

Fecha de recepción: 06 de junio de 2025, fecha de publicación en línea: octubre de 2025.

Construcción del Gemelo Virtual de una Línea de Pintura Electroforética Integrando PLC

Lázaro Merlo-Ramírez¹, José Rafael Mendoza-Vázquez², Irma Delia Rojas-Cuevas³, Sergio Javier Torres-Méndez⁴, Vicente Ramírez-Palacios⁵

^{1,2,3,4,5} Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Puebla. Av. Tecnológico 420 Col Maravillas C.P. 72220, Puebla, México.

Autor de correspondencia: José Rafael Mendoza-Vázquez (correo electrónico: rafael.mendoza@puebla.tecnm.mx).

Abstract- This study focuses on the development of a virtual model and digital twin of an electrophoretic painting line, using software tools such as AutoCAD, Blender, TIA Portal, and Machines Simulator. Virtual modeling enables the creation of 3D digital representations of physical processes, helping industries optimize operations, reduce costs, and automate workflows. This approach aligns with Industry 4.0 by integrating digital twins and programmable logic controllers (PLCs) to simulate and control production lines without requiring a physical setup.

The research outlines the design, simulation, and automation of a metal painting line, where virtual components are modeled in AutoCAD, converted and prepared in Blender, and integrated into Machines Simulator. The line replicates the real-life electrophoretic painting process, which includes pre-treatment, electrodeposition, rinsing, curing, and final inspection.

The system was tested using both virtual and physical Siemens PLCs, ensuring proper interaction between control signals and simulated machine behavior. The project demonstrates the feasibility of creating customizable virtual production environments, overcoming limitations of commercial simulation software. It also highlights the role of virtual environments in operator training and process validation. The result is a robust, adaptable digital twin capable of supporting automation and process improvement initiatives.

Keywords: digital twins, modeling, production systems, simulation, system analysis and design, virtual manufacturing.

I. INTRODUCCIÓN

El modelado virtual se define como la integración de técnicas computacionales para representar sistemas o entornos en un espacio tridimensional con herramientas digitales. En la industria, estas técnicas facilitan la optimización de operaciones, la reducción de costos y la simulación de procesos para su análisis, mejora y automatización, también buscan que los procesos sean económicos, sostenibles y eficientes [1] [2], para lograr este aspecto, se emplean los gemelos digitales o virtuales [3][4]. Uno de los fines del modelado virtual, es el diseño de procesos automatizados mediante controladores lógicos programables (PLC), que interactúan con el entorno virtual y permiten desarrollar programas adecuados a las necesidades de la línea de producción o para capacitación del personal.

Existen diversos simuladores de líneas de producción, como Plant Simulation, FlexSim, Simio, Simpy y Emulate 3D [5][6][7], que permiten virtualizar las operaciones y desarrollar simulaciones, estos se encuentran limitados en muchas ocasiones por las librerías disponibles.

En el trabajo, se presenta la construcción de un gemelo virtual de una línea de pintura electroforética empleando softwares como son: AutoCAD, Machines Simulator, Blender y TIA Portal. Este gemelo virtual debe ser capaz de comunicarse con un PLC Siemens S7-1200, con el fin de desarrollar su automatización y la programación de sus acciones de movimiento en trabajos futuros.

En el documento, se presentan los temas de modelado virtual, el gemelo virtual, líneas de producción virtuales, el proceso de pintura electroforética, la construcción del gemelo virtual, la integración de sus componentes y la creación de los controladores, así como pruebas básicas en la comunicación con el PLC virtual y el digital, además de incluir recomendaciones, conclusiones y referencias.

II. MODELADO VIRTUAL

El modelado virtual se aplica en múltiples áreas como ingeniería, arquitectura, diseño industrial, medicina, educación y procesos productivos. Integra características físicas, funcionales y estéticas de un objeto o sistema antes de su construcción o implementación real [8][9][10]

Entre sus ventajas se encuentran la optimización de procesos, la planificación de recursos, la capacitación y el apoyo a la toma de decisiones. También, da posibilidad de simular, probar y modificar en distintas etapas, reduciendo costos y mejorar la detección temprana de errores. Algunos ejemplos se presentan en ingeniería civil y arquitectura, al previsualizar estructuras, y en medicina, donde se emplea en planificación quirúrgica y en la formación de estudiantes mediante representaciones anatómicas tridimensionales [11], [12], [13]

Las herramientas de modelado virtual varían según el objetivo: visualización, análisis, simulación o automatización para lo cual se emplean softwares como AutoCAD, SolidWorks, Blender, Revit, 3DS Max, FlexSim y Factory IO, los cuales permiten modelar formas complejas, aplicar materiales, texturas e iluminación para recrear condiciones reales [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Se puede emplear realidad aumentada (AR) para disponer de capacitación, y se puede usar a la inteligencia artificial (IA) como medio para predecir interrupciones en las actividades de producción y dar soluciones [20]. La integración de realidad aumentada y realidad virtual desarrolla ambientes inmersivos que benefician el aprendizaje y la adquisición de conocimientos en varios aspectos del sistema analizado [21], [22], [23], [24]. En la tabla 1, se muestran los softwares que se pueden emplear para desarrollar gemelos virtuales [5][6][7].

Tabla 1 Comparativo de softwares para desarrollar gemelos virtuales.

Software	Importación de CAD / modelos externos y personalización	Comunicación con PLC (virtual/real) — protocolos y notas prácticas
Tecnomatix Plant Simulation (Siemens)	Soporta importación de modelos CAD	Pensado para PLCSIM Advanced (Siemens) y a PLCs reales
FlexSim	Importa modelos 3D externos (formatos 3DS/FBX/STL u otros según versión)	Módulo Emulation facilitando mapeo de variables E/S hacia PLCs reales/virtuales.
Simio	Permite cargar modelos y bibliotecas propias (importar objetos 3D: FBX, 3DS, OBJ, STL según versión)	No dispone de un driver PLC "nativo" robusto
Emulate3D (Demo3D / Rockwell)	Flujo robusto para marcar/importar CAD (SolidWorks, Creo, Inventor, Revit, Navisworks).	Valida código PLC pero no conexiones a PLC
Machine Simulator	Permite importar modelos 3D (formatos comunes como OBJ/FBX)	Conecta TIA Portal / PLCSIM Advanced (Siemens) y otros PLCs (simulación de PLCs, mapeo E/S).
SimPy	No es un entorno 3D/CAD	No tiene soporte PLC nativo

Para este trabajo se selecciono como ambiente virtual a Machine simulator debido a que puede conectarse con el PLC físico y con el software TIA portal para el desarrollo de la programación en el PLC así como mapear entradas y salidas

III. Líneas de producción virtuales

Las líneas de producción de tipo virtual representan ambientes digitales de procesos de manufactura. Para su desarrollo se desarrollan se involucran tecnologías como simulación, gemelos virtuales, realidad aumentada e inteligencia artificial que permiten diseñar, planificar y

optimizar las operaciones previo a su instalación física [25][26]. Son un elemento esencial de la Industria 4.0, al posibilitar la validación de procesos sin infraestructura real, permiten simular escenarios diversos y la retroalimentación de los modelos mediante datos en tiempo real, lo que aporta información estratégica a diseñadores y operarios [27], [28], [29], [30].

Estas líneas se conforman por modelos digitales interconectados que reciben datos de sensores y emplean inteligencia artificial junto con simulaciones tridimensionales para incrementar la eficiencia, calidad y flexibilidad productiva [30], [31], [32], [33][34]. En la Figura 1 se presenta un ejemplo.

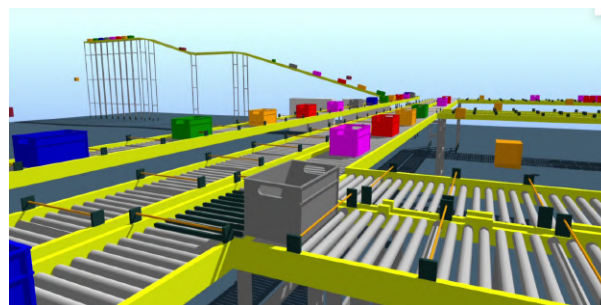


Figura 1. Representación Virtual de una línea de distribución

Fuente: <https://tomec.es/emulate-3d-linea-de-produccion-automatizadas-para-centros-logisticos-y-de-distribucion>

IV. Proceso de pintura electroforética

El proceso de pintura electroforética que puede apreciarse en la Figura 2, también denominado E-Coat, cataforesis o electrodeposición catódica, es un proceso de recubrimiento por inmersión empleado principalmente en la industria automotriz y de electrodomésticos debido a su alta eficiencia, uniformidad de cobertura y resistencia a la corrosión.



Figura 2. Proceso de pintura electroforética. Cortesía de la empresa Recubrimientos especializados en pintura electrolítica (REPESA)

El recubrimiento por electrodeposición consiste en sumergir una pieza metálica en un baño de pintura acuosa con partículas cargadas eléctricamente, que se adhieren al sustrato mediante corriente continua [35], [36], [37]. Sus ventajas incluyen: alto aprovechamiento del material (mayor al 95%), recubrimiento uniforme en geometrías complejas, elevada resistencia a la corrosión y menor impacto ambiental por el uso de pinturas acuosas [38], [39].

El proceso se compone de cinco etapas principales (Figura 3):

1. Pre-tratamiento: con el fin de eliminar contaminantes y mejorar la adherencia [38]
 2. Electrodeposición: la pieza se sumerge en la pintura logrando una película uniforme
 3. Enjuague: eliminación del exceso de pintura mediante agua desionizada para evitar defectos [29], [30].
 4. Curado: se hornea a unos 160–200 °C otorgándole resistencia química y mecánica.
 5. Inspección final: se verifica la uniformidad y conformidad con especificaciones técnicas.
- Algunas industrias añaden pasos complementarios según el producto.

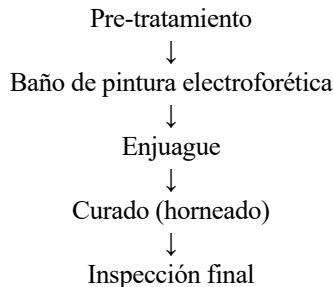


Figura 3. Proceso de pintura electroforética

V. Construcción del gemelo virtual

La construcción de un gemelo virtual de un proceso productivo requiere un enfoque estructurado que integre datos en tiempo real, modelos digitales precisos y herramientas de simulación avanzadas [40], [41], [42]. El desarrollo de este modelo requiere: a) conocimiento del proceso y sus componentes mecánicos y electromecánicos.; b) diseño CAD y conversión a formatos compatibles con el entorno de simulación c) configuración del entorno virtual y establecimiento de comunicación con el PLC

Las etapas recomendadas en esta etapa son:

- a) Definición de objetivos: En este caso es desarrollar el proceso de automatización en su etapa final
- b) Recopilación e integración de datos: se tienen datos de las operaciones, actuadores y sensores a emplear
- c) Construcción del gemelo digital: emplear herramientas CAD para construir una réplica virtual detallada que reproduzca con fidelidad el comportamiento del sistema físico.

A. Definición de objetivos

Para el caso de la línea de pintura electroforética, se busca como objetivo automatizar el proceso y lograr la comunicación con un PLC. Para ello se determinaron las acciones que debería hacer el sistema virtual con el PLC. Algunas de las acciones se listan a continuación.

- Salida para subir cargador de la grúa#1
- Salida para bajar cargador de la grúa#1
- Salida para subir cargador de la grúa#2
- Salida para bajar cargador de la grúa#2
- Salida para luz de botón AVANCE en tablero de grúa#1

- Salida para luz de botón RETROCEDER en tablero de grúa#1
- Entrada de Interruptor de final de carrera Superior en grúa#1
- Entrada de Interruptor de final de carrera Intermedio en grúa#1(Posición de traslado)
- Entrada de interruptor de final de carrera TINA#1
- Entrada de interruptor de final de carrera TINA#2

Esta información se obtuvo a partir del análisis la distribución de planta y las acciones de sus diferentes secciones de la línea de pintura que se presenta en la Figura 4.

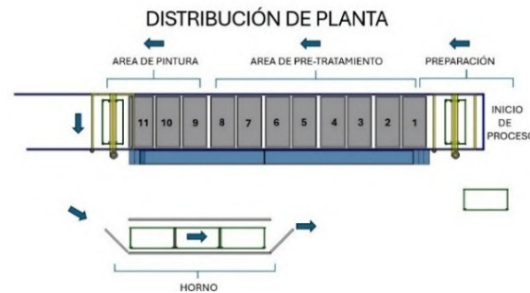


Figura 4. Definición de entradas y salidas en una grúa. Fuente elaboración propia

B. Recopilación e integración de datos

Las figuras 5 a 7 muestran algunas de las acciones realizadas por los componentes del sistema de pintura electroforética, así como los datos que deben ser considerados y los elementos relevantes para el proceso de construcción del gemelo virtual, incluyendo los movimientos que el sistema debe ejecutar para determinar actuadores y sensores.

Identificación de Entradas y Salidas Lógicas en una grúa

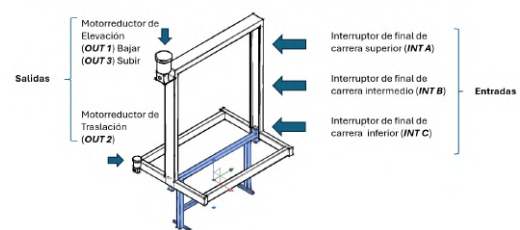


Figura 5. Definición de entradas y salidas en una grúa. Fuente elaboración propia

Identificación de Entradas y Salidas en una grúa. Posición



Figura 6. Movimiento del cargador de la grúa. Fuente elaboración propia

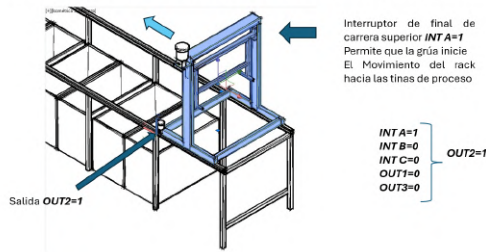
Identificación de Entradas y Salidas en una grúa. Traslación.

Figura 7. Movilidad de las grúas a través del riel de la línea.
Fuente elaboración propia

C. Construcción del gemelo virtual

Para la construcción del gemelo virtual se procedió de la siguiente manera: a) Se generan los componentes principales de la línea de producción en AutoCAD como son soportes, grúas, componentes mecánicos; b) se hace la conversión de los componentes a formato tipo BLENDER, c) se exporta el elemento con formato OBJ d) se integran los componentes acordes la distribución de planta en el software Machine Simulator. Este proceso se presenta en la Figura 8.



Figura 8. Etapas del proceso de virtualización. Fuente: elaboración propia.

Diseño en AUTOCAD de componentes personalizados

Para el diseño de los objetos de la línea de pintura electroforética, se empleó AutoCAD, que se ocupa en diferentes áreas, especialmente en ingeniería. En AutoCAD se pueden desarrollar los modelos de los componentes en 2D y 3D con las especificaciones adecuadas. En este trabajo se utilizó para representar la etapa de preparación y pretratamiento de la línea de pintura electroforética, como se observa en la Figura 9

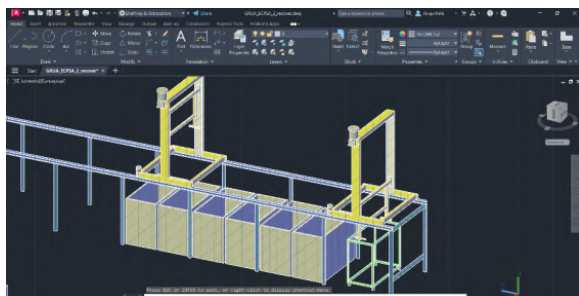


Figura 9. Línea de Producción 3D a escala en AutoCAD. Etapa de preparación y pretratamiento. Fuente elaboración propia.

Los componentes y partes desarrollados por separado en AutoCAD se ensamblan para armar la maqueta virtual inicial. Los objetos 3D principales de la línea de pintura, se muestran la Figura 10.

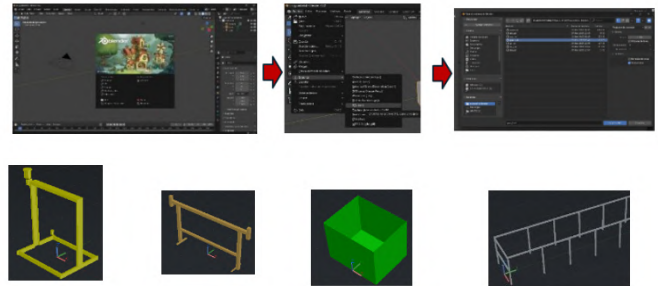


Figura 10. Objetos 3D de la línea de producción con formato STL

Para este caso, cada elemento se guarda como un archivo independiente para desarrollar el proceso de cambiar el formato de DWG a OBJ. Cabe mencionar que las versiones actuales de AutoCAD no permiten exportar los archivos a formatos OBJ en forma directa, por ello, hay que realizar la conversión empleando el programa BLENDER. Como primer paso, en AutoCAD, cada uno de los archivos debe ser exportado como archivo con extensión *.STL. Este tipo de formato puede ser importado a Blender para darle el formato OBJ.

Cambio de formato en software BLENDER

Para hacer la conversión de formato del archivo con extensión STL de AutoCAD, se emplea el programa Blender, en este caso Blender es una suite de animación 3D libre de código abierto y gratuito, se utiliza principalmente para la edición, modelado, simulación, edición de video y creación de juegos. Al importar los archivos STL a Blender es posible darles características tales como la escala y centro, que son requeridos para ser incorporados en Machines Simulator, en donde se construye la línea de pintura. En las figuras 11 y 12 se presenta el proceso desarrollado en BLENDER.

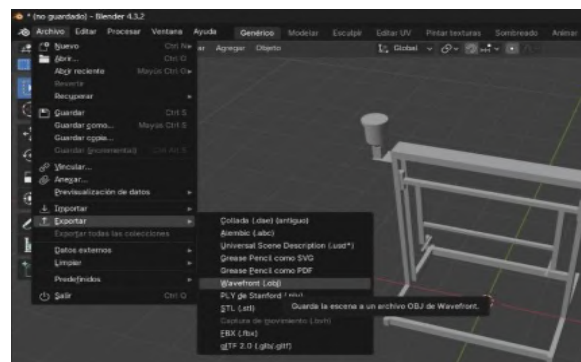


Figura 11. Importar dibujos a Blender

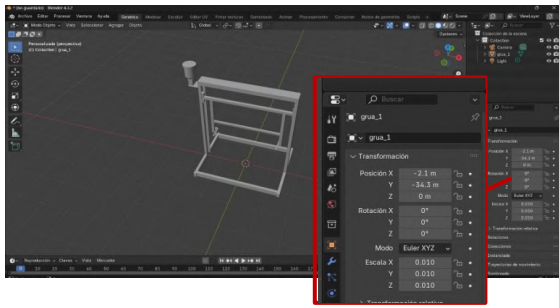


Figura 12. Modificación de la posición y escala en BLENDER

Como los objetos en formato STL son demasiado grandes, es necesario modificar la posición (x,y,z) y la escala para centrar y actualizar el tamaño de las figuras (Ver Figura 13.) En la Figura 13, se presentan los resultados del trabajo desarrollado en Blender, donde se obtiene el archivo tipo OBJ, con características adecuadas para el ambiente de simulación Machines simulator.



Figura 13. Componentes diseñados y exportados con extensión OBJ

VI. Integración de los elementos para construir gemelo virtual

Con los objetos y/o componentes, se construye la línea de producción en el ambiente Machines Simulator, en la Figura 14, se muestra un ejemplo de este software.

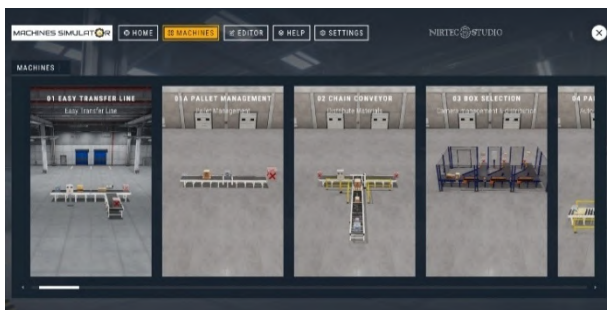


Figura 14. Ambiente de Machines simulator . Fuente: [Machines Simulator - Nirtec. https://www.nirtec.com/wp-content/uploads/2024/11/Maquinas.png](https://www.nirtec.com/wp-content/uploads/2024/11/Maquinas.png)

A. Software Machines simulator.

El software machine simulator es un software de simulación 3D que permite la interacción entre un sistema virtual o gemelo digital y los PLC de la marca SIMENS, Rockwell o algún otro fabricante de acuerdo con las librerías disponibles. Es un software creado por la empresa Nirtec Studio para la simulación de procesos industriales, automatización y gemelos digitales. Dentro del software se encuentran herramientas útiles para simular sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos visualizando modelos digitales que replican las acciones reales de sistemas cotidianos en la industria. En la Figura 15 se

presenta la transición de una línea de producción real a su gemelo virtual mediante empleando componentes personalizados.



Figura 15. Línea de Producción Real – Línea de Producción Virtual para el gemelo virtual.

Al iniciar, el software presenta en la pantalla diferentes cuadros de las funciones que se pueden realizar, como se muestra en la Figura 16. En este menú, se selecciona el cuadro CREAR MÁQUINA. Se puede elegir uno de cuatro posibles escenarios para la creación de la máquina. En este caso, se seleccionó el escenario que se muestra en la Figura 17, denominado como Escenario 1, NAVE1



Figura 16. Menú del software Machines Simulator

B. Integración de componentes para construir gemelo virtual

En esta sección, se presenta el proceso para crear el gemelo virtual de la línea de pintura. Cuando se ha iniciado el escenario, se elige la pestaña UDC del editor, y la instrucción CREAR COMPONENTE DEFINIDO POR EL USUARIO. En el escenario se elige un objeto 3D del menú de herramientas, como se muestra en la Figura 17.

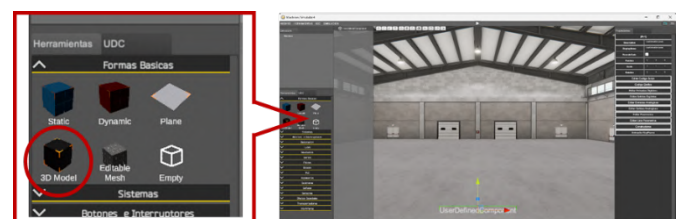


Figura 17. Elección del objeto 3D

Los objetos 3D pueden ser editados para cambiar el modelo, la textura, y programar controladores para los movimientos que realizará dentro de la máquina virtual, el menú para realizar estos cambios se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Menú para realizar cambio en el objeto 3D

C. Cambio de modelo

Al elegir el comando CAMBIAR MODELO, se abre una ventana con diferentes opciones, como lo muestra la Figura 19, en la parte inferior se encuentra la opción “Mis Modelos”. Dentro de esta carpeta, es posible encontrar la carpeta creada para guardar los dibujos 3D con extensión OBJ, que pueden ser trabajos por Machines Simulator.

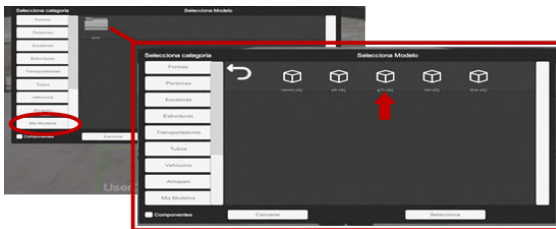


Figura 19. Menú para realizar cambio en el objeto 3D

En la Figura 20 se presenta la importación a Machines Simulator de un archivo con la imagen 3D de la base de la grúa. A partir de ello, el objeto puede manipularse en el programa y configurarse con las propiedades necesarias para interactuar con sensores, botones y las entradas o salidas del PLC. Según la posición asignada como parte de la línea de producción, es posible modificar su ubicación en los ejes X, Y y Z, así como su orientación y sentido.



Figura 20. Objeto editado en forma y en textura

Para objetos que tienen partes internas móviles, se inserta un objeto estático, dicho objeto puede ser modificado en su forma, posición y escala para formar parte del objeto 3D principal. En la Figura 21 se muestra un objeto estático.

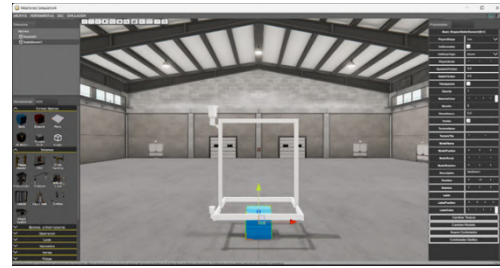


Figura 21. Objeto estático

De igual manera, como se editaron los cambios en la figura principal, se realizan los cambios respectivos en el objeto estático. Editándolo queda como se muestra en la Figura 22.

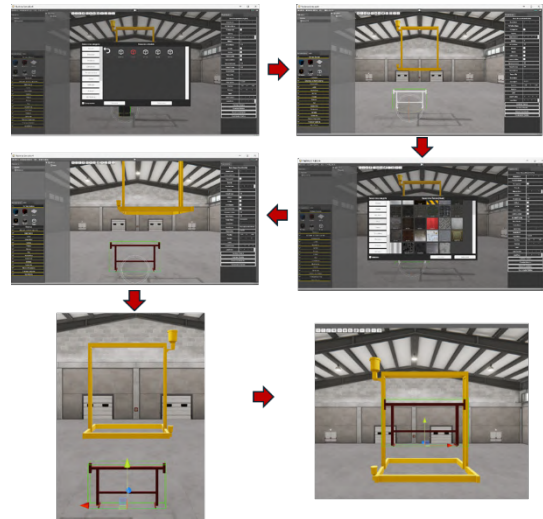


Figura 22. Edición del objeto estático

VII. Creación de controladores.

Una vez que se tienen integrados los componentes en el gemelo virtual, se deben crear los controladores que definen los movimientos verticales del cargador (arriba y abajo) y los movimientos longitudinales de la grúa (al frente y atrás). Se presenta un ejemplo de estos movimientos a continuación. Las propiedades de los controladores son las siguientes:

En la figura 23 se presenta la configuración de propiedades para el controlador con los datos: **Nombre del controlador**, **Tipo de movimiento que realizará**, la **señal** que activa el controlador, y la **etiqueta** de la señal que activará el controlador.

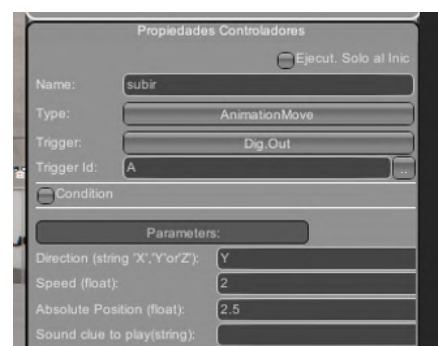


Figura 23. Propiedades del controlador

Con la definición y configuración de los controladores y los objetos móviles que forman parte de la línea virtual, se insertan los objetos fijos que complementan el escenario, tales como el riel sobre el que se desplazan las grúas, las tinas de proceso de inmersión, los interruptores de final de carrera, que envían las señales de posición del cargador y de las grúas, los tableros de control con botones, para las acciones manuales que realizará la línea, como se muestra en la Figura 24, el gemelo virtual personalizado está construido en Machine simulator con los componentes, sensores y actuadores que requiere el proceso y los controladores para cada movimiento.



Figura 24. Línea Virtual

A. Pruebas de operación

Como prueba de la línea de pintura se desarrolla una simulación básica, que valide la operación del sistema, para ello, se hace la elección del DRIVER E/S, eligiendo el PLC SIEMENS como se muestra en la Figura 25.

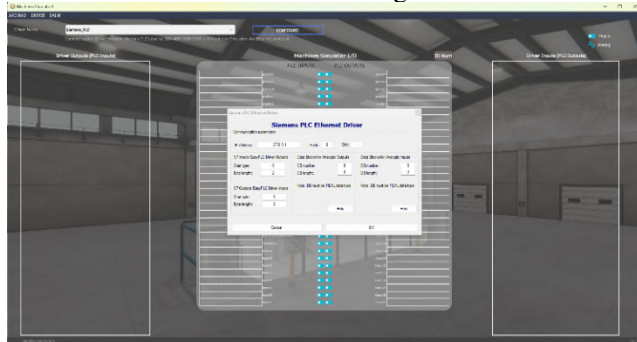


Figura 25. Selección del PLC

Se procede a configurar las entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, y el conector Ethernet virtual (por defecto con la dirección IP asignada 127.0.0.1). Esto se muestra en la Figura 26.

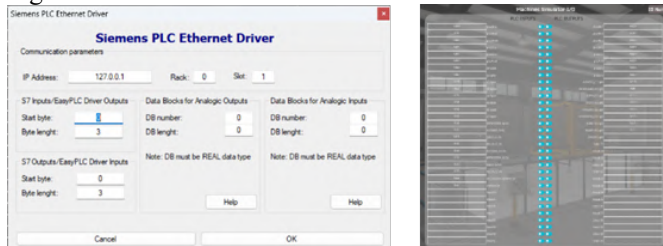


Figura 26. Configuración del puerto ethernet virtual y asignación de Entradas/Salidas

La comunicación entre el PLC virtual de TIA PORTAL y Machines Simulator, se logra por medio de una extensión de red para el simulador PLCSIM, llamada NetToPLCSim, cuya función principal es probar programas de PLC en un entorno virtual. Una vez iniciado este software, solo se requiere determinar la dirección de la red (dirección IP de la simulación en Machines Simulator: 127.0.0.1), y la dirección del PLC de TIA PORTAL (dirección IP PLCSIM: 192.168.0.1). Esto se muestra en la Figura 27.

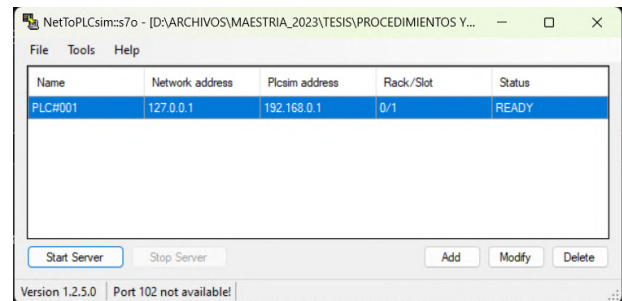


Figura 27. Configuración de NetToPLCSim

Esta configuración puede guardarse para futuros usos dentro de una carpeta que creada por el usuario. Es recomendable iniciar NetToPLCSim antes de abrir los programas TIA PORTAL y Machines Simulator. También se desarrollaron pruebas con el PLC modelo S7-1200 215-1BG31-0XB0 y el software TIA PORTAL de la marca SIEMENS. En este software se creó y compiló un programa básico para iniciar la simulación, el cual fue cargado en PLCSIM y ejecutado al cambiar el sistema al modo RUN.

Para desarrollar la prueba con el PLC físico, se abre el VIRTUAL PLC CPU, incluido en la instalación de Machines Simulator y se coloca en modo RUN, como se muestra en la Figura 28.

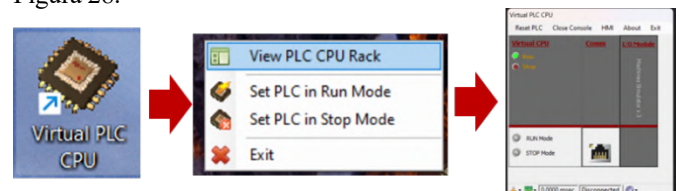


Figura 28. PLC Virtual de Machines Simulator

Para verificar que el proceso es correcto, se verifica que se ha iniciado el PLC con el cambio en el color y estado del Driver a "Driver Conectado" (Ver Figura 29).

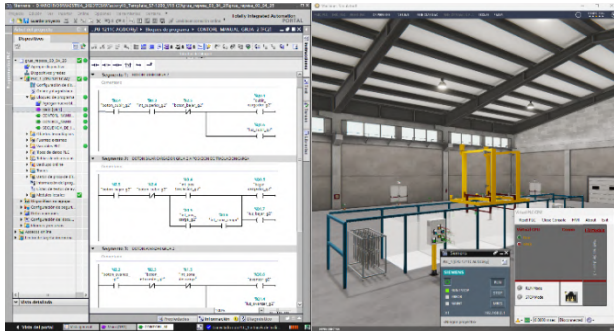


Figura 29. TIA PORTAL, Machines Simulator, PLCSIM y Virtual PLC CPU controlando el movimiento

Con este proceso concluido, el programa de PLC y la línea virtual tienen capacidad de interactuar, permitiendo que el programa en el PLC físico se ejecute en Machines Simulator. La Figura 30 muestra la prueba que al presionar el botón SUBIR del cargador de la grúa, desarrolla la acción de moverse hacia arriba, como ha sido programado en el ladder del PLC.



Figura 30. Control de elevador con botón

En la figura 31 se muestra el movimiento del cargador de la grúa, y las acciones del programa del PLC que controla las acciones del sistema, como se observa desarrolla los diferentes movimientos programados.

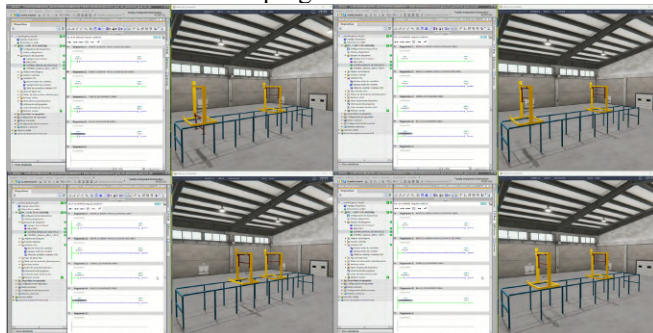


Figura 31. Pruebas de movimiento de la grúa en la línea de pintura controlada por el PLC

En la figura 32 se presenta la arquitectura para desarrollar el control del gemelo virtual de la línea de pintura que se conecta al PLC físico y permite validar el control desarrollado de los diferentes

componentes y sus movimientos. Esto permite validar las operaciones y acciones desarrolladas para el sistema.



Figura 32. Conexión del PLC físico con la línea de pintura electroforética.

VIII. RECOMENDACIONES

Para el diseño de este tipo de líneas de producción como gemelo virtual, es recomendable que se integre un equipo de trabajo que tenga experiencia en el diseño de la línea, diseño mecánico, ingeniería electrónica, automatización y programación de PLC's. Esto para que se puedan reproducir los detalles de operación y control de movimiento del sistema objeto de estudio. Para ello, el objetivo de la construcción virtual de la línea debe estar claro, para que el resultado final esté acorde con sus requerimientos.

IX. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo completo y construcción de un gemelo virtual aplicado a una línea de producción de pintura electroforética, integrando herramientas de diseño, simulación y automatización.

Se identificaron y definieron las acciones electromecánicas clave del proceso, permitiendo una representación precisa y funcional del sistema dentro de un entorno virtual.

Se logró la creación de componentes personalizados para la línea de pintura empleando herramientas CAD, evitando las limitaciones de las bibliotecas predefinidas de los simuladores comerciales, lo que permitió una virtualización fiel al proceso físico real y sus movimientos.

La línea de producción como gemelo virtual fue construida en el software Machines Simulator, integrando modelos 3D diseñados en AutoCAD y convertidos mediante Blender, lo que permitió su posterior simulación de movimiento y control.

Se realizaron pruebas de operación con un PLC virtual y con un PLC físico, mostrando la capacidad del modelo para interactuar en tiempo real con sistemas de control reales, validando su funcionalidad y eficiencia para desarrollo de control de operación y de capacitación de personal.

El gemelo virtual desarrollado representa una herramienta útil para la capacitación, mejora continua y validación de

procesos de automatización industrial, aportando una solución escalable y adaptable a diversas necesidades de manufactura.

REFERENCIAS

- [1] M. Soori, B. Arezoo, y R. Dastres, “Digital twin for smart manufacturing, A review”, *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, p. 100017, abr. 2023, doi: 10.1016/J.SMSE.2023.100017.
- [2] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, y M. Dassisti, “Digital twin paradigm: A systematic literature review”, *Comput Ind*, vol. 130, sep. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [3] M. Wynn y J. Irizar, “Digital Twin Applications in Manufacturing Industry: A Case Study from a German Multi-National”, *Future Internet*, vol. 15, núm. 9, sep. 2023, doi: 10.3390/fi15090282.
- [4] C. Latsou, D. Ariansyah, L. Salome, J. Ahmet Erkoyuncu, J. Sibson, y J. Dunville, “A unified framework for digital twin development in manufacturing”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 62, oct. 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102567.
- [5] A. Mares, D. Sabadka, Y. Molnar, y G. Fedorko, “Improving competitiveness of an assembly line by simulation based productivity increase – A case study”, *Journal of Competitiveness*, vol. 15, núm. 3, pp. 43–59, sep. 2023, doi: 10.7441/joc.2023.03.03.
- [6] E. Yildiz, C. Möller, y A. Bilberg, “Virtual factory: Digital twin based integrated factory simulations”, en *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2020, pp. 216–221. doi: 10.1016/j.procir.2020.04.043.
- [7] F. Longo, A. Padovano, L. Nicoletti, M. Elbasheer, y R. Diaz, “Digital twins for manufacturing and logistics systems: is simulation practice ready?”, en *European Modeling and Simulation Symposium, EMSS*, 2021, pp. 435–442. doi: 10.46354/i3m.2021.emss.062.
- [8] Jaume. Gual Ortí, *Fundamentos del modelado y prototipado virtual en el diseño de productos*. Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions, 2011.
- [9] A. B. Ortega, A. M. Salazar, F. A. G. Becerra, C. H. Guzmán Valdivia, y E. A. Leyva, “Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales”, *Tecnológico Nacional de México en Celaya Pistas Educativas*, vol. 40, núm. 130, Celaya, pp. 1421–1439, noviembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [10] S. R. Nagrani, M. S. Nagrani, V. S. Narwane, y K. J. Somaiya, “Employing Digital Twins technology to model and simulate manufacturing processes in industries”. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/389767568>
- [11] L. S. McGuire, A. Fuentes, y A. Alaraj, “Three-Dimensional Modeling in Training, Simulation, and Surgical Planning in Open Vascular and Endovascular Neurosurgery: A Systematic Review of the Literature”, *World Neurosurg*, vol. 154, pp. 53–63, oct. 2021, doi: 10.1016/J.WNEU.2021.07.057.
- [12] K. H. C. Li et al., “The role of 3D printing in anatomy education and surgical training: A narrative review”, *MedEdPublish*, vol. 6, p. 92, jun. 2017, doi: 10.15694/mep.2017.000092.
- [13] X. Shao et al., “Virtual reality technology for teaching neurosurgery of skull base tumor”, *BMC Med Educ*, vol. 20, núm. 1, pp. 1–7, ene. 2020, doi: 10.1186/s12909-019-1911-5.
- [14] R. Saracco, “Digital Twins: Evolution in Manufacturing”, may 2022.
- [15] Industrial Internet Consortium, “Digital Twins for Industrial Applications”, feb. 2020.
- [16] J. Feldt, T. Kourouklis, H. Kontny, y A. Wagenitz, “Digital twin: Revealing potentials of real-time autonomous decisions at a manufacturing company”, en *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2020, pp. 185–190. doi: 10.1016/j.procir.2020.05.033.
- [17] Abhinav Parashar A Singh y Neepakumari Gameti, “Digital Twins in Manufacturing: A Survey of Current Practices and Future Trends”, *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 13, núm. 1, pp. 1240–1250, sep. 2024, doi: 10.30574/ijrsra.2024.13.1.1705.
- [18] W. Luo, T. Hu, C. Zhang, y Y. Wei, “Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy”, *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 10, núm. 3, pp. 1129–1140, mar. 2019, doi: 10.1007/S12652-018-0946-5.
- [19] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, y P. Ji, “Digital twin modeling”, *J Manuf Syst*, vol. 64, pp. 372–389, jul. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
- [20] RIM Reportero industrial mexicano, “Sensorización”. Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rim.com.mx/portal/noticias-detalle/6752/Sensorizacion%20e%20Inteligencia%20Artificial%20en%20las%20lineas%20de%20produccion%20/automotriz>
- [21] Y. Tan, W. Xu, S. Li, y K. Chen, “Augmented and Virtual Reality (AR/VR) for Education and Training in the AEC Industry: A Systematic Review of Research and Applications”, el 1 de octubre de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/buildings12101529.
- [22] X. Han, Y. Chen, Q. Feng, y H. Luo, “Augmented Reality in Professional Training: A Review of the Literature from 2001 to 2020”, el 1 de febrero de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app12031024.
- [23] K. Sun, “Innovative Applications of Virtual Reality and Augmented Reality in Education”, *Transactions on Comparative Education*, vol. 6, núm. 2, pp. 76–82, 2024, doi: 10.23977/trance.2024.060211.
- [24] A. K. Jumani, W. A. Siddique, A. A. Laghari, A. Abro, y A. A. Khan, “Virtual Reality and Augmented Reality for Education”, en *Multimedia Computing Systems and Virtual Reality*, CRC Press, 2022, pp. 189–210. doi: 10.1201/9781003196686-9.
- [25] L. Christ, E. Milloch, M. Boshoff, A. Hypki, y B. Kühlenkötter, “Implementation of Digital Twin and Real Production System to Address Actual and Future Challenges in Assembly Technology”, *Automation*, vol. 4, núm. 4, pp. 345–358, dic. 2023, doi: 10.3390/automation4040020.
- [26] D. Guerra-Zubiaga, V. Kuts, K. Mahmood, A. Bondar, N. Nasajpour-Esfahani, y T. Otto, “An approach to develop a digital twin for industry 4.0 systems: manufacturing automation case studies”, *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, núm. 9, pp. 933–949, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1946857.
- [27] J. S. Ortiz, E. K. Quishpe, G. X. Sailema, y N. S. Guamán, “Digital Twin-Based Active Learning for Industrial Process Control and Supervision in Industry 4.0”, *Sensors*, vol. 25, núm. 7, abr. 2025, doi: 10.3390/s25072076.
- [28] Siemens, “Siemens fabrica virtual”, Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://webinars.sw.siemens.com/es-ES/virtual-development-of-automotive-manufacturing/>
- [29] Industria4punto0, “Simulación industria 4p0”, Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://industria4punto0.net/industria-4-0/simulacion-digital-herramienta-clave-innovacion-industria-40/>
- [30] S. Gallego-García, M. Groten, y J. Halstrick, “Integration of Improvement Strategies and Industry 4.0 Technologies in a Dynamic Evaluation Model for Target-Oriented Optimization”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, núm. 3, pp. 1–21, feb. 2022, doi: 10.3390/app12031530.
- [31] E. Yildiz, C. Möller, y A. Bilberg, “Virtual factory: Digital twin based integrated factory simulations”, en *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2020, pp. 216–221. doi: 10.1016/j.procir.2020.04.043.
- [32] H. Huang, T. Ji, y X. Xu, “An adaptable Digital Twin model for manufacturing”, en *Manufacturing Letters*, Elsevier, Ed., Elsevier, 2024, pp. 1163–1169. [En línea]. Disponible en: www.sciencedirect.com
- [33] H. G. Lemu, “Virtual engineering in design and manufacturing”, *Adv Manuf*, vol. 2, núm. 4, pp. 289–294, dic. 2014, doi: 10.1007/s40436-014-0085-y.
- [34] A. Kampa, “Modeling and Simulation of a Digital Twin of a Production System for Industry 4.0 with Work-in-Process Synchronization”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, núm. 22, nov. 2023, doi: 10.3390/app132212261.
- [35] R.-N. Javier-Cruz, “¿Qué es la ingeniería de superficies?”, vol. 1, núm. 37, pp. 1–5, enero de 2025.
- [36] D.-F. García-Retama, “Recubrimientos poliéster termo curables aplicados electrostáticamente para la industria automotriz”, Centro de investigación en química aplicada, 2018.

- [37] F. F. Estrada Martínez, D. V. Melo-Máximo, y R. C. Vega-Morón, "Un acercamiento a la Ingeniería de Superficies", vol. 3, pp. 5-9, 2024.
- [38] H. A. Al-Libawy, D. M. Jasim, E. Abdul, R. Hussein, y H. Al-Libawy, "Cathodic protection systems: approaches and open challenges Sistemas de protección catódica: enfoques y desafíos abiertos", vol. 36, pp. 956-967, dic. 2023, doi: 10.5377/nexo.vXXiXX.XXXX.
- [39] I. Jose y G. Salinas Ocampo, "Modificación de Línea de Pintura para Mejora del Desempeño del Recubrimiento en Autopartes", en *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2021*, Celaya: Academia Journals 2021, nov. 2021, pp. 2324-2329.
- [40] Simio. Forward Thinking, "Simio". Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.simio.com/es/5-tecnologias-de-digitalizacion-para-implantar-la-industria-4-0/>
- [41] Cursos Femxa, "Femxa", Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cursosfemxa.es/blog/gemelos-digitales#pasos-creacion>
- [42] Litslink Starups Laboratory, "Linklink", <https://litslink.com/blog/what-is-digital-twin-in-manufacturing-inspiring-industry-examples>, Consultado: el 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://litslink.com/blog/what-is-digital-twin-in-manufacturing-inspiring-industry-examples>



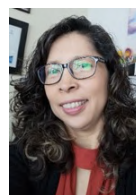
LAZARO MERLO RAMIREZ recibió el título de Ingeniero en Electrónica por parte del TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla en el año 1999. Actualmente desarrolla estudios de Maestría en Ingeniería electrónica en la misma institución. Ha sido responsable del mantenimiento predictivo, correctivo y preventivo de maquinaria y equipo industrial resolviendo fallas y automatizando equipo,

administrando personal, supervisando el mantenimiento electrónico, eléctrico, mecánico y de soldadura. Ha colaborado como ingeniero de mantenimiento y proyectos en la empresa Electro Comercializadora de Puebla S.A. de C.V. Ha trabajado para colchones Lester como supervisor de Mantenimiento y Gerente de mantenimiento para la empresa Costuras y manufacturas de Tlaxcala. Se ha desempeñado como catedrático en el área de ciencias exactas a nivel Secundaria y Licenciatura. Es coautor de 3 publicaciones en el área de óptica y ciencia de materiales.



JOSE RAFAEL MENDOZA VAZQUEZ obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en Electrónica (2010) y de Maestro en Ciencias en Electrónica (2003) por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), con trabajos en modelado de mecanismos paralelos aplicados a prótesis y en control de robots de dos grados de libertad. Es Ingeniero Industrial Electrónico (1996) por el Instituto Tecnológico de Puebla. En el ámbito profesional, ha colaborado en

proyectos de instalaciones eléctricas, redes de datos y comunicaciones para el INEGI y en el INAOE en el desarrollo de robots de aplicación específica y militar, en áreas de instrumentación, robótica, automatización y control para la Secretaría de Marina. Su experiencia docente incluye cursos en la Universidad Alva Edison, la Universidad Tecnológica de Puebla y el TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, donde actualmente es profesor de tiempo completo en licenciatura y posgrado en Ingeniería Electrónica. Ha participado en congresos nacionales e internacionales con publicaciones arbitradas y ponencias en robótica, control y sistemas educativos. Sus líneas de investigación abarcan robótica, modelado, control de movimiento, procesamiento de señales y sistemas interactivos. Posee perfil PRODEP y lidera el Cuerpo Académico Sistemas Interactivos y Realidad Virtual en Consolidación.



IRMA DELIA ROJAS CUEVAS Irma Delia Rojas Cuevas recibió el grado de Doctora en Logística y Gestión de la Cadena de Suministro con Mención de Honorífica en 2019 por parte de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Recibió el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Industrial en el área de Manufactura por parte del Instituto Politécnico Nacional División UPIICSA, en 2000. Recibió el título de

Ingeniero Industrial por parte del Instituto Tecnológico de Puebla en 1996. Es Profesor del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Puebla, México, en el Departamento de Ingenierías. Tiene publicaciones en revistas indexadas y congresos de buen nivel. Ha impartido conferencias en las áreas de desarrollo de sistemas, logística y cadena de suministro. Es miembro del grupo académico en consolidación "Sistemas Interactivos y Realidad Virtual" con registro PRODEP (ITPUE-CA-4). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Su investigación se encuentra en el área de sistemas interactivos y realidad virtual con énfasis en sistemas mecatrónicos.



SERGIO JAVIER TORRES MENDEZ recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica en 2014 por parte de la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá; el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica en 2008 por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por parte del Instituto Tecnológico de Veracruz en 1995. Es Profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Puebla

desde 1995 y auxiliar en el Laboratorio de Manufactura Avanzada desde 2015. Es miembro del cuerpo académico en Consolidación: Sistemas interactivos y realidad virtual. Sus intereses de investigación se relacionan con el diseño y desarrollo de robots de alta velocidad y de sistemas mecatrónicos interactivos para la asistencia humana. Así también, se están realizando estudios para el desarrollo de sistemas mecatrónicos automotrices que sean amigables con el medio ambiente.



VICENTE RAMIREZ PALACIOS recibió el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica en 1997 del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, recibe el título de Ingeniero Industrial en Electrónica en 1996 del Instituto Tecnológico de Puebla. Es Profesor de tiempo completo a nivel Licenciatura en el Instituto Tecnológico de Puebla. Trabajando en Automatización y Control de Procesos, utilizando algoritmos PID, Lógica Difusa y Redes Neuronales;

comunicando los procesos a través de Redes Industriales como son: Red ASi, Red Profibus, Red Ethernet y Red Profinet, teniendo Control y Adquisición de Datos de los procesos por medio de un SCADA. Integrante del cuerpo académico en consolidación "Sistemas Interactivos y Realidad Virtual" <http://ca.realidaditp.com/>. laborador en los proyectos: Integración de una banda transportadora a una celda flexible CIM, Diseño y construcción de robot tipo grúa, Desarrollo de un sistema prototipo mecatrónico para aplicaciones de desplazamiento de invidentes en ambientes no estructurados, Impresión 3D de una mano robótica, Identificación del grado de madurez de jitomate por medio de visión artificial y Sistema interactivo multiplataforma, aplicado al control y registro de personal en forma automatizada.