.

Key words: Industry 4.0, Road map, Assembly Process, Added value.

Resumen

El presente trabajo es una adaptación y evaluación de un mapa de ruta para la implementación de un proceso de ensamble con enfoque 4.0 de un dispositivo didáctico, representativo de un modelo escalable en aplicaciones industriales. El mapa de ruta propuesto conformado por cinco etapas considera las características y restricciones del proceso y establece los requerimientos tecnológicos de un sistema ciber-físico integrado, en el que el operador actúa como gestor del proceso para la toma de decisiones oportuna. Para validar el mapa propuesto se analizó la transición del proceso de ensamble manual a uno semi automático considerando características replicables en un entorno real de producción como son afectaciones en el desempeño del proceso. Los resultados mostraron una mejora significativa en la eficiencia total del equipo en un 20% y en la calidad del producto final como inventario en proceso en un 100% respectivamente, esto a pesar de una reducción en la capacidad de producción de un 23%. La metodología propuesta demostró ser efectiva para alcanzar un nivel de madurez intermedio en la implementación de Industria 4.0, incluso en un entorno de pequeña escala como es el caso analizado en el que se involucra un proceso de ensamble. En la propuesta del mapa de ruta se resalta que, a partir de la definición de criterios de interés se pueden establecer las necesidades tecnológicas, y para la evaluación final, se sugiere un criterio comparativo enfocado al valor agregado del proceso. Por último, para dar respuesta a los retos de transición cultural y conocimiento experto, se sugiere una combinación del conocimiento experto y desempeño de los involucrados en conjunto con las ventajas tecnológicas. Los resultados de este estudio sugieren que la implementación de procesos de ensamble 4.0 puede generar beneficios significativos en términos de eficiencia, calidad, modularidad y flexibilidad.

Palabras clave: Industria 4.0, Mapa de ruta, Proceso de ensamble, Valor agregado.

1. Introducción

El concepto de industria 4.0 se basa en la integración de las tecnologías de la información y componentes físicos, también conocidos como sistemas ciber-físicos; todo esto con la finalidad de realizar una fábrica digital, inteligente y sostenible (Zhou et al., 2015).

Existen diferentes planteamientos entorno al tipo de tecnología que se debe de implementar en los procesos para lograr el enfoque 4.0, por ejemplo, Cotrino et al. (2020) mencionan que se debe de considerar el internet de las cosas y la realidad virtual como pilares claves para lograr una adecuada

implementación, esto debido a que permite la colaboración entre equipos y manejo de datos para la toma de decisiones oportuna. Xu et al (2018), Chen et al. (2017), Saturno et al. (2018) y Al-Ruithe et al. (2018) mencionan que no es del todo posible, lograr una adecuada transición a la cuarta revolución industrial sin considerar diferentes pilares al mismo tiempo y que se requiere evaluar las ventajas que ofrecen estas tecnologías por separados, además de considerar los efectos cuando se integran al proceso.

Por otro lado, Vogel-Heuser et al. (2015) establecen que lo importante es incorporar más de una tecnología en distintas etapas de la cadena de valor y medir el impacto en términos de tecnología habilitada en cada etapa. Bajo este mismo contexto Rossella et al. (2023) sugieren que la implementación de herramientas de manufactura esbelta como antecedente, es muy deseable para el desarrollo de industria 4.0 porque permite reducir el trabajo no esencial con la identificación de mudas.

La transición que requiere la industria 4.0 no solo desafía la capacidad de las empresas para innovar, sino también requiere nuevas estrategias y modelos organizacionales, así como cambios en toda la infraestructura física, operaciones, tecnologías de fabricación, recursos humanos y gestión de prácticas (Ghobakhloo, 2018). Es evidente que no se puede establecer un único camino para la transición al enfoque 4.0 por lo que se sugiere que se deben atender diferentes factores y características inherentes al proceso. Lo que es un hecho es que este proceso de implementación implica un cambio gradual y continuo el cual debe ir dirigido por los objetivos estratégicos de la empresa.

Mittal et al (2018), James y Shetty (2020), Shashank et al. (2023) y Carvalho (2024) coinciden en su estudio que, hay un número

limitado de mapa de ruta con enfoque 4.0 que muestre una guía de nivel de madurez, evaluación y requerimientos específicos, enfocados a los desafíos actuales. Este escenario se vuelve aún más complejo cuando se analiza en empresas medianas y pequeñas, ya que presentan barreras muy particulares como la carencia de recursos y de conocimiento, así como el nivel de competitividad que desean alcanzar.

Dossou (2019) explica que algunas de las limitantes para implementar industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas se debe principalmente al contexto cultural, cambios de hábito o la creencia de perder el control en las técnicas actuales, así como la incertidumbre que se crea al considerar automatizar un proceso, lo que implica que el operador se vea reemplazado. Esto coincide con lo analizado por Alessia et al. (2021), Karuppiah et al. (2023) y Tabim et. Al (2024) en donde establecen que uno de los mayores desafíos para lograr una adecuada implementación es la inversión de equipos, dificultad para adquirir y entrenar habilidades internas, adquisición de nuevas competencias, formación específica y la integración de sistemas digitales estadísticos inteligentes en los sistemas de control de fabricación existentes (Goecks et al., 2014). Ostadi et al. (2024) analizan diferentes capacidades según la prioridad de implementación para la integración de la industria 4.0.

Se han desarrollado diferentes enfoques de mapa de ruta para establecer una guía en el proceso de implementación de la industria 4.0 que van desde el análisis estratégico (Ghobakhloo, 2018). hasta análisis más específicos como la identificación del recurso restricción (cuello de botella) Cotrino et al. (2020). Por otro lado, hay quienes toman en cuenta un acompañamiento de las técnicas de mejora continua para lograr una adecuada implementación (Dossou, 2019). De manera

más específica Pinto et al. (2019) recomienda centrarse en la arquitectura de la tecnología a implementar. Xu et. Al (2018) recomiendan no omitir una evaluación del nivel de madurez empresarial para definir la mejor secuencia de implementación. Gomaa (2025) explora la sinergia entre las metodologías Lean y la transformación digital, destacando su impacto en la flexibilidad de la fabricación, la resiliencia de la cadena de suministro y la innovación sostenible. Zamora et al (2024) y Elhusseiny y Crispim (2024) realizan una evaluación de la Industria 4.0 e implementar una transformación digital que pueda afectar indicadores claves de desempeño. De esta manera facilitar la adopción de la I4.0 en el sector manufacturero en el que se debe incluir estrategias interrelacionadas entre los sectores involucrados.

Nayernia et al. 2022 y Da Silva et al. (2024) determinan que, a pesar de que en la literatura hay evidencia de conocimientos descriptivos sobre la ruta a seguir para implementar la amplia gama de tecnologías de industria 4.0, todavía hay una falta de comprensión sobre los procesos de toma de decisiones, ya sea para comprar estas tecnologías a los proveedores o desarrollar algunas de ellas para garantizar la protección del valor y minimizar los riesgos de apropiación indebida del conocimiento. Lo anterior se puede sintetizar en la necesidad de indagar en la identificación de las tecnologías requeridas de acuerdo con una necesidad establecida y la evaluación posterior del impacto de las mismas en el proceso.

La presente investigación está conducida en una adecuación metodológica de un mapa de ruta, la cual definió los pasos para implementar tecnología con enfoque de industria 4.0. La evaluación de la propuesta de cinco etapas se realizó en la transición de un proceso manual a uno semi automático de un dispositivo didáctico. El mapa de ruta planteado, considera las características de un

sistema ciber físico integrado en el que se establecen condiciones de juicio para criterios de calidad en el proceso de inspección, así como la integración de un entorno colaborativo en el proceso de ensamble, en el cual, el operador se convierte en gestor del proceso. Al final, se evalúan los indicadores de interés para analizar el impacto de la implementación de estas tecnologías.

Una de las principales aportaciones de este trabajo radica en que se puede considerar como una estrategia que permite desarrollar paso a paso el proceso de transición de un enfoque manual a uno semi automático, el cual contempla el planteamiento de un análisis puntual para integrar los aspectos tecnológicos a partir de necesidades detectadas y su evaluación en indicadores claves del proceso, como: tiempo de ciclo del proceso, eficiencia, calidad y el enfoque de toma de decisión basada en la gestión de datos por parte del nuevo gestor. Este artículo está organizado de la siguiente manera: la primera sección corresponde a la introducción en donde se muestra la revisión de la literatura de las contribuciones de los distintos mapas de ruta. En la segunda sección se explica el materia y método empleado conformado por cuatro etapas: definición del caso de estudio, arquitectura tecnológica, estrategia tecnológica, conexión y entrenamiento. Posteriormente, en la tercera sección se evaluaron los resultados obtenidos en función a los indicadores claves del proceso. En el apartado de discusión, correspondiente a la cuarta sección se evalúa el impacto de los principales resultados y finalmente, en la quinta sección se plantean las conclusiones que contempla los principales retos y áreas de oportunidad. Esta estructura permite dar respuesta al principal objetivo del estudio en donde se pretende demostrar que por medio de la implementación de procesos de ensamble 4.0 se obtienen beneficios en términos de eficiencia, calidad, modularidad y flexibilidad.

2. Material y método

En este apartado se presenta la adaptación metodológica del mapa de ruta, esto a raíz del análisis del esquema metodológico de cinco

mapas de ruta que desarrollaron diferentes autores (Zhou et al., 2018), (Xu et al., 2018), (Ghobakhloo, 2018), (Dossou, 2019) y (Pinto et al., 2019) para la implementación de las tecnologías con enfoque 4.0, ver Figura 1.

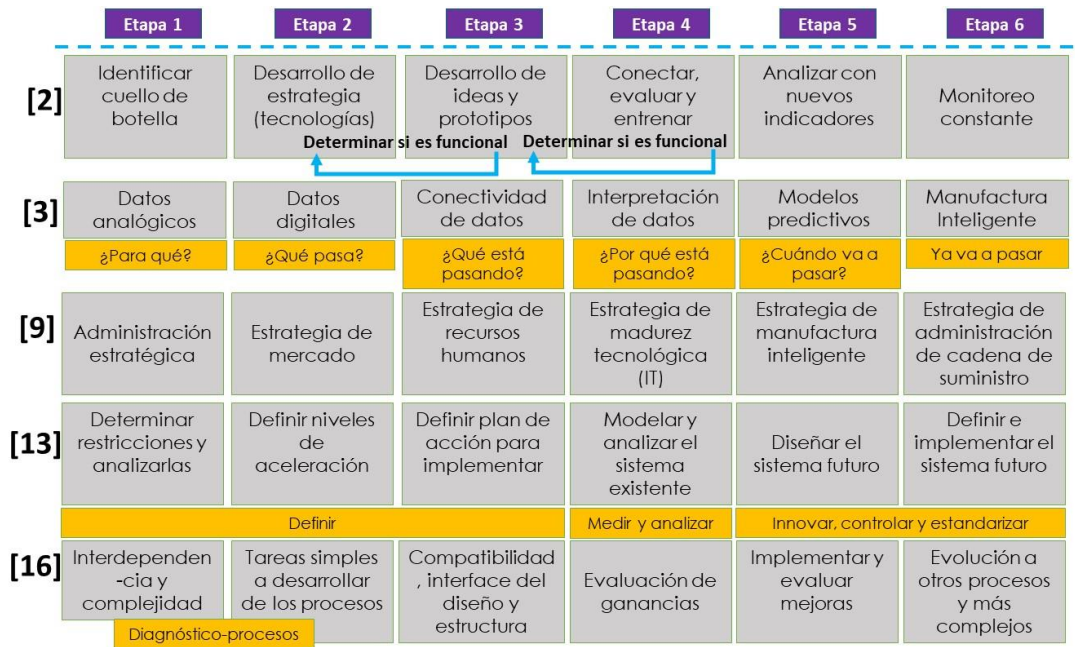


Figura 1. Esquemas analizados de mapa de ruta.

De los esquemas metodológicos analizados, Zhou et al. (2018) enfoca su mapa de ruta al proceso y no al equipo y una vez que se han analizado las estructuras tecnológicas, recomienda hacer una evaluación de la funcionalidad y ventajas del uso de las herramientas. Xu et al. (2018) establece evaluar el criterio a partir de la estructura de la manufactura inteligente enfocado a la digitalización. Ghobakhloo (2018) menciona que el punto de partida de esta propuesta es la administración estratégica y a partir de ahí se plantea una solución integral para involucrar todas las áreas claves. Dossou (2019) propone un mapa de ruta a partir de una combinación entre la técnica de mejora continua lo que da paso a incorporar herramientas de esta índole para complementar el estudio a partir de la secuencia: planear, hacer, verificar y actuar. Pinto et al. (2019) sugieren comprender idóneamente los procesos y realizar la

implementación iniciando con tareas pequeñas y evaluar el nivel de éxito con el análisis de valor agregado.

Las metodologías analizadas de los mapas de ruta coinciden en que se requiere una evaluación de la infraestructura tecnológica y una evaluación de competencias para estructurar el esquema digital y, de esta manera, facilitar la transición del nuevo conocimiento. Estos aspectos fueron tomados en cuenta para el desarrollo de la adaptación metodológica en la que, además de incluir dos de los principales retos – aspecto cultural y conocimiento experto – se incorporaron actividades específicas de cada mapa de ruta, especificando las herramientas requeridas para el desarrollo de cada etapa y el resultado esperado, todo esto involucrado en cinco etapas, en lugar de seis como lo establecen las metodologías comentadas. En la Figura 2 se

plantea la adaptación metodológica del mapa de ruta desarrollada en el presente trabajo.

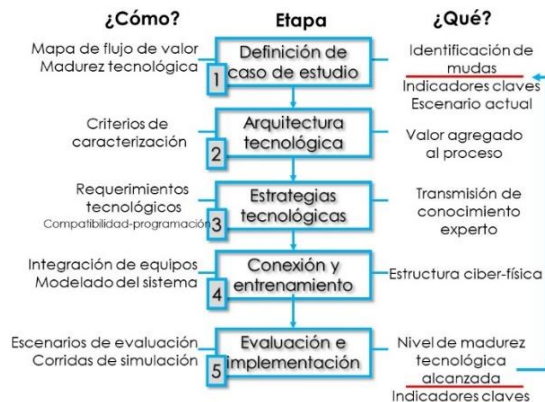


Figura 2. Metodología adaptada del mapa de ruta.

El aporte en este planteamiento consiste en que se especifica el *¿Cómo lograr la implementación y qué se debe considerar?* además, incluye un ciclo de retroalimentación al inicio y al final de las etapas mediante una evaluación continua de indicadores claves. Por último, se analiza cómo afrontar dos de los principales retos identificados,

conocimiento experto y caracterización tecnológica a partir de necesidades específicas detectadas. A continuación, se explican a detalles los pasos establecidos en la metodología del mapa de ruta propuesto.

Etapa 1: Definición de caso de estudio

El estudio de caso para implementar la metodología del mapa de ruta propuesto se centra en un dispositivo didáctico impreso en 3D.

El estudio de caso para implementar la metodología del mapa de ruta propuesto se centra en un dispositivo didáctico impreso en 3D. Este dispositivo, compuesto por una caja, un tornillo sin fin y un engrane, demuestra visualmente el funcionamiento del mecanismo integrado. Al girar el engrane manualmente mediante el husillo, se puede observar su movimiento a través de una abertura en la tapa superior. La Figura 3 (a) ilustra el dispositivo y Figura 3 (b) su proceso de ensamblaje.

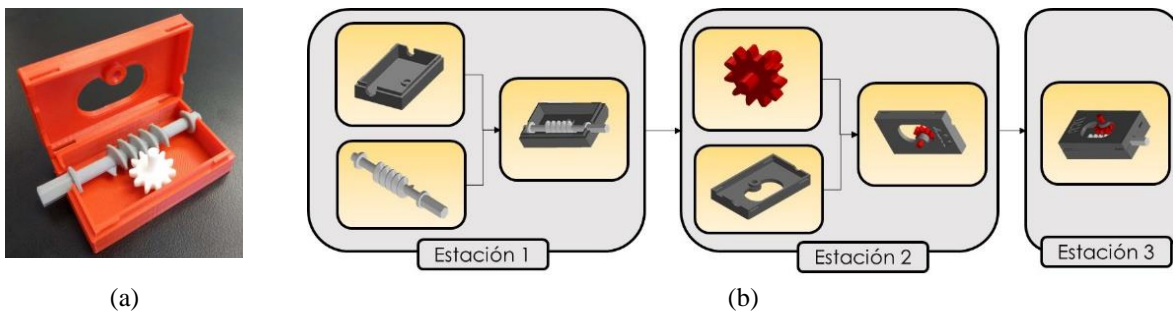


Figura 3. (a) Dispositivo didáctico y (b) secuencia de ensamblaje de componentes.

El ensamblaje del dispositivo requiere una secuencia específica para asegurar el correcto funcionamiento del mecanismo. El husillo se coloca en una posición precisa dentro de la tapa 1 asegurando así la orientación adecuada del mecanismo. Posteriormente, se procede a colocar el engrane en la tapa 2. Finalmente, en una tercera estación, se realiza el cierre del

dispositivo, uniendo los componentes procedentes de ambas estaciones, completando así el producto terminado. Para detectar las áreas de oportunidad y definir los indicadores de interés se analizaron las áreas de oportunidad presentes en el proceso de ensamblaje manual mediante el mapa de flujo de valor del proceso, ver Figura 4.

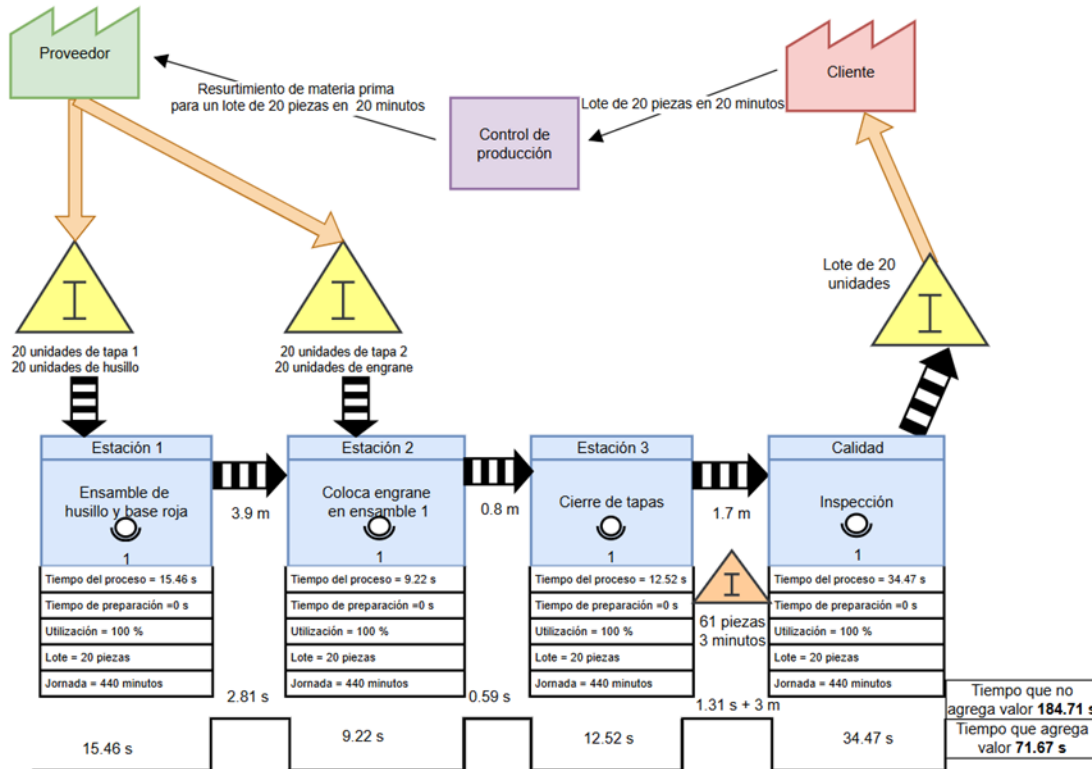


Figura 4. Mapa de flujo de valor del proceso actual.

El transporte excesivo de 6.4 metros entre estaciones genera un tiempo de ciclo de 4.71 segundos por pieza, siendo la estación 4, inspección de calidad, la que establece el ritmo de producción por ser el cuello de botella. La acumulación de inventario entre la estación 3 y 4 de 61 piezas en una hora, se le atribuye a una carga desbalanceada de trabajo. Esto da como resultado una capacidad de producción actual de 695 piezas por jornada (considerando una hora de comida, y 20 minutos de limpieza y preparación de material), sin embargo, se ve reducida por una tasa de merma que oscila entre el 10 y 15 % debido a defectos de posición del husillo principalmente. Por último, se puede mencionar que la gestión de la información se basa en métodos manuales lo que puede desencadenar en generación de errores y retrasos. Derivado de lo anterior, se determinó que los indicadores de interés a evaluar en la transición de un proceso manual a uno semi automático de acuerdo con la

secuencia de pasos del mapa de ruta corresponden a: tiempo de ciclo, capacidad de producción y porcentaje de merma.

Por último, es necesario evaluar el nivel de madurez, de acuerdo con Pech y Vrchota (2020) es necesario categorizar a las empresas para analizar el nivel de implementación de industria 4.0 y relacionarlo con el nivel tecnológico empleado actualmente de acuerdo con un índice de industria 4.0. Para determinar el grado de avance hacia la Industria 4.0, se ha empleado el modelo de madurez propuesto por Rauch et al., (2019), el cual evalúa a las PYMES considerando cuatro dimensiones: operacional, organizacional, sociocultural y tecnológico. Tomando como punto de partida lo anterior, el proceso manual analizado se clasifica en el nivel 1 de madurez, esta clasificación se justifica por la predominancia de procesos manuales, la ausencia de monitoreo de productos, la carencia de análisis de datos y

sistemas de gestión empresarial, así como la falta de digitalización de productos o servicios.

Etapa 2. Arquitectura tecnológica

Para determinar la arquitectura tecnológica idónea, se consideró la complejidad del

proceso y los indicadores claves de desempeño, a partir de esto, se identificaron puntos críticos y necesidades específicas lo que permitió seleccionar las tecnologías más adecuadas. Estas tecnologías fueron evaluadas en función a su potencial del valor agregado al proceso, un aspecto que se analiza en detalle en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de caracterización, equipo tecnológico y aporte del valor agregado al proceso.

Criterio de caracterización	Equipo tecnológico	Valor agregado al proceso
Calidad	Sistema de inspección automático	Detección oportuna de defectos de calidad de acuerdo a criterios definidos. Control de materia prima utilizada y material a reprocesar. El proceso de inspección no afecta el tiempo de ciclo.
Ensamble	Proceso de ensamble colaborativo	Eliminar error humano en el proceso de ensamble causado por fatiga o estrés. Automatización de tareas repetitivas.
Criterio de decisión	Banda transportadora	Selección automática de piezas para separar producto terminado y producto a reprocesar.
Reconfiguración de la línea de ensamble	Adaptabilidad e interoperabilidad con los equipos. Diseño de célula de manufactura	Disminución de transportes innecesarios y optimización del recurso humano.

Etapa 3. Estrategia tecnológica

Para seleccionar el equipo tecnológico adecuado, se priorizaron herramientas de programación intuitivas que permitieran el aprendizaje automático y una interfaz amigable para el usuario. Además, se buscó garantizar la integración fluida de las diferentes tecnologías. Todo esto centrado en el aspecto clave de establecer cómo traducir el conocimiento tácito del operador al lenguaje de programación, de este modo, se da respuesta a uno de los principales retos, el cual corresponde a la transición cultural en donde se trata de posicionar al operador como gestor del proceso enfocado a la toma de decisiones oportuna. A continuación, se detallan los equipos tecnológicos empleados y la estrategia de implementación.

Sistema de inspección automático

Se seleccionó el sistema de visión Keyence® modelo CV-X-300 para llevar a cabo las pruebas de inspección. Este equipo, con una resolución de 256 niveles de gris por píxel, permite detectar de manera precisa áreas, posiciones y defectos en las imágenes. Su interfaz de programación intuitiva facilita la traducción de los criterios de calidad establecidos por el operador experto (posición, forma y color) en parámetros técnicos configurables. Estos criterios se tradujeron al lenguaje técnico del software una vez realizada la selección de las herramientas adecuadas y la definición de condiciones de juicio, lo que a su vez determinaron los límites de aceptación y rechazo de las piezas, en la Figura 5 se presenta el análisis realizado.

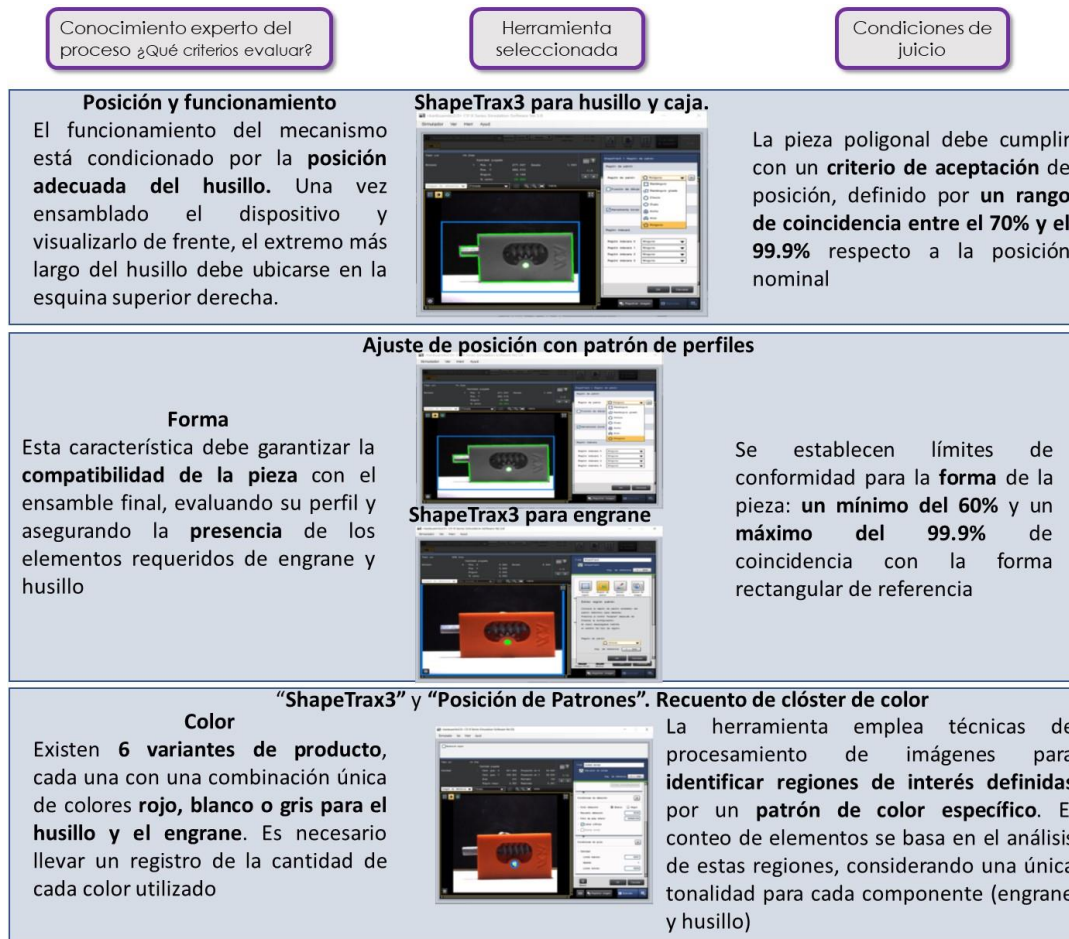


Figura 5. Selección de herramienta y condiciones de juicio a partir del conocimiento experto.

El límite mínimo de evaluación se fijó tras analizar simulaciones detalladas. Dada la geometría sencilla de la pieza, se estableció un margen de tolerancia amplio. La interfaz intuitiva del software facilitó la programación de estos criterios, extraídos del conocimiento experto y traducidos al lenguaje de programación del software.

Ensamble

Para automatizar el proceso de ensamble se seleccionó un brazo robótico colaborativo Universal Robot modelo UR3 (CB-3 UR3).

Gracias a su interfaz intuitiva y programación de aprendizaje por demostración, permitió programar la secuencia de ensamble de manera sencilla a partir de la definición de los comandos básicos de “mover”, “posicionar” y “ajustar pinza”. En total se definieron 34 puntos de paso necesarios y se configuró la velocidad y fuerza de la pinza para manipular con precisión las piezas. En Figura 6 (a) se explican los comandos simplificados del árbol del programa y en Figura 6 (b) se muestra el gráfico del cobot con los puntos de paso necesarios para el ensamble.

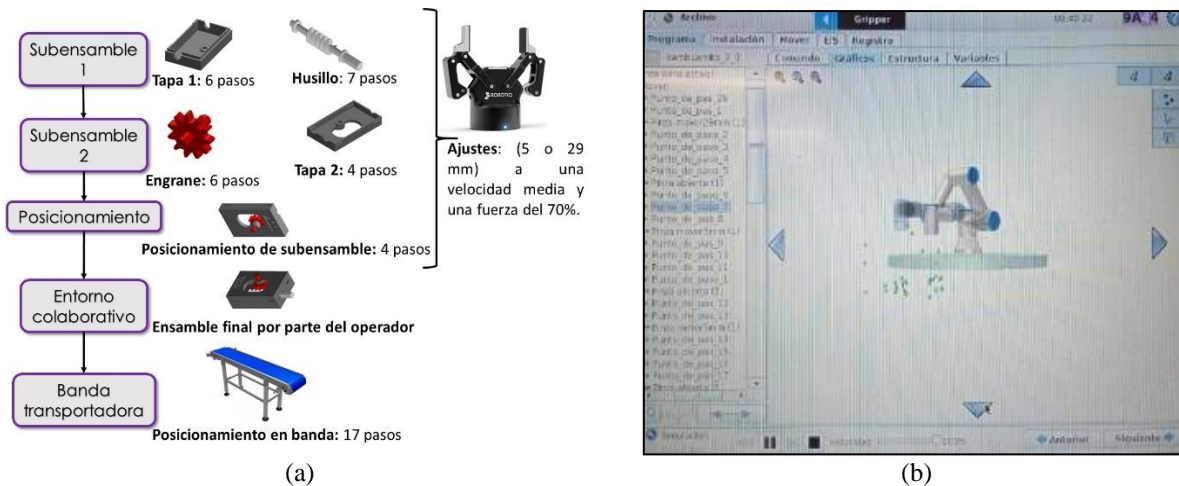


Figura 6. (a) Secuencia de pasos definidos en el árbol del programa y (b) entorno de simulación gráfico de la secuencia definida.

El proceso de ensamblaje consta de dos subensambles principales. En el primero, se colocan la tapa 1 (6 pasos) y el husillo (7 pasos). En el segundo, se ubican el engranaje (6 pasos) y la tapa 2 (4 pasos). En cada etapa, la pinza se ajusta automáticamente según la pieza (5 o 29 mm) a una velocidad media y una fuerza del 70%. Se posiciona el subensamble en el área de trabajo (4 pasos) y tras una pausa de 8 segundos para la unión manual de los subensambles, se posiciona la pieza final en una banda transportadora (17 pasos).

Criterio de decisión.

Se utilizó una banda transportadora de 30 x 150 cm y un sensor fotoeléctrico OMRON E3F2-DS10B4-N para establecer el criterio de decisión. Una vez que el cobot coloca las piezas en la banda, estas son transportadas al área de inspección. El sensor detecta las piezas y el sistema de visión verifica su conformidad con los parámetros establecidos. Las piezas correctas continúan su proceso, mientras que las incorrectas son rechazadas y devueltas al área de reproceso.

Reconfiguración de la línea de ensamble

Una vez recopilada la información técnica de los equipos, se procedió a diseñar una

distribución, para ello, se empleó la metodología SLP-Ind. 4.0, una versión adaptada de la SLP convencional, diseñada específicamente para los entornos de la Industria 4.0 (Rodríguez et al., 2023).

Esta metodología, compuesta por seis pasos, permitió identificar el diseño óptimo para el Laboratorio de Manufactura. Su enfoque en la modularidad y flexibilidad simplifica la identificación de los requisitos de interoperabilidad entre los equipos automatizados, favoreciendo una mayor conectividad y control del proceso productivo.

Además, al integrar sistemas de visión, la metodología permite obtener y analizar datos en tiempo real, lo que optimiza la toma de decisiones. Esta flexibilidad facilita la reconfiguración del sistema según las necesidades, permitiendo adaptar los flujos de trabajo a puntos específicos de montaje e inspección.

La propuesta también considera la importancia de involucrar al trabajador en la gestión del proceso, fomentando la personalización y la toma de decisiones a nivel local. Para ello, se enfatiza la necesidad

de una capacitación adecuada para que los operadores puedan asumir este nuevo rol. En

la Figura 7 se presenta la distribución de la línea propuesta.

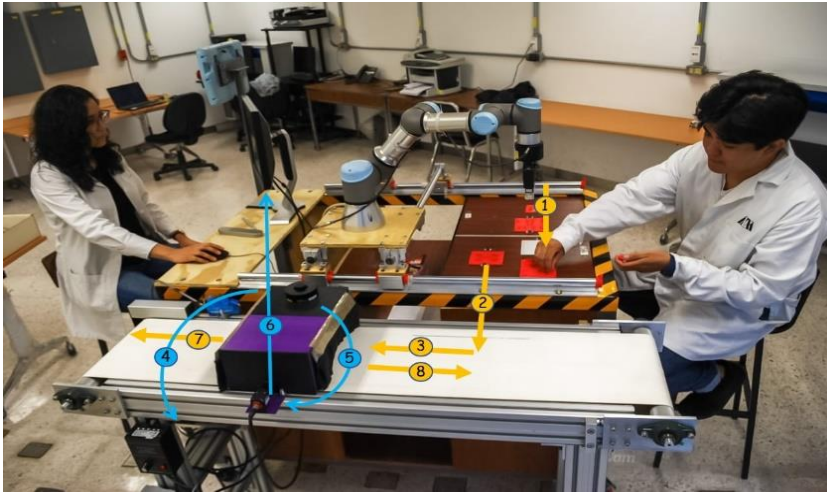


Figura 7. Distribución actual de la línea

La Figura 7 muestra la distribución de la línea de ensamble detallando los flujos de material e información (líneas de color anaranjado y azul respectivamente). El proceso inicia con el operador, quien suministra la materia prima (1) y colabora en el ensamble del dispositivo. Una vez realizado el ensamble (2), el producto terminado se coloca en la cinta transportadora para su inspección (3). Una vez en la cinta, un sensor detecta el componente y envía una señal para detener la banda (4) y capturar una imagen del producto para verificar si cumple con los estándares (5). Según el resultado (6), la cinta se desplaza hacia la derecha (producto terminado) o hacia la izquierda (producto rechazado) (7,8). La programación del cobot incluye condicionales que determinan la dirección de la cinta y activan la inspección del producto, todo esto ha sido establecido en el árbol del programa que considera la integración de los equipos.

Etapa 4. Conexión y entrenamiento

La conectividad entre equipos se diseñó considerando que garantizara su adaptabilidad e interoperabilidad, tomando de referencia lo establecido por Al Sunny et al

(2018) proponen el diseño de la arquitectura agente-adaptador para la comunicación de un sistema de fabricación en un entorno ciber físico. Para este diseño, el adaptador es el operador de la máquina y el agente es el puente entre el adaptador y el internet. Considerando lo anterior, la conexión del sistema propuesto se resume en la Figura 8.

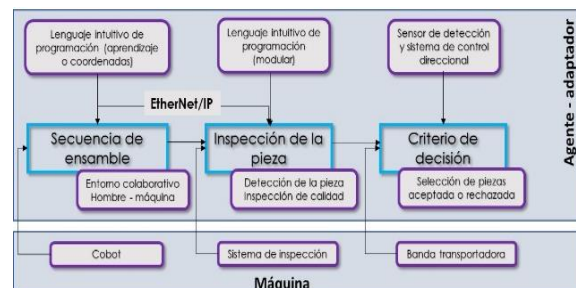


Figura 8. Conexión del sistema propuesto.

Estándar: los componentes físicos como el sensor de posición y digitales, como los diferentes programas empleados cumplen con un estándar común de integración, de esta manera se incorporaron al árbol del programa del cobot las secuencias condicionales que permitan la participación de los agentes involucrados, mediante un protocolo de comunicación común (EtherNet/IP).

Interface: Se utiliza la interface del sistema de visión y del cobot para garantizar un seguimiento a la secuencia de programación y resultado de inspección de calidad.

Modular: El sistema puede ser adaptado a otras necesidades de requerimientos de calidad y probar diferentes secuencias de ensamble.

Tanto los esquemas de estandarización como interface cumplen la función de agente adaptador en el sistema.

Algo muy importante de mencionar es el proceso colaborativo en el resurtimiento de materia prima, para garantizar que esto ocurra de manera adecuada se diseñaron dos plantillas Poka Yoke en impresión 3D, ver Figura 9. Estas plantillas cuentan con ayudas visuales que permiten identificar la correcta colocación del material el cual está ajustado a las dimensiones de la misma.

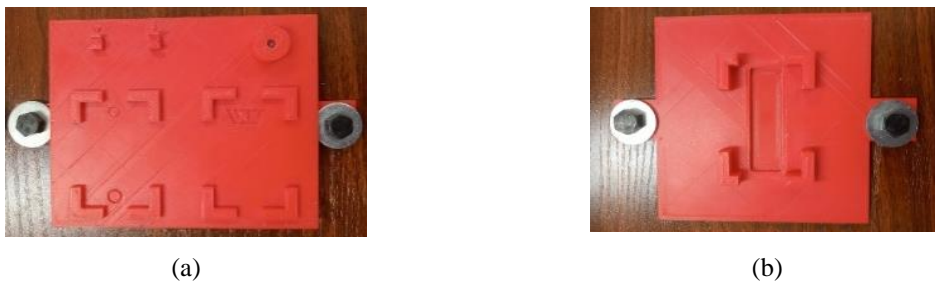


Figura 9. (a) Dispositivo poka yoke para resurtimiento de material y (b) plantilla de disposición de producto terminado.

El tiempo de espera de 8 segundos considerado en la programación del cobot se estipuló a partir del tiempo promedio (6 s) más un factor de calificación del 15% que considera la variabilidad en la habilidad, esfuerzo, condiciones y consistencia del operador, a este resultado se le adiciona un 16% de suplementos fijos y variables en el que se considera la fatiga y necesidades personales.

Etapas 5. Evaluación e implementación

Se efectuaron simulaciones vivenciales para evaluar la viabilidad de la estructura ciberfísica de la línea de ensamble propuesta (Figura 7), para esto se realizó una prueba piloto para el ensamble de 20 piezas y se analizaron los indicadores clave de desempeño, cuantificando así el impacto en el valor agregado del proceso. Así mismo, se determinó el grado de madurez de la metodología propuesta. El sistema de medición para evaluar y analizar estos

indicadores consistió en un registro de tiempo con cronómetro por el método continuo del ensamble de los productos, cumplimientos de criterios de calidad y rendimiento del funcionamiento del equipo (Figura 8). Una vez registrado los tiempos se procedió a realizar el cálculo del OEE y capacidad de producción.

3. Resultados

Siguiendo la metodología del mapa de ruta propuesto, se estableció la transición de una operación manual a una automatizada bajo los principios de la industria 4.0 para un dispositivo didáctico.

Inicialmente, la estructura ciberfísica dio paso a una reconfiguración el área de trabajo para mejorar el proceso de ensamble, lo que generó una nueva secuencia de flujo de material e información. La Figura 10 presenta el mapa de flujo de valor actualizado de la línea de producción.

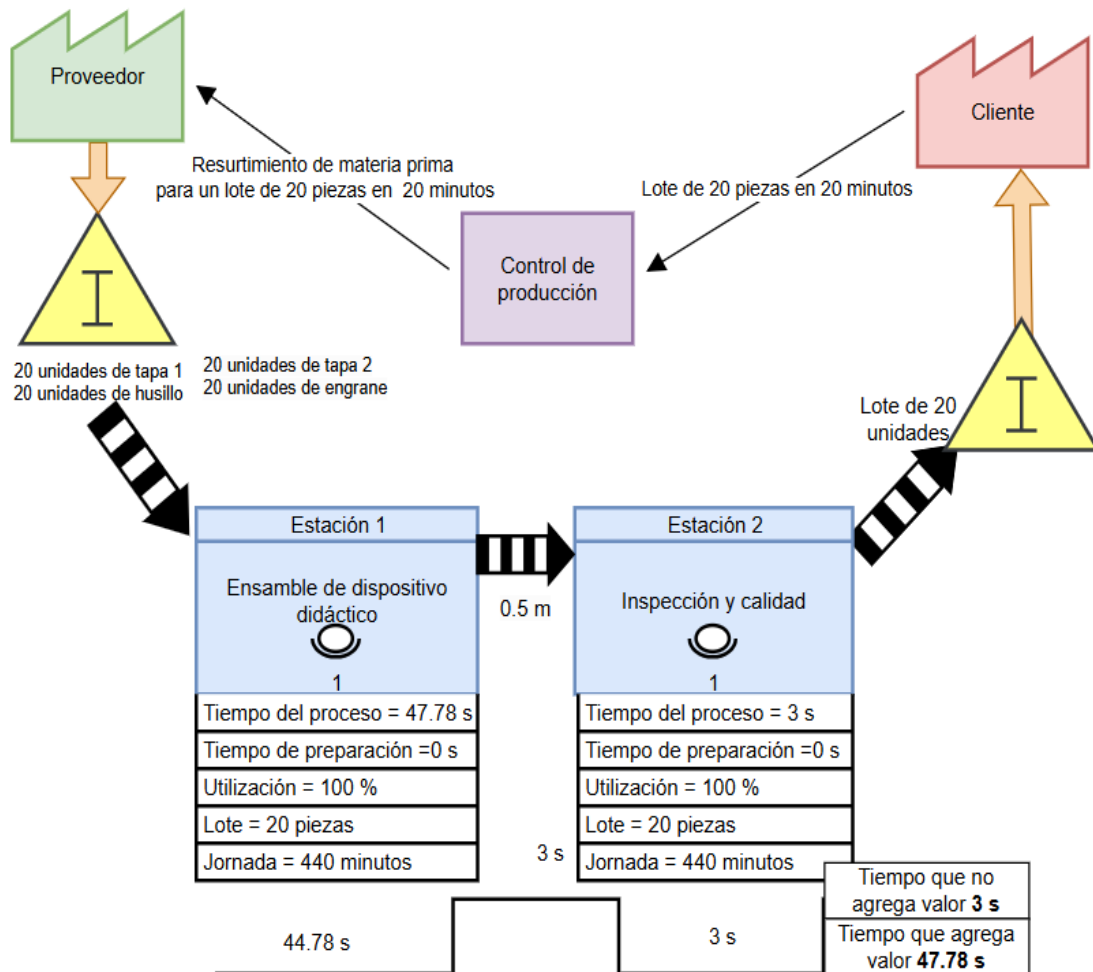










Figura 10. Mapa de flujo de valor actual.

En el proceso actual, considerando el enfoque colaborativo y el proceso de inspección semi automático. Al combinar las estaciones de ensamble e inspección se ha logrado un flujo de trabajo continuo y se han reducido las distancias lo que impacta en una mejora en el tiempo de traslado en un 36%. Con esta nueva configuración el cuello de botella deja de ser el proceso de inspección, ya que éste se ha incorporado como parte del proceso, en la nueva propuesta la estación que determina el ritmo de producción corresponde a la estación de ensamble con 44.78 segundos. Tanto la acumulación de inventario en proceso como los defectos de calidad se eliminan en un 100% lo que permite mejorar la eficiencia y liberar espacio. Si bien la capacidad de

producción se ha reducido en un 23% debido a la nueva configuración, esta disminución se compensa con la posibilidad de operar jornadas continuas de 8 horas con solo dos operadores, esto reduce la rotación de personal y mejora las condiciones laborales.

Para evaluar el impacto de la transición del proceso manual al semi automático, se llevaron a cabo simulaciones vivenciales comparativas para un lote de 20 piezas. Los resultados obtenidos se compararon en base a los indicadores claves definidos en la etapa 1 y su incidencia en el valor agregado del proceso establecido en Tabla 1. Los resultados del análisis comparativo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis comparativo.

Valor agregado al proceso	Indicador	Proceso Manual	Proceso semi automático
Reconfiguración de la línea de ensamble	Tiempo de no valor agregado  98%	184.71 segundos	3 segundos
	Tiempo de ciclo  30%	34.47 segundos	44.78 segundos
Ensamble (Automatización de tareas repetitivas)	Capacidad de producción  23 %	695 piezas jornada	535 piezas por hora
	Recurso humano  50%	4 operadores	2 operadores
	Variabilidad en el tiempo de ensamble (Mura)  100%	Desviación estándar de 17.38 segundos en promedio	Eliminada
Criterio de decisión	Merma  100%	3 piezas defectuosas	0 piezas defectuosas
Calidad	Control de materia prima y reproceso  100%	Control físico	Control digital con cartas de control
OEE	Disponibilidad, desempeño y calidad  20%	71%	91%

De acuerdo con los mapas de flujo de valor del proceso manual y semi automático (Figura 1 y 3) se puede establecer que hubo reducción de transportes innecesarios, así como acumulación de inventario. Al eliminar estas mudas, impacta positivamente en las actividades que no agregan valor en un 98% al pasar de 184.71 a 3 segundos.

Las actividades que, si agregan valor al proceso, correspondiente a las estaciones de trabajo determinan el tiempo de ciclo del proceso, si bien es cierto que, hubo un incremento del 30%, esto responde a la nueva configuración de la línea en donde se considera dos operadores involucrados en el proceso como gestores, en lugar de 4 realizando actividades repetitivas, por lo que se suprime el trabajo en serie. El incremento de este tiempo repercute negativamente en la capacidad de producción.

El cobot cuenta con una precisión constante de 0.03 mm que, en conjunto con la determinación de parámetros de fuerza y distancia, evita el defecto de posición del husillo en el dispositivo didáctico. La

precisión requerida en la colocación de las piezas por parte del cobot, actúa de manera conjunta con la plantilla de apoyo para la disposición de la materia prima utilizada por los operadores. Este nivel de precisión influye directamente en el porcentaje de calidad ya que se eliminan los defectos de posición en un 100% y, por otro lado, permite disminuir la variación en los tiempos involucrados en el proceso manual, ya que la secuencia de ensamble está definida con puntos específicos de trayectoria.

Por último, es importante evaluar el indicador de OEE que está caracterizado por los parámetros de disponibilidad, rendimiento y calidad. En el proceso manual hay una repercusión directa en el rendimiento establecido por las compensaciones ocasionado por estrés, fatiga, precisión del proceso, atención dividida entre varios objetos lo que involucra un 16% mientras que, en el proceso automatizado, esta compensación ya está establecida en el entorno colaborativo, por lo que se disminuye la variabilidad de los tiempos y se considera un 9% que incluye fatiga y necesidades

personales. En la propuesta establecida se logra un 91% de este indicador, comparado con el 71% del proceso manual, permite una mejora del 20%.

4. Discusión de resultados

La implementación del mapa de ruta propuesto ha posicionado al proceso en un nivel de madurez entre 3 y 4. Esto se evidencia en la instauración de un monitoreo periódico de los productos, cuyos datos son estructurados para su análisis y retroalimentación en el desarrollo. Aunque aún no se dispone de un sistema integrado de planificación y control de la producción, se cuenta con órdenes de producción específicas y un control riguroso de la materia prima. El proceso productivo, totalmente digitalizado, inicia con requerimientos específicos y se monitorea de manera continua. Para alcanzar el máximo nivel de madurez, se recomienda la integración de un sistema MES y la completa digitalización de la arquitectura de producto y servicio.

Los escenarios de simulación diseñados permitieron evaluar el impacto de la integración de tecnologías 4.0 en la transición de un proceso manual a uno automatizado. Los resultados evidencian una mejora del 20% en el OEE gracias a una optimización en el uso de operadores, materiales y tiempo. No obstante, la nueva distribución de la célula de trabajo generó un incremento del 30% en el tiempo de ciclo, lo que redujo la capacidad de producción en un 23%. Cabe destacar que, al considerar este esquema de trabajo la rotación es de solo dos operadores por jornada, medida que garantiza la estandarización del proceso automatizado.

La transición cultural, un desafío clave en este proceso, se aborda mediante la combinación del conocimiento experto del operador y las ventajas de la nueva arquitectura tecnológica. El operador, ahora gestor del proceso, pasa de

realizar tareas repetitivas a supervisar y colaborar en el ensamblaje. El control de materia prima y reprocesos se lleva a cabo a través de un doble sistema: el gestor del proceso realiza un seguimiento inicial y un segundo gestor, apoyado por el sistema de inspección, analiza los datos mediante cartas de control y parámetros estadísticos. Este monitoreo continuo permite tomar decisiones oportunas respecto al porcentaje de merma aceptable.

El conocimiento del operador fue fundamental para desarrollar una secuencia de programación que se adapta a las necesidades del proceso. Al utilizar un lenguaje intuitivo y contar con la participación de los involucrados, se logró crear una secuencia flexible y fácil de reprogramar ante nuevos requerimientos.

Al automatizar las tareas repetitivas, se ha liberado al operador de trabajos monótonos y se ha reducido considerablemente el margen de error humano. Esto ha resultado en una mayor precisión y consistencia en el proceso de ensamblaje.

La evaluación de la nueva propuesta ha revelado que los operadores, gracias a su conocimiento y experiencia, han logrado un 93% de dominio del nuevo método. Esta rápida adaptación permitirá estabilizar los tiempos de proceso en una semana y aumentar la eficiencia en un 20%, lo que demuestra el éxito de la implementación y el compromiso del equipo.

A diferencia de Zhou et al. (2018) esta propuesta no parte de una estrategia general, sino que se centra primero en delimitar el estudio a nivel operativo. Se coincide con Xu et al. (2018) en que el mapa de ruta debe considerar tanto el proceso como el equipo tecnológico, pero también se debe de tomar en cuenta la valoración de la infraestructura tecnológica. Al igual que Ghobakhloo (2018)

y Dossou, (2019), se propone el uso de herramientas de mejora continua y evaluaciones periódicas basadas en el valor agregado. Sin embargo; se marca una diferencia con Pinto et al. (2019) al considerar que la digitalización debe complementarse con el conocimiento experto para lograr mejores resultados. Esto se corroboró con su implementación en el ensamble de un modelo didáctico de un sistema de engranes con enfoque de industria haciendo más eficiente en un 20% que la forma manual.

5. Conclusiones

La implementación de nuevas tecnologías, siguiendo el mapa de ruta, ha demostrado mejorar significativamente los indicadores clave como el tiempo de ciclo, la calidad y la eficiencia del proceso. Sin embargo, la propuesta de redistribución de la línea ha generado una disminución en la capacidad de producción. Esto pone en evidencia que hay que tomar en cuenta las ventajas y desventajas de la implementación de estas tecnologías y el impacto que provocan al sistema completo.

En este trabajo se responde a la pregunta de cómo implementar con éxito el enfoque de industria 4.0 y qué factores a considerar.

Los principales retos del proceso de implementación se abordaron en las últimas tres etapas. La definición de criterios de interés permitió identificar las necesidades tecnológicas y establecer un mapa modular y adaptable. La evaluación comparativa entre el inicio y el final del proceso, a través de indicadores clave, determinó el impacto en el valor agregado. Finalmente, el entrenamiento combinado conocimiento experto y ventajas tecnológicas fue fundamental para el éxito de la implementación.

A pesar de la extensa literatura sobre las tecnologías de la Industria 4.0, existe una

notable carencia de estudios sobre los procesos de decisión involucrados en su adquisición o desarrollo (Nayernia et al., 2022). Esta brecha es especialmente relevante al considerar la protección de la propiedad intelectual y la minimización de riesgos. El presente estudio, al evaluar la madurez tecnológica alcanzada tras implementar el mapa propuesto, confirma esta brecha. Si bien se han logrado avances significativos en ciertos aspectos tecnológicos, la incorporación de software y la digitalización completa de los recursos se identifican como áreas de mejora, evidenciando la complejidad de estos procesos de decisión.

6. Referencias

- Al Sunny, S., Liu, X. y Shahriar, R. (2018). Communication method for manufacturing services in a cyber-physical manufacturing cloud. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 31. 636-652. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407446>.
- Alessia, M., Alfano, M. y Di Pasquale, V. (2021). A survey study on Industry 4.0 readiness level of Italian small and medium enterprises". *Procedia Computer Science*. 180.744–753. <https://doi:10.1016/j.procs.2021.01.321>.
- Al-Ruithe, M., Benkhelifa, E. y Hameed K. (2018). Key Issues for Embracing the Cloud Computing to Adopt a Digital Transformation: A study of Saudi Public Sector. *Procedia Comput. Sci*. 130. 1037–1043. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.145>.
- Carvalho, A, Dias A, Dias A, Sampaio, P. (2024). The Quality 4.0 Roadmap: Designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0". *Quality Management Journal*. 31. 117–137.

<https://doi.org/10.1080/10686967.2024.2317478>.

Chen, B., Wan, J. y Shu, L. (2017). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE*. 6. 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>.

Cottrino A., Sebastián M., y González G. (2020). Industry 4.0 Roadmap: Implementation for Small and Medium-Sized Enterprises. *Applied Sciences MDPI*. 10. (2020). 1-17. <https://doi:10.3390/app10238566>.

Da Silva, G. A. F. R., Baierle, I. C., Gomes, L. d. C., Correa, R. G. d. F., & Peres, F. A. P. (2024). A Comprehensive Roadmap for Connecting Industry 4.0 Technologies to the Basic Model of Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment (CPFR). *Administrative Sciences*, 14(6), 108. <https://doi.org/10.3390/admsci14060108>.

Dossou P. (2019). Development of a new framework for implementing industry 4.0 in companies. *Procedia Manufacturing*. 38. 573–580. <https://doi:10.1016/j.promfg.2020.01.072>.

Elhousseiny, H. y Crispim, J. (2024). A Review of Industry 4.0 Maturity Models: Theoretical Comparison in The Smart Manufacturing Sector. *Procedia Computer Science*. 32. 1869-1878. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.009>.

Ghobakhloo. M. (2018). “The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0”. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 29. 910-936. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>.

Goecks, L. S., Habekost, A. F., Coruzzolo, A. M., y Sellitto, M. A. (2024). Industry 4.0 and

Smart Systems in Manufacturing: Guidelines for the Implementation of a Smart Statistical Process Control. *Applied System Innovation*, 7(2), 24. <https://doi.org/10.3390/asi7020024>.

Gomaa, A. (2025). Lean 4.0: A Strategic Roadmap for Operational Excellence and Innovation in Smart Manufacturing. *International Journal of Emerging Science and Engineering*. 13. 1-20. <https://doi:10.35940/ijese.D2592.13050425>.

James, S. y Shetty, A. (2020). “Design Framework for Preparing Workforce Towards Industry 4.0 Implementation in Small and Medium-Sized Enterprises”. Proceedings of the ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2 2020. <https://doi.org/10.1115/MSEC2020-8380>.

Karuppiah, K., Sankaranarayanan, B. y D’Adamo, I. (2023) Evaluation of key factors for industry 4.0 technologies adoption in small and medium enterprises (SMEs): an emerging economy context. *Journal of Asia Business Studies*. 17. 347-370. <https://doi:10.1108/JABS-05-2021-0202>.

Mittal, S., Khan, M. y Romero D. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*. 49. (2018). 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>.

Nayernia, H., Bahemia, H. y Papagiannidis, S. (2022). A systematic review of the implementation of industry 4.0 from the organizational perspective. *International Journal of Production Research*. 60. 4365-4396. <https://doi:10.1080/00207543.2021.2002964>.

Nayernia, H., Bahemia, H. y Papagiannidis, S. (2022). A systematic review of the

implementation of industry 4.0 from the organisational perspective. *International Journal of Production Research*. 60. 4365-4396.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2002964>.

Ostadi, B., Barrani, L. y Aghdsi, M. (2024). Developing a strategic roadmap towards integration in Industry 4.0 A dynamic capabilities theory perspective. *Technological Forecasting and Social Change*. 208. 4365-4396.1-11. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123679>.

Pech, M. y Vrchota, J. (2020). Classification of Small- and Medium-Sized Enterprises Based on the Level of Industry 4.0 Implementation. *Applied Sciences*. MDPI.20. 1-22. <https://doi:10.3390/app10155150>.

Pinto, B., Silva, T. y Costa, R. (2019). A Strategic Model to take the First Step Towards Industry 4.0 in SMEs. *Procedia Manufacturing*. 38. 637-645. <https://doi:10.1016/j.promfg.2020.01.082>.

Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R. (2020). A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises. *Sustainability*. MDPI. 12. (2020). 1-18. <https://doi:10.3390/su12093559>.

Rodríguez, L., Loyo, J. y Silva U. (2023). Layout evaluation with the industry 4.0 approach for a manufacturing Laboratory. *Int j simul model*. 22. 551-561. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM22-4-642>.

Rossella, P., Tommaso, R. y Raffaele, S. (2023). Industry. 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies. *Production Planning & Control*. 34. 139-158.

<https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1891481>.

Saturno, M., Pertel, V.M. y Deschamps F. (2018). Proposal of an Automation Solutions Architecture for Industry 4.0. *DEStech Trans. Eng. Technol. Res*. 14. 185-195. <https://doi.org/10.12783/dtetr/icpr2017/17675>.

Shashank, K., Rakesh, D. y Emel, A (2023). “Barriers to adoption of industry 4.0 and sustainability: a case study with SMEs”. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 36. 657-677. <https://doi:10.1080/0951192X.2022.2128217>.

Tabim, V., Ayala, N., Marodin, G., Benitez, G. y Frank, (2024) A.Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) for Industry 4.0: Overcoming buyer-provider information asymmetries through knowledge sharing dynamics. *Computers & Industrial Engineering*. 196. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110483>.

Vogel-Heuser, B., Lee, J. y Leitao P. (2015). Agents Enabling Cyber-Physical Production Systems. *Automatisierungstechnik*. 63.777–789. <https://doi.org/10.1515/auto-2014-1153>.

Xu, LD., Xu, El. y Li, L. (2018) Industry 4.0: State of the art and future trends. *Int. J. Prod. Res*. 56. 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.

Zamora Iribarren, M., Garay-Rondero, C. L., Lemus-Aguilar, I., y Peimbert-García, R. E. (2024). A Review of Industry 4.0 Assessment Instruments for Digital Transformation. *Applied Sciences*, 14(5), 1693. <https://doi.org/10.3390/app14051693>.

Zhou, K., Liu T. y Zhou L. (2015) Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges. *In 12th International*

*Conference on Fuzzy Systems and Knowledge
Discovery (FSKD).*
[https://doi.org/10.1109/fskd.2015.7382284.](https://doi.org/10.1109/fskd.2015.7382284)