

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



*Implementación de un control industrial de señales reales
con PLC mediante modelado de sistemas dinámicos en
escenarios de realidad virtual*

TESIS QUE PRESENTA

M.C. Guillermo Reyes Morales
Asesor: Dr. Jorge Alberto Ortega Moody

Para obtener el grado de

Doctor en
Manufactura Avanzada

Coatzacoalcos, Veracruz
octubre, 2021

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



School of Engineering and Information Systems
210 Lloyd Cassity Bldg.
Morehead, Kentucky 40351-1689
Phone: 606-783-2013
Fax: 606-783-5035

Morehead KY, USA, 16 de agosto del 2019.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de Guillermo Reyes Morales, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Implementación de un control industrial de señales reales con PLC mediante modelado de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual" autorizo/amos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de Doctor en Manufactura Avanzada.

Sin otro particular por el momento, agradezco (agradecemos) la atención prestada.

Firma

Dr. Jorge Alberto Ortega Moody
Asesor académico

Firma

Nombre:
Asesor en Planta

F31a Revisión: 01-Jun-2021

MSU is an affirmative action, equal opportunity, educational institution

www.moreheadstate.edu

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Villahermosa, Tabasco, 17 de junio del 2021.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Guillermo Reyes Morales**, cuyo título es:

“Implementación de un control industrial de señales reales con PLC mediante modelado de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual”

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

Dra. Leonor Adriana Cárdenas Robledo

Calle 23 de agosto No. 213, Col. Jesús García, CP. 86040, Villahermosa, Tabasco, México.
+52 (993) 316 83 63 www.ciateq.mx





GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Santiago de Querétaro, Qro., 5 de octubre del 2021.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **GUILLERMO REYES MORALES**, cuyo título es:

“Implementación de un control industrial de señales reales con PLC mediante modelado de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual”

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Óscar Hernández Uribe

Av. del Retablo No. 150, Col. Constituyentes Fovissste, CP. 76150, Querétaro, Qro., México.
Tel: +52 (442) 211 26 00 www.ciateq.mx



DEDICATORIA

...A mi esposa Verónica y a mis hijos Ana Marien, Guillermo Benjamín y Carlos Eduardo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación de Tecnología Avanzado del Estado de Querétaro (CIATEQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las facilidades concedidas hacia la realización y conclusión de mis estudios de posgrado.

Un especial agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Jorge Alberto Ortega Moody; gracias por el tiempo que me ha dedicado, por su comprensión y paciencia, pero sobre todo por su aportación a la culminación de este proyecto.

A mi asesor de planta, el Dr. Roger Ernesto Sánchez Alonso, por el apoyo incondicional para la culminación del proyecto.

A mis revisores de tesis, la Dra. Leonor Adriana Cárdenas Robledo y el Dr. Óscar Hernández Uribe, por los comentarios y consejos que permitieron enriquecer esta tesis; por su perseverancia hacia el desarrollo de mi proyecto, la disponibilidad y apoyo brindado, muchas gracias.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación fue demostrar el funcionamiento de un sistema dinámico en un entorno de realidad virtual, estableciendo la automatización con un control industrial PLC (Control Lógico Programable). La metodología utilizada sigue los objetivos de desarrollo de los "Serious Games", que aplica motores de física o ciberfísicos cuyo proceso a virtualizar o caso de estudio fue bajo las series de especificaciones físicas del proceso de "la puesta en operación virtual para planta embotelladora automatizada".

El comportamiento dinámico de los elementos mecánicos, sensores, actuadores, planta, entre otros, fue diseñado en CAD (Diseño Asistido por Computadora), los cuales son insertados en los motores ciberfísicos para asegurar su comportamiento lo más cercano posible a la realidad mediante la simulación.

Como resultado, se obtuvo un modelo matemático de ecuaciones diferenciales con respuesta en tiempo discreto para definir el sistema dinámico. A dicho modelo matemático se le dio un tratamiento mediante los programas Minitab y Matlab R2015, logrando demostrar su relevancia para ser implementado en la etapa del sistema ciberfísico. Lo anterior se validó con la implementación del control industrial PLC para la formación en tiempo real mediante el procesamiento de señales.

Palabras clave: Automatización, Realidad virtual, Sistema ciberfísico, Procesos.

ABSTRACT

The objective of this research work was to demonstrate the operation of a dynamic system in a virtual reality environment, establishing automation with an industrial control PLC (Programmable Logic Control). The methodology used follows the development objectives of the "Serious Games", which applies physics or cyber-physical engines whose process to virtualize or case study was under the series of physical specifications of the process of "the virtual start-up for an automated bottling plant".

The dynamic behavior of the mechanical elements, sensors, actuators, plant, among others, was designed in CAD (computer-aided design), which are inserted in the cyber-physical engines to ensure their behavior as close as possible to reality through simulation.

As a result, a mathematical model of differential equations with response in discrete time was obtained to define the dynamic system. This mathematical model was given a treatment through the Minitab and Matlab R2015 programs, managing to demonstrate its relevance to be implemented in the cyber-physical system stage. The above was validated with the implementation of the industrial PLC control for real-time training through signal processing.

Keywords: Automation, Virtual reality, Cyber-physical systems, Processes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
GLOSARIO	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	4
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	6
1.3. JUSTIFICACIÓN	7
1.4. OBJETIVOS	8
1.4.1. Objetivo general.....	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5. HIPÓTESIS.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. USO DE PLATAFORMAS PARA LABORATORIOS VIRTUALES EN APLICACIONES DE DESARROLLO CON MODELADO EN ROBÓTICA INDUSTRIAL.....	10
2.1.1. Adiestramiento en el área de automatización y control en escenarios virtuales industriales	18
2.2. TEORÍAS APLICADAS AL DESARROLLO DE PLANTAS INDUSTRIALES	22
2.2.1. Teoría de control clásica.....	22
2.2.2. Teoría de los sistemas digitales	24
2.3. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)	29
2.3.1. Implementación en un PLC con requerimientos en tiempo real.....	31
2.3.2. Conceptos para el software de automatización flexible	32
2.3.3. PID del controlador lógico programable.....	34
2.4. PLANTA INDUSTRIAL AUTOMATIZADA VIRTUALMENTE.....	36
3. PROCEDIMIENTO	45
3.1. TEMA DE ESTUDIO: PUESTA EN OPERACIÓN VIRTUAL PARA PLANTA EMBOTELLADORA AUTOMATIZADA	45
3.2. METODOLOGÍA.....	46
3.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	47

3.3.1. Arquitectura del sistema.....	47
3.3.2. Implementación	49
3.3.3. Tipos de entrenamiento.....	50
3.4. EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO	52
3.4.1. Modelado 3D	55
3.4.2. Ensamblaje y arreglo de la escena virtual.....	56
3.5. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DINÁMICO DE LOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS	57
3.6. DISEÑO ELÉCTRICO Y PLACA DE CIRCUITO IMPRESO	66
3.7. CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN.....	67
4. RESULTADOS	70
4.1. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CON MINITAB 2019	70
4.1.1. Muestreo de una señal	70
4.1.2. Cuantificación de una señal	71
4.2. RESULTADO DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA APLICANDO MATLAB R2015	75
4.3. RESULTADO DEL LABORATORIO DE REALIDAD VIRTUAL PARA LA PROGRAMACIÓN DEL PLC's	82
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	90
APORTACIÓN DE LA TESIS	91
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	92
REFERENCIAS	93
ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de PLC vendidos en 2016 y arquitectura de banco de prueba..	19
Figura 2. SCADA Áreas de Aplicación	19
Figura 3. Aproximación de muestreo y retención por tiempo muerto	25
Figura 4. Estandarización en la programación del PLC: a) Administración Shell y b) Submodelos y estándares relevantes para el Shell de administración	30
Figura 5. Número de publicaciones basadas en la puntuación de la base de datos Scopus	39
Figura 6. Evolución histórica de la simulación	40
Figura 7. Metodología	46
Figura 8. Arquitectura del sistema	49
Figura 9. Ingeniero dentro de la escena.	51
Figura 10. Ingeniero programando el PLC.	52
Figura 11. Planta embotelladora virtual. a) Perspectiva general. b) Sistema de mezclado y calentamiento. c) Sistema de llenado. d) Operario tocando botella llena.....	54
Figura 12. Interacción en el escenario virtual mediante 'oculos rift'	57
Figura 13. Presentación del sistema dinámico (tanque de mezclado y calentamiento)	65
Figura 14. Banda transportadora y actuador neumático	66
Figura 15. Diseño y trazado de la placa de circuito impreso.....	67
Figura 16. Perspectiva de la ejecución del programa de control en RS Logix 500.	69
Figura 17. Prueba de normalidad en la función de transferencia.	73
Figura 18. Prueba de no normalidad en la función de transferencia.....	74
Figura 19. Distribución normal a partir de 0.85 de la función de transferencia.....	74
Figura 20. Nivel de confianza del 95% de la función de transferencia.....	75
Figura 21. Representación de la planta en tiempo continuo	76
Figura 22. Gráfica de la planta usando la función de Tustín en MATLAB R2015	77
Figura 23. Representación del 20% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel	78
Figura 24. Representación del 63% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.	78
Figura 25. Representación del 90% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.	79

Figura 26. Representación del 100% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.....	79
Figura 27. Representación de la planta al 20%, 63%, 90% y 100% en tiempo continuo	80
Figura 28 a) Inicio del diagrama de escalera de la operación de la fábrica.	83
Figura 28 b) Secuencia del diagrama de escalera de la operación de la fábrica.	83
Figura 28 c) Contadores y temporizadores de la operación de la fábrica.....	84
Figura 28 d) Final de la secuencia del programa del PLC de la operación de la fábrica.	84
Figura 29. PLC Compact Logic 5370 L1 de Allen Bradley	85
Figura 30. Módulo de botoneras.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de fabricantes de PLC en el mercado global	29
Tabla 2. Comparación de técnicas, atributos y costos	41
Tabla 3. Comparación entre metodologías de formación	41
Tabla 4. Fuentes de revisión sistemática: bases de datos de búsqueda, cadenas y número de resultados.....	42
Tabla 5. Revisión sistemática de laboratorios virtuales.....	43

GLOSARIO

Automatización industrial. Es el uso de procedimientos o elementos automatizados y electromecánicos para fines industriales.

Controlador. Subsistema que forma el ingreso a la planta o proceso.

Controlador proporcional integral derivativo (PID). Controlador que mantiene en forma directa en la planta una igualdad de la señal de actuación más su integral y su derivada, para optimizar la respuesta transitoria y el error en su etapa estable de un sistema en lazo cerrado.

Control realimentado. El control realimentado representa a una acción que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando un balance entre esta diferencia. Aquí solo se detallan con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

Error de cuantización. Para sistemas lineales, error asociado con la digitación de señales como resultado de la diferencia finita entre niveles de cuantización.

Escenarios virtuales. Percepción en 3D de entornos simulados que permiten trasladar al usuario a mundos de ensueño y le posibilitan viajar a través del tiempo al pasado y al futuro. Permite una inmersión total en una simulación de la realidad, donde el usuario puede interactuar con el mundo virtual de una forma similar a como interactúa con el mundo real (Becerra et al., 2019).

Función de transferencia. Relación entre la transformada de Laplace de la salida de un sistema y la transformada de Laplace de la entrada.

Motor de física Unity 3D. Es un software que permite el desarrollo de entornos 3D diseñados específicamente para el desarrollo de videojuegos (también conocido como un motor de física). Unity crea un entorno 3D con comportamiento real a través de secuencias de comandos y una interacción completa con el usuario, así como compatibilidad con hardware de realidad virtual como Oculus Rift (Ricciello, 2014).

Oculus Rift. Casco de realidad virtual con auricular. Se trata de un dispositivo montado en el cráneo que tiene una pantalla estereoscópica, que proporciona imágenes separadas para cada ojo, sonido y sensores de seguimiento de movimientos como los controladores de juego como accesorio (Kuchera, 2016).

Perturbaciones. Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.

Planta. Una planta puede ser parte de un sistema, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En este trabajo de investigación, se citará como planta a la representación física del tanque donde se lleva a cabo la transferencia de calor.

PLC. Es una computadora industrial robusta que acepta datos de entrada, tanto digitales como analógicos, de interruptores y sensores, y controla las salidas para impulsar dispositivos como motores, dispositivos neumáticos e indicadores de estado. En su forma más básica, el PLC reemplaza los circuitos lógicos de relé; en su forma más avanzada puede implementar algoritmos de control proporcional integral y derivativo (PID) a través de redes.

Proceso. El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que

conducen a un resultado o propósito determinados, o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o fin determinado.

Programación. Es un proceso que se utiliza para idear acciones que se realizarán en el marco de un proyecto. También se emplea para designar a la preparación de autómatas para que efectúen una cierta tarea en un instante determinado, a la preparación de programas para la resolución de problemas mediante ordenadores y a la preparación de los datos precisos para lograr la solución de un problema.

Señales reales. Las señales son manifestaciones de la amplia diversidad de fenómenos físicos que están presentes en nuestro entorno, en la naturaleza, en el planeta. Las señales también se producen en procesos y actividades realizados por el ser humano; en cualquier caso, contienen información y de ahí su importancia. Cuanto más se conozca de una señal, más se conocerá acerca del comportamiento y características del propio fenómeno físico o proceso en cuestión.

Sistema. Un sistema es una composición de mecanismos que operan juntos y cumplen un objetivo determinado. Un sistema no está precisamente restringido a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por lo tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos, entre otros.

Sistema ciberfísico. Es la combinación de contrapartes físicas (hardware) y digitales (software) para mejorar las capacidades en la toma de decisiones. Es un concepto innovador aplicado a las infraestructuras modernas para incorporar mecanismos inteligentes de recopilación de datos, circuitos de detección y retroalimentación para respaldar las decisiones (Czekster et al., 2021).

Sistema dinámico. Un sistema es una composición de componentes que actúan juntos y cumplen un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente condicionado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por lo tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos, entre otros.

Sistema embebido. Es una técnica incluida en la electrónica (embebido) dentro de un dispositivo completo que incluye otras partes (mecánicas, electromecánicas, entre otros), incluido el procesamiento de datos.

Transformada de Tustín. Transformada bilineal que convierte funciones de transferencia continuas a muestreadas y viceversa. La característica importante de la transformada de Tustín es que ambas funciones de transferencia dan la misma respuesta de salida en los instantes de muestreo.

Transformada de Laplace. Transformada que permite representar ecuaciones diferenciales lineales como expresiones algebraicas. La transformada es especialmente útil para modelar, analizar y diseñar sistemas de control, así como para resolver ecuaciones diferenciales lineales.

Transformada z. Transformada relacionada con la transformada de Laplace que se emplea para la representación, análisis y diseño de señales y sistemas muestreados.

Variable controlada y señal de control o variable manipulada. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema, para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado.

1. INTRODUCCIÓN

Los laboratorios de realidad virtual se han diseñado para entrenamiento de personal y así evitar daños a equipos y personas que pudieran suceder en la práctica. Ejemplos de este tipo de laboratorios son los instalados para pilotos aviadores (Marayong et al., 2020), entrenamientos de naves aeroespaciales (Bruguera et al., 2019; Piechowski et al., 2020; Pasqualetto Cassinis et al., 2021), entrenamiento de practicantes de medicina en operaciones (L. Li et al., 2017; Wijewickrema et al., 2017), entre otros.

De acuerdo con la limitante que se tiene en equipos de laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla (ITSSAT), se planteó la importancia de instalar un control industrial con un PLC mediante modelado de un sistema dinámico en escenarios de realidad virtual para entrenamiento de programación.

Con este proyecto, se aprovechan los avances de la tecnología que innovará en las clases con los entrenamientos a los alumnos (Kamińska et al., 2019). De acuerdo con la revisión bibliográfica de (Pinho et al., 2018), donde la evidencia demuestra que hay una gran escasez de artículos científicos en el contexto de las IES sobre portales web. Por su parte, el análisis de Salmerón-Manzano & Manzano-Agugliaro, 2018, presenta las principales instituciones con investigación en laboratorios virtuales y sus principales indicadores bibliométricos, en el figura al menos hay una institución mexicana. Con este escenario, se puede dar por hecho que el laboratorio estará a la vanguardia, debido a la falta de laboratorios virtuales actualmente en las instituciones educativas de México.

Entre las complicaciones a los que se afrontan las instituciones y centros de nivel superior para la formación en automatización y control se encuentran la dotación de equipamiento industrial físico, el mantenimiento de un laboratorio completo (Nyemba et al., 2017), así como el hecho de que los estudiantes en el desarrollo de su formación pueden dañar involuntariamente algunos componentes del sistema o sufrir daños de seguridad al estar iniciando su aprendizaje (Quarta et al., 2017;

Stankova et al., 2018; Pérez-Ramírez et al., 2019). Por ello, el objetivo de este trabajo de investigación es dar solución a estos inconvenientes mediante el aprovechamiento de las tecnologías emergentes, con enfoque primordial en la realidad virtual.

Por otro lado, el hecho de tener un laboratorio físico no garantiza el adecuado aprendizaje de los estudiantes, ya que muchas veces estos sistemas son cerrados, lo que impide que se tenga una experiencia más enriquecedora que la de simplemente manipular cualquier equipo industrializado a través de una interfaz gráfica o de botones para la operatividad de dichos equipos (Ortega Moody et al., 2016).

Es precisamente ahí donde se empiezan a valorar las bondades que las herramientas de simulación ofrecen, particularmente la realidad virtual. Por consiguiente, una aplicación importante de estos laboratorios en la industria es la puesta en operación virtual de una planta automatizada en tiempo real.

Asimismo, para el desarrollo de este trabajo de investigación se han estructurado cuatro capítulos. En el primer capítulo ("Introducción") se hace una amplia presentación del objeto de estudio, así como la idea principal del trabajo de investigación a efectuar.

En el segundo capítulo ("Marco teórico") se hace un análisis de la información obtenida de autores que presentan trabajos como aplicaciones de modelados matemáticos en las diferentes áreas industriales, que incluyen el desarrollo de plataformas virtuales. Además, se analiza la aplicación de metodologías que han implantado en aplicaciones de realidad virtual, siguiendo los objetivos de los "Serious Games" (juegos serios o formales, en español), directriz relativamente nueva que utiliza motores ciberfísicos y diferentes herramientas de gran disponibilidad (software y hardware) para desarrollar aplicaciones virtuales con propósitos que van más allá del pasatiempo (Martín-Gutiérrez et al., 2017; Feng et al., 2018).

En el tercer capítulo ("Procedimiento") se explica el desarrollo de la arquitectura, es decir, la metodología aplicada en la totalidad de los escenarios virtuales del caso de estudio en la puesta en marcha virtual de la automatización de una planta industrial, así como la mejora de aplicaciones de realidad virtual. En este apartado, se reconoce también la inclusión de código de programación en lenguajes de alto nivel, lo cual hizo posible la implementación del modelado dinámico de los sistemas físicos embebidos en la escena, con el fin de certificar una simulación adherida a la realidad.

En el cuarto capítulo ("Resultados") se determinó de forma experimental de la función de transferencia del sistema dinámico con el software Minitab, así como el comportamiento del modelo matemático de la planta por medio del software Matlab R2015 y la implementación del control industrial a la planta virtual por medio de la programación en escalera. Tales datos mostraron que los algoritmos propuestos funcionan logrando alcanzar el objetivo inicial de este trabajo de investigación.

Ante este escenario, se plantea la posibilidad de realizar un protocolo de comunicación e incorporar el escenario virtual y cualquier control industrial con señales en tiempo real, como el PLC. Asimismo, se propone el diseño de un modelo de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual, que esté enfocado en la capacitación y entrenamiento de programación de PLC a nivel industrial.

De esta manera, el desarrollo de la implementación de un control industrial a un escenario virtual de una planta representa una innovación hacia la formación en la programación en PLC, al instante de un sistema virtual inmersivo. Dicho procedimiento se pondrá en funcionamiento en los cursos de automatización y control industrial ofrecidos por los programas académicos de la carrera de Ingeniería Industrial, Ingeniería Electromecánica, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ingeniería en Informática e Ingeniería Mecatrónica que oferta

el ITSSAT, esto con el fin de tener una plataforma tecnológica didáctica propia de la institución.

1.1. ANTECEDENTES

Actualmente, el ITSSAT cuenta con ocho programas educativos: Ingeniería Industrial, Ingeniería Electromecánica, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ingeniería Ambiental, Ingeniería en Gestión Empresarial, Ingeniería en Informática, Ingeniería Mecatrónica y Licenciatura en Administración.

Cabe mencionar que, para los dos primeros programas de ingeniería, en el 2003 el Gobierno del Estado realizó una inversión de \$100 millones de pesos en laboratorios y equipos, tales como: Laboratorio de Manufactura Integrada por Computadora (CIM), Laboratorio de Manufactura Avanzada (LMA), Laboratorio de Automatización y Control, Laboratorio de Neumática e Hidráulica, Laboratorio de Fluidos, Laboratorio de Eléctrica, Laboratorio de Electrónica y Laboratorio de Térmica (LT).

Estos laboratorios fueron equipados en su momento con tecnología de punta. Por ejemplo, el CIM contiene una máquina de control numérico por computadora (CNC), dos robots, una banda transportadora, una zona de inspección y un almacén; el LMA contiene dos tornos automatizados, dos máquinas fresadoras CNC, un robot cartesiano y un robot pintor; mientras que el LT tiene dos motores didácticos de gasolina y diésel para realizar los procesos térmicos y un horno para realizar tratamientos térmicos.

Los equipos más sofisticados en su momento no se pusieron en operación por la falta de personal capacitado, y la empresa que realizó la entrega no efectuó la capacitación al personal, imposibilitando poder destinar material humano para la operatividad de los equipos.

Actualmente, se están tratando de poner en marcha los laboratorios de CIM, LMA y LT, pero debido a que tienen más de 20 años parados los equipos ante la falta de

mantenimiento y de personal capacitado para ponerlos en marcha, se encontraron equipos con daños en tarjetas electrónicas de comunicación y control, así como motores pegados por su falta de mantenimiento y funcionamiento. Por tal motivo, se trataron de conseguir las tarjetas especializadas de cada equipo directamente con la empresa que los manufacturó, encontrando que dichas máquinas se encuentran descontinuadas.

Un concepto fundamental en los procesos de aprendizaje es la formación en el área de control y automatización en las carreras de Ingeniería Electromecánica, Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecatrónica que imparte el ITSSAT; por ende, debido a la falta de equipamiento para desarrollar las prácticas técnicas en las materias de la retícula de dichos programas, los alumnos tienen una formación deficiente en esta área. Por tal motivo, se analizó cuál sería la mejor estrategia para mejorar la enseñanza y la capacitación en equipos especializados a nivel industrial, llegando a la conclusión de que el aspecto fundamental de la formación de los alumnos es sobre el manejo del PLC.

Ante este panorama, ya que comprar equipo industrial sería muy costoso para la institución, se busca evitar la mala formación de los alumnos en el área de control y automatización. De esta manera, con la implementación de un control industrial aplicado a un escenario virtual, propuesta central de esta tesis, se logrará el entrenamiento del alumno por medio de la programación en escalera, aprovechando las bondades de la tecnología (Hernández-de-Menéndez, Vallejo Guevara, Tudón Martínez, et al., 2019). La realización de esta propuesta, además, posicionará al instituto a la vanguardia en el rubro tecnológico, ya que actualmente en las instituciones de México no se encuentran desarrollando tecnología de laboratorios virtuales que interactúen con señales reales (Salmerón-Manzano & Manzano-Agugliaro, 2018; Hernández-de-Menéndez, Vallejo Guevara, & Morales-Menendez, 2019).

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema a resolver en esta investigación es la falta de equipamiento, que se resolverá con la creación de un laboratorio virtual con escenarios a nivel industrial capaz de ser controlado con un control industria PLC en tiempo real, con esto se desarrollará rápidamente la programación de las variables de un entorno virtual bajo un proceso de manufactura industrial. Este tipo de laboratorio virtual viene a apoyar la falta de equipo industrial en las instituciones educativas de nivel superior (Nieto-Jalil et al., 2020). Lo cual permitirá fortalecer el proceso de instrucción y la asimilación de conceptos prácticos vinculados con la operación y control de sistemas industriales reales. La base de esta capacitación inicia en los laboratorios de instituciones educativas y centros de capacitación de personal en temas relacionados a la automatización, donde se aplican los conocimientos teóricos obtenidos en el salón de clases. Desafortunadamente, los laboratorios de este tipo se ven restringidos en infraestructura, teniendo como limitante el uso de solamente algunos actuadores, sensores y, en el mejor de los casos, conjuntos de pruebas en donde se involucran ciertos mecanismos para realizar las prácticas.

Otra fuente de entrenamiento son las mismas empresas, las cuales tienen programas de capacitación interna impartida por los expertos en el área. En esta capacitación, desgraciadamente se limita la interacción con la planta debido a que, en la mayoría de los procesos, cualquier error de programación en los controladores representa mermas financieras y, en el peor de los casos, problemas que comprometen la seguridad del personal involucrado (Albalawi et al., 2018; Ménard & Trant, 2020). Por consiguiente, la incorporación de nuevas tecnologías y desarrollos tecnológicos en el área de automatización y control exigen una constante actualización del personal involucrado en esta rama.

Por su parte, los planes y programas de estudio del Tecnológico Nacional de México están orientados a la formación y el aprendizaje (Checa & Bustillo, 2020) del área ingenieril, los cuales se sustentan en un diseño curricular flexible que permite la adaptación continua y sistemática a la incorporación permanente del avance

científico y tecnológico, además de promover la formación de profesionistas que muestren creatividad y aptitudes de emprendimiento y competitividad (Gamino-Carranza & Acosta-González, 2016).

Por tal motivo los laboratorios de realidad virtual contribuyen a una formación integral en la formación de los estudiantes, dándoles una rutina continua en el manejo de los aparatos tecnológicos. En el caso de este estudio, se pretende analizar el papel de las tecnologías emergentes siguiendo el objetivo de desarrollo de la metodología de los "Serious Games", así como la industria 4.0 en la transformación de la educación superior (Almeida & Simoes, 2019).

1.3. JUSTIFICACIÓN

La falta de equipo industrial en las instituciones educativas de nivel superior provoca un nivel bajo de aprendizaje en los alumnos o personal a capacitarse (Hernández-de-Menéndez et al., 2019; Phan & Ngo, 2020; Nieto-Jalil et al., 2020). A diferencia de la propuesta planteada en este trabajo con aproximaciones similares documentales es, la implementación del sistema de control industrial PLC mediante un modelo matemático, desarrollado de un sistema dinámico en escenarios de realidad virtual, ayudará a resolver la falta de equipamiento y a fortalecer el proceso de formación del alumno y del personal a capacitarse, principalmente en conceptos prácticos vinculados con la operación y control de sistemas industriales reales.

Los beneficiados directos de esta investigación son los alumnos del ITSSAT al ser éste un centro educativo encargado de impartir cursos de automatización y control industrial en los programas de estudio de Ingeniería Industrial, Ingeniería Electromecánica, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ingeniería Informática e Ingeniería Mecatrónica. Las personas en capacitación continua también se verán beneficiadas, al igual que los sectores de la industria que requieran personal con alto grado de capacitación en los campos antes mencionados. Además, se reducirá en gran proporción el costo en la compra de maquina industrial, así como

los tiempos para el desarrollo del sistema industrial (Coburn et al., 2017; Stenmark et al., 2017), emulando la reproducción de la máquina virtual en equipos de cómputo para que un 60 % de la matrícula de alumnos del ITSSAT se capaciten.

Por lo anteriormente mencionado, la propuesta de solución de este trabajo de investigación es que el sistema de control se logre dividir en dos pasos. Primero, obtener el modelo matemático del proceso o la planta para que su comportamiento pueda ser analizado. Luego, se debe implementar el modelo matemático en el escenario virtual industrial de los motores ciberfísicos, quienes se interconectan físicamente con el diseño de una interfaz física electrónica para que pueda operar con un controlador industrial apropiado, que lo lleve a alcanzar la respuesta deseada del sistema controlado. En el dominio de tiempo continuo, el sistema está representado por ecuaciones diferenciales, y para la planta del laboratorio de realidad virtual, que fue diseñada en un sistema de cómputo, se requiere reemplazar el sistema continuo en forma de tiempo discreto, lo cual, en el presente estudio, se realizó por el método de Tustin o método de la bilineal.

1.4. OBJETIVOS

Para llevar a cabo este trabajo de investigación, se plantearon los siguientes objetivos: un objetivo general y cuatro objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo general

Determinar si el diseño de un modelo de sistema dinámico para escenarios de realidad virtual es operable con la implementación de un control industrial de señales reales de PLC.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar el modelo dinámico en tiempo discreto del sistema industrial a implementar.
- b. Implementar el modelo dinámico en un ambiente de realidad virtual.

- c. Desarrollar la programación del controlador lógico en lenguaje de escalera (Ladder) del PLC para manipular las características del ambiente virtual.
- d. Validar los modelos implementados en ambiente virtual, aplicando su sistema de control industrial con señales reales del PLC.

1.5. HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo de un modelo de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual, es posible la implementación de un control industrial de señales reales con PLC.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una revisión teórica sobre el uso de plataformas virtuales en aplicaciones de desarrollo con modelado en robótica industrial y adiestramiento en el área de control y automatización, fundamentándose en la teoría de control clásico y teoría de los sistemas digitales, el PLC y el uso de plataformas industriales.

2.1. USO DE PLATAFORMAS PARA LABORATORIOS VIRTUALES EN APLICACIONES DE DESARROLLO CON MODELADO EN ROBÓTICA INDUSTRIAL

El parque de robots industriales ha crecido considerablemente en los últimos cinco años y las tasas de crecimiento son ahora más elevadas que en Japón, que tradicionalmente era el mayor mercado mundial de robots industriales (De Backer & DeStefano, 2021). De ahí la importancia de analizar los trabajos relacionados con el uso de plataformas para laboratorios virtuales aplicados a la robótica industrial, las cuales presentan conceptos del diseño de plataformas que admiten el desarrollo de aplicaciones en control y automatización.

El desarrollo de los sistemas de control y automatización se enfrentan a varios desafíos técnicos y teóricos, encaminados a permitir su aplicación eficiente en la automatización industrial con los requisitos estrictos respecto a la robustez contra defectos y fallas. Asimismo, en los sistemas de fabricación donde se hace uso de la automatización y control de los robots industriales, las interrupciones resultantes de dispositivos defectuosos no son bienvenidas.

En contraste, la atención se centra en las llamadas técnicas de control avanzado, donde el uso de robots industriales es elemental porque pueden surgir situaciones peligrosas de dispositivos defectuosos dentro de un sistema de automatización de procesos. Sin embargo, los sensores también son propensos a fallas debido a su duro entorno de trabajo, por lo que la identificación temprana de fallas en los sensores es fundamental en los sistemas de automatización para tomar acciones

correctivas para mitigar el impacto (Benninghoff et al., 2017; Li et al., 2020). Existen diferentes estrategias para que un sistema de control reaccione adecuadamente ante fallas del sensor, como apagar el sistema por mantenimiento o forzar el dispositivo controlado a un estado estable.

La presencia de los sistemas robóticos es cada vez más frecuente en la industria manufacturera alrededor del mundo, de ahí la importancia que las instituciones educativas y centros de capacitación, realicen e implementen estrategias más eficientes para el desarrollo de habilidades prácticas en sus estudiantes, relacionadas concretamente con el diseño, implementación y operación de sistemas robóticos (Syed A. Ajwad et al., 2017; Hentout et al., 2019).

Son muy conocidos los inconvenientes a los que se afrontan los planteles de nivel superior y centros de capacitación para dotarse y mantener un laboratorio completo de robótica industrial, debido a los elevados precios de inversión y operación de los equipos robóticos, los cuales requieren mantenimiento permanente, además de que los estudiantes que se capacitan directamente en estos laboratorios pueden dañar involuntariamente algunos componentes del sistema, entre otros.

Por otro lado, el hecho de tener un sistema robótico en el laboratorio no garantiza el adecuado aprendizaje en los estudiantes. Muchas veces estos sistemas son cerrados, lo que impide que se tenga una experiencia más enriquecedora que la de simplemente manipular el robot a través de una interfaz gráfica (Ionescu, 2020; Ionescu et al., 2020) o con un módulo de botones como el teach pendant (Botonera de enseñanza). Es precisamente en este escenario donde se empiezan a valorar las bondades que las herramientas de simulación, particularmente las plataformas virtuales, ofrecen para sobrellevar este tipo de inconvenientes.

El modelado es una fase vital en el procedimiento del diseño de robots industriales. Un modelo que incorpore la mayoría de las características físicas de un robot y del ambiente que lo rodea permitirá verificar su funcionalidad real, por ejemplo,

analizando su movilidad, estudiando sus configuraciones singulares, determinando su espacio de trabajo, visualizando detalles importantes para el ensamblaje e identificando posibles interferencias mecánicas o problemas de control. Muchos investigadores dedicados a proponer robots manipuladores utilizan SolidWorks® para simplificar el mallado más uniforme de los eslabones, y luego transmitirse al programa ABAQUS para el análisis cinemático estático; finalmente, emplea ADAMS® para simular la situación de tensión estática (Yao et al., 2019). Estos tipos de programas permiten modelar cualquier robot manipulador, incluyendo un sinnúmero de propiedades físicas, por ejemplo, propiedades de los materiales, límites articulares, coeficientes de fricción, fuerza, momentos, modelos de colisión, entre otras.

Sin embargo, la limitante de estas plataformas es que están orientadas al modelado de aspectos mecánicos, lo que constituye un problema cuando se quiere estudiar el comportamiento de un manipulador bajo una acción de control. Para incorporar aspectos de control al modelado de un robot manipulador es necesario auxiliarse de programas más especializados. Matlab®, a través de su módulo Simscape Multibody y TM, genera automáticamente el modelo matemático del sistema definido y se simula la dinámica del sistema (Mahmood & Ismail, 2020).

A continuación se muestra un conjunto de referencias para ejemplificar el estudio de esta plataforma; como la robótica de rehabilitación (Romero et al., 2017) con el diseño e implementación de un mecanismo modular para rehabilitación de rodilla con accionamiento suave, en otro caso (Cosenza et al., 2018) se usó para modelar un comportamiento dinámico de una mano mecánica para verificar su posible aplicación como mano protésica, en un tercero (Subhashini et al., 2017) y (Uk et al., 2020) se diseña e implanta un manipulador de robot SCARA Prismatic-Revolute-Revolute-type (PRR), en otro (S. Liu et al., 2017; Sayed et al., 2020) se modela el manipulador paralelo 3-RRR, en otro más (Somasundar & Yedukondalu, 2018) un manipulador KUKA KR5, y en el último caso (Syed Ali Ajwad et al., 2017) se modela un manipulador serial de 6 GDL.

Por otro lado, LabVIEW, a través de su plataforma *Robot Simulation Model Builder*, incluye ciertos aspectos de control al modelado de manipuladores industriales (Xiaowei & Chuanwei, 2017). El inconveniente con este tipo de programas es que, al momento de usar el modelo a través de una simulación, dicha simulación no es interactiva, pues generalmente se ejecuta considerando condiciones de operación y períodos de tiempo previamente definidos, lo cual impide al usuario manipular las variables del modelo durante el proceso de simulación.

Actualmente, existe una gran disponibilidad de programas para modelar de forma simple y simular interactivamente robots manipuladores, por ejemplo: RoboDK, Workspace, RobotStudio, WorkcellSimulator, Roboguide, 3DSimulate, RoboLogix, entre otros. Para fines prácticos del proceso de investigación y diseño de robots, este tipo de programas presenta dos problemas importantes. Primero, están diseñados para modelar ciertos robots comerciales, es decir, no permiten la creación o importación de modelos 3D para que el usuario pueda modelar sus propios diseños. Segundo, este tipo de programa permite el modelado para desarrollar básicamente animaciones 3D, en las que no siempre hay un motor de física involucrado para resolver la dinámica de cuerpos rígidos, y donde ninguno de los elementos del robot puede ser modelado como un sistema dinámico, lo que limita el nivel de detalle del modelo e impide el modelado de una fase de instrumentación y control.

A manera de una alternativa a estas limitantes, existen plataformas más especializadas como Gazebo (Riansyah et al., 2017; Gavrilova et al., 2020) y USARsim (Zhibao et al., 2017), cuyas versiones más recientes, junto con V-Rep (Xie et al., 2018; Safeea & Neto, 2018) y otros, permiten modelar prácticamente cualquier robot manipulador, incorporan motores de física de alto desempeño, modelos básicos para actuadores y sensores, y la posibilidad de integrar código de programación para implementar y validar algoritmos de control (Sadiku et al., 2017).

Actualmente, las principales ventajas en la educación son el desarrollo de aplicaciones virtuales, motores de física, procesadores de cómputo y procesadores gráficos, que han contribuido con el surgimiento de aplicaciones virtuales cuyo propósito, a diferencia de aplicaciones convencionales, va más allá del entretenimiento. Aprovechando estas ventajas, se facilita la elaboración de escenarios de simulación 3D sobre aplicaciones en la industria manufacturera y en celdas robóticas, aplicaciones empleadas en el campo de la ingeniería, donde se usa modelado de equipo/máquinas electromecánicos automatizados para una mejor formación (Hernandez-de-Menendez & Morales-Menendez, 2019; González-Mendivil et al., 2020). En estos escenarios virtuales, se pueden analizar problemas de difícil solución en el comportamiento de un sistema a nivel industrial; por consiguiente, las plataformas virtuales brindan flexibilidad, reconfigurabilidad, tolerancia a fallas, alto nivel de aprendizaje y un tiempo mínimo de latencia (O'Donovan et al., 2019).

Esta nueva tendencia, conocida en inglés como "Serious Games" (Aguilar-Lazcano et al., 2019), según Zyda (2005), son vistos como un ejercicio mental realizado en un ordenador, que sigue normas específicas basadas en el entrenamiento y que están incorporadas en la formación empresarial (Lameras et al., 2017). Lo anterior se puede evidenciar en diferentes contextos, por ejemplo, en la industria (Yohanandhan et al., 2020; Ferguson et al., 2020), la salud (Graafland & Schijven, 2018; Cen et al., 2020), la educación (Shen et al., 2017; Liou & Chang, 2018; Román-Ibáñez et al., 2018; Rodríguez Ibáñez, 2018), la milicia (X. Liu et al., 2018; Gace et al., 2019), la seguridad pública (Feng et al., 2020; Y. Guo et al., 2020), entre otros rubros.

Muchos de los conceptos son implementados para el desarrollo de aplicaciones virtuales que simulan escenarios de robótica industrial con fines educativos (Román-Ibáñez et al., 2018), incluso ya se encuentran disponibles nuevos aspectos de la vida asistida en la interacción inteligente entre humanos y robots (HRI) (Zlatintsi et al., 2018).

A pesar de lo anterior, los alcances de estas aplicaciones con fines realmente prácticos para el proceso de entrenamiento son algo limitados, pues se enfocan en algunos conceptos de la robótica, por ejemplo, la movilidad y la cinemática del mecanismo y la descripción de rutas a seguir dentro del espacio de trabajo del robot, olvidando uno de los aspectos fundamentales: la instrumentación y el control.

Existen algunas plataformas educativas que sí consideran estos conceptos (Orduña, Rodríguez-Gil, et al., 2018; Grodotzki et al., 2018), pero se concentran exclusivamente en la etapa de virtualización de algoritmos de control para sistemas robóticos reales, por lo que se puede decir que no son laboratorios completamente virtuales. En las aplicaciones convencionales, los robots son animados considerando aspectos físicos como la gravedad, la interacción entre cuerpos, la velocidad de los movimientos, entre otros, con lo cual se logra una simulación de alta calidad visual.

Pese a lo anterior, y debido a que ninguno de los elementos del sistema robótico es modelado como un sistema dinámico, la aplicación de una etapa virtual de control resulta técnicamente imposible. Esto no únicamente representa una limitante didáctica para el aprendizaje práctico de la robótica, también es un problema para la simulación misma, ya que el comportamiento obtenido en el robot al moverse no emula de forma fiel el comportamiento de un robot real.

Asimismo, la plataforma debe incluir la posibilidad de desarrollar código de programación que permita agregar al entorno virtual la representación matemática del sistema dinámico de primer orden en los componentes involucrados como la planta y su etapa de control. Para la aplicación de la robótica en los entornos virtuales, son objeto de estudio principalmente los sistemas dinámicos; en estos casos, es importante modelar los servomotores de los robots, los cuales son básicamente sistemas electromecánicos que incluyen un motor de corriente directa, un sensor de posición (encoder) y una etapa de control PID.

La idea central es que estos laboratorios incluyan las características físicas elementales de los componentes que integran a los robots y al ambiente que los rodea, así como el modelado de elementos que permitan aumentar la experiencia de operación real de un robot industrial, tales como sensores, actuadores y algoritmos de control.

Lo anterior no significa que se limita al modelado de actuadores, sensores y algoritmos de control, por el contrario, la plataforma es tan abierta que se puede incluir dentro del laboratorio cualquier otro tipo de sistema que se pueda controlar y que pueda interactuar con un sistema robótico; según Isermann (1999), también se pueden incluir sistemas térmicos, hidráulicos, entre otros, los cuales son sistemas cuyo modelado y control de su sistema dinámico ya han sido muy estudiados. Esta etapa de modelado concluye hasta que se obtiene el comportamiento físico esperado en todos los sistemas embebidos en el escenario (Ortega Moody et al., 2016).

Según (Pierrot et al., 1990), desde finales de los años 90 se introdujo el concepto de "hardware in the loop" (como el aplicado por (Cioccolanti et al., 2020)) como una técnica de simulación en tiempo real que se basa en el modelado matemático de sistemas complejos; sin embargo, debido a las limitantes tecnológicas de aquella época, este concepto no estaba disponible para todos los niveles de la comunidad académica.

Hasta hoy los modelos virtuales desarrollados representan las características propias de los mecanismos de un robot real, como son los casos de ESHED Scorbot-ER VII, SCARA ER14, SCARA de 4 grados de libertad, FANUC, robot cartesiano, robot industrial de 6 ejes, robot industrial de doble brazo, robot cíclico, robot delta, entre otros. Estos robots se han logrado diseñar en laboratorios virtuales sin ningún tipo de sensores y actuadores para controlar su movimiento. Un ejemplo de la configuración geométrica del robot delta (Sánchez-Alonso et al., 2016), que trabaja con movimientos de mecanismos paralelos, fue desarrollado en un

laboratorio de realidad virtual (Cañas Plaza et al., 2018), contemplando los sistemas dinámicos de todos los servomotores embebidos en escena.

Tomando en cuenta lo anterior, los escenarios de realidad virtual mejoran las aplicaciones hacia la plataforma del modelado de operadores o manipuladores industriales. La idea general es incluir en el modelado no únicamente las características físicas elementales de los componentes que integran a los robots y al ambiente que los rodea, sino también incluir el modelado dinámico de sensores, actuadores y algoritmos de control, lo cual fortalece el realismo de las simulaciones derivadas de estas aplicaciones y, por lo tanto, abre una serie de oportunidades al momento de evaluar el comportamiento de un manipulador industrial durante su etapa de diseño.

Por tal motivo, estos trabajos han significado un esfuerzo para generar alternativas más eficientes y simples de implementar el modelado de manipuladores industriales desde cero. Los escenarios para el mejoramiento de aplicaciones virtuales proveen muchas bondades ofrecidas por Gazebo, USARsim, V-Rep y los demás paquetes ya mencionados. Asimismo, brindan otras ventajas para la navegación, interactividad, visualización 3D, multiplataforma y conectividad con otros dispositivos, lo que constituye aspectos muy importantes a la hora de realizar las simulaciones derivadas del modelado.

Las aplicaciones resultantes de esta técnica de modelado pueden ser muchas, las cuales pueden ser desde el desarrollo de pruebas preoperativas de robots o de celdas completas de manufactura, hasta la implementación de laboratorios virtuales para la capacitación en materia de robótica y automatización, temática que está despertando mucho interés en la actualidad (Peña et al., 2020). Sea cual sea la aplicación particular seleccionada, la simulación basada en la técnica del modelado permitirá llevar la experiencia del usuario a un nivel de realismo superior al provisto por plataformas convencionales.

En este apartado se analizaron plataformas virtuales aplicadas a la robótica industrial, analizando los modelados dinámicos aplicados en dichas plataformas a partir de información confiable, sustentando así el desarrollo del modelo dinámico y el uso de plataformas para esta investigación.

2.1.1. Adiestramiento en el área de automatización y control en escenarios virtuales industriales

La aplicación de los laboratorios virtuales a escenarios industriales en el área de automatización y control se da gracias a las nuevas tecnologías emergentes, como lo son la realidad virtual y los desarrollos tecnológicos. Para estos laboratorios, se logran escenarios industriales como, por ejemplo, una celda de manufactura, la cual puede estar integrada por robots, bandas transportadoras, máquinas de manufacturas, entre otros, y son diseñados de tal forma que resultan idénticos a la realidad para que el personal esté en constante entrenamiento en el área correspondiente. La mayoría de este tipo de entrenamiento inicia en los laboratorios de instituciones educativas y centros de entrenamiento, pues es en estos laboratorios en los que el conocimiento teórico adquirido en las aulas es aplicado.

Ya sea que el entrenamiento se realice en un ambiente educativo o industrial, el objetivo del aprendiz es adquirir o actualizar sus conocimientos en una o varias de las siguientes áreas: PLC, diagrama escalera, programación en ambientes comerciales (AB: RsLogix, Siemens: Stp7, entre otros), comunicación (OPC, Modbus, DLLs), protocolos comerciales (DeviceNet, ControlNet, Profibus, entre otros), SCADAS comerciales (RSview32, Simatic, entre otros) y desarrollo de SCADAS usando lenguajes de alto nivel (C#, VB.NET) en áreas de aplicación, como se muestra en las figuras 1 y 2.

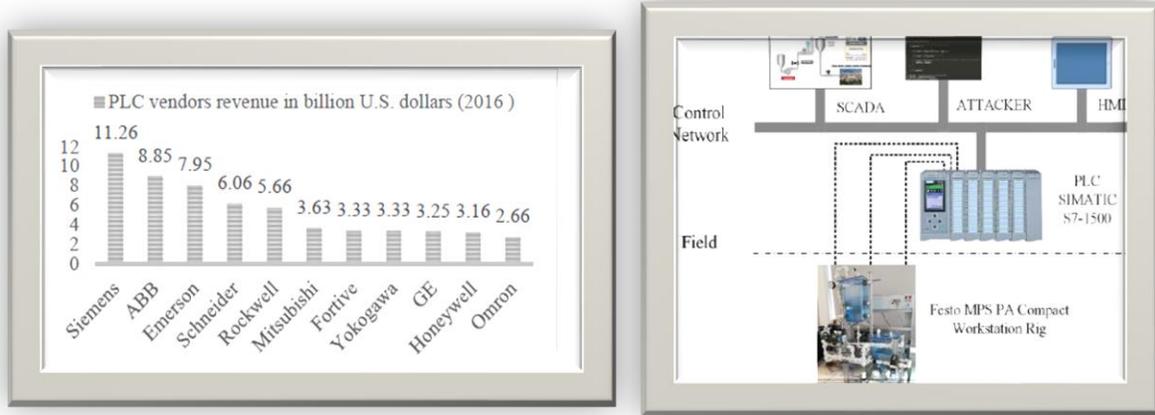


Figura 1. Gráfica de PLC vendidos en 2016 y arquitectura de banco de prueba (Robles-Durazno et al., 2019)

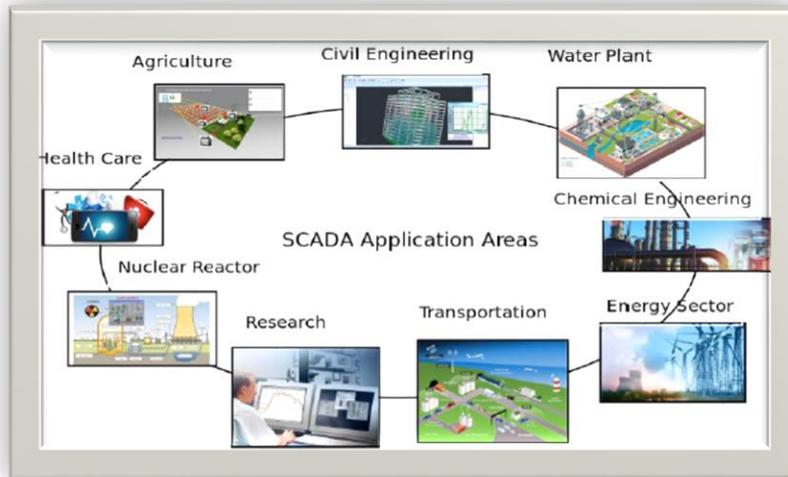


Figura 2. SCADA Áreas de Aplicación (Rai & Kumar, 2021)

En la educación superior, es cada vez más difícil que se obtenga una infraestructura, equipamiento y los recursos humanos necesarios para soportar de forma eficaz la formación de nuevos ingenieros y científicos, especialmente en las áreas industrial y robótica, que poseen una componente tecnológica fuerte debido a los elevados costos de inversión, operación y mantenimiento (Román-Ibáñez et al., 2018). La razón de esta diferencia radica en el hecho de que estos campos a menudo requieren ejercicios de laboratorio para proporcionar una

adquisición efectiva de habilidades y experiencia práctica (Nolen & Koretsky, 2018; Salmerón-Manzano & Manzano-Agugliaro, 2018).

Actualmente, las instituciones de formación docente no están preparadas en términos de programas e iniciativas de investigación para la Educación 4.0 (Alda et al., 2020). Los programas educativos que incluyen en su formación práctica de laboratorios imponen exigencias únicas a la educación, que actualmente son una prioridad en las universidades e institutos tecnológicos. Por consiguiente, los laboratorios de realidad virtual contribuyen a una formación integral de los estudiantes, dándoles una experiencia directa en el manejo de los aparatos. Esta tecnología representa una oportunidad para la educación especializada, pues la puesta en servicio virtual podría usarse para equipar laboratorios de control y automatización, donde los estudiantes y aprendices en automatización puedan probar, validar y depurar sus estrategias de control y automatización (Macías García et al., 2020).

Universidades alrededor del mundo han diseñado sus propios laboratorios virtuales, tales como iLab (Pahl, 2017) en la Universidad Técnica de Múnich (TUM), el cual soporta una gran variedad de laboratorios en línea, pero requiere de conexión a internet. WebLabs (Botero et al., 2016), en la Universidad de Cambridge, WebLab-Deusto (Orduña, Garcia-Zubia, et al., 2018) en la Universidad de Deusto, y NCSLab (Lei et al., 2018) permiten al usuario interactuar con dispositivos virtuales para crear un esquema de control que posteriormente puede ser probado en varios dispositivos y ofrecer múltiples servicios a usuarios alrededor del mundo. Sin embargo, los dispositivos físicos no pueden ser usados por todos los usuarios al mismo tiempo, quienes no pueden entrenar usando sus propios dispositivos.

Tomando en cuenta la necesidad de entrenamiento de calidad para las áreas de automatización y control, así como un crecimiento exponencial en las herramientas de simulación 3D en tiempo real, surge el interés de desarrollar ambientes de entrenamiento virtual en estas disciplinas de la ingeniería.

En este apartado se muestra la investigación en el proceso de laboratorios virtuales, con escenarios industriales para su aplicación en la enseñanza de tópicos relacionados con automatización y control. Con este desarrollo, las instituciones educativas serán capaces de transferir conocimiento práctico sin la necesidad de adquirir equipamiento como máquinas CNC, celdas robóticas, entre otros, además de tener un ambiente de seguridad institucional (Salazar-Escoboza et al., 2020).

Por su parte, los alumnos serán capaces de automatizar líneas reales y procesos de producción que actualmente existen en la industria (Salunkhe et al., 2018), con escenarios cuyas secuencias variarán de complejidad de acuerdo al nivel de conocimiento del usuario. A través de la comunicación Modbus/TCP, estos escenarios industriales pueden ser usados junto con PLC físicos y, al mismo tiempo, interactuar con hardware real conectado a estos. De esta forma, el usuario puede tomar ventaja de los dispositivos disponibles en el lugar donde sea entrenado. Y otra ventaja de esta herramienta es que provee al usuario la oportunidad de operar un proceso y, simultáneamente, elimina los riesgos económicos y de seguridad que normalmente existen cuando los parámetros de control son alterados.

Cabe aclarar que existen laboratorios virtuales que son capaces de interactuar con cualquier marca de PLC que tenga la capacidad de comunicarse por el protocolo de comunicación de Modbus/TCP, lo que ofrece flexibilidad en la enseñanza de control industrial y automatización. El objetivo de estos laboratorios es crear un ambiente virtual basado en la simulación de procesos (Zhang et al., 2017), donde los aspectos físicos y el comportamiento dinámico de modelos reales sean representados (Penas et al., 2017; Adamson et al., 2017). Lo anterior incluye objetos, actuadores, sensores y factores ambientales.

Tales desarrollos permiten a las instituciones educativas y centros de entrenamiento ajustar su instrucción práctica con los tipos de controladores que existen en el mercado, y de esta manera proveer preparación vocacional más apropiada para los estudiantes. Los PLC pueden también usar sus I/Os para conectarse con hardware externo (botones, joysticks, paneles de control, entre otros) para

manipular mecanismos y procesos, lo que hace el proceso de aprendizaje más semejante a la realidad. La simulación del comportamiento físico de los objetos es llevada a cabo por medio de un motor de ciberfísica en 10 categorías: algoritmos, arquitectura, comunicación, evaluación, hardware, integración, modelado, sincronización, diseño de sistemas y red de sensores inalámbricos según (H. Chen, 2017).

De acuerdo con este apartado, donde se han analizado sistemas industriales totalmente virtuales, y donde se percibe necesario el adiestramiento en los sistemas de control a nivel industrial para las diferentes áreas de aplicación, resulta innegable la importancia de la implementación de un control industrial en un escenario virtual de tipo industrial.

2.2. TEORÍAS APLICADAS AL DESARROLLO DE PLANTAS INDUSTRIALES

Las teorías de control se utilizan para regular cualquier proceso de una planta industrial. En el siguiente apartado se analiza la teoría de control clásica para la aplicación del proyecto en el desarrollo de escenarios virtuales, así como la teoría de los sistemas digitales por las características del laboratorio para entrenamiento de programación de PLC.

2.2.1. Teoría de control clásica

La teoría de control clásica data desde el siglo XVIII, con el primer trabajo relevante en control automático de James Watt, quien diseñó el regulador de velocidad centrífugo para controlar la velocidad de la máquina de vapor, dando paso a la revolución industrial. En la etapa inicial de desarrollo de esta teoría, Minorsky en 1922 trabajó en controladores automáticos para guiar embarcaciones, mostrando que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de un sistema utilizando lazo cerrado. Y en 1934, Hazen introdujo el término servomecanismo para los sistemas de control de

posición, utilizando los servomecanismos con relé capaces de seguir con precisión una entrada cambiante (Ogata, 2013).

Los trabajos pioneros de Bode, Nichols, Evans y otros aparecieron en ese momento, lo que dio lugar a medios gráficos simples para analizar problemas de control retroalimentados de salida y entrada únicas. Los procesos de la repuesta en frecuencia de los diagramas de Bode corroboraron que fueran operables por los ingenieros, específicamente para el diseño de los sistemas de control lineal de lazo cerrado que efectuaran los requerimientos de los procedimientos.

En conclusión, el núcleo de la teoría de control clásica utiliza las metodologías de respuesta en frecuencia y del lugar de las raíces, llevándonos a sistemas estables que satisfacen el comportamiento en los sistemas con una entrada y una salida. Por lo tanto, la ingeniería de control dio pasos importantes hacia momentos cruciales de la historia como, por ejemplo, la revolución industrial, la segunda guerra mundial, el impulso al espacio, la globalización económica, el pensamiento de valor de los accionistas, entre otros. Y en 1960, de acuerdo con la disposición de los ordenadores digitales fue viable el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos.

En el caso del presente proyecto, se realizó el análisis de la función de transferencia de acuerdo con la teoría de control clásica. Dicha función se obtiene de los diferentes procesos que existen a nivel industrial, apoyándose de los sistemas térmicos para el uso de la función de transferencia por el balance de energía debido a los cambios de temperatura en un tanque. Lo anterior se realiza para poder controlar la dinámica o comportamiento de la temperatura, lo cual, a su vez, se puede observar gracias a los sensores modelados en el escenario virtual industria de la planta automatizada. En términos temporales, existen dos posibles formas de operación, la dinámica y la estacionaria, y eso se analiza gráficamente de acuerdo con la variable de temperatura respecto al tiempo. En las ecuaciones diferenciales que representan los procesos industriales, estas son representadas

preferentemente por ecuaciones matemáticas diferenciales que dependen del tiempo; de ahí el nombre de comportamiento dinámico.

Así, para diseñar la planta del sistema como es conocido en la teoría de control, se requiere que las ecuaciones diferenciales lineales se conviertan en ecuaciones algebraicas por el método de transformada de Laplace. Al realizar la operación, se obtiene la función de transferencia de la planta que ya no va a depender del tiempo, a partir de ese momento dependerá de una variable compleja denominada "S", y como es una ecuación algebraica que se va a representar siempre en forma lineal, facilita el control en la planta o proceso.

2.2.2. Teoría de los sistemas digitales

Los controladores modernos se realizan mediante circuitos digitales basados en microprocesadores o computadoras de control de procesos, y su principal parámetro es el tiempo de muestreo. Debido al muestreo, estos sistemas se denominan sistemas de tiempo discreto. Además, dado que los procesadores tienen una longitud de palabra infinita, las señales se discretizan en amplitud y se codifican para reemplazar un sistema continuo en forma de tiempo discreto; se trata siempre de una aproximación del sistema continuo.

Los diferentes métodos de discretización dan diferente rendimiento del controlador digital o la representación de la planta en forma digital, lo cual se puede apreciar en el control por computadora, la identificación del sistema y el procesamiento de la señal. Esto es cada vez más visible a la luz del enorme éxito del procesamiento y las redes asistidas por computadora (van Ginneken, 2017; Al-antari & Kim, 2020). Hay muchos problemas intrigantes relacionados con el muestreo, y el retraso en el tiempo es una de las causas principales que intervienen en la estabilidad o el rendimiento general del sistema.

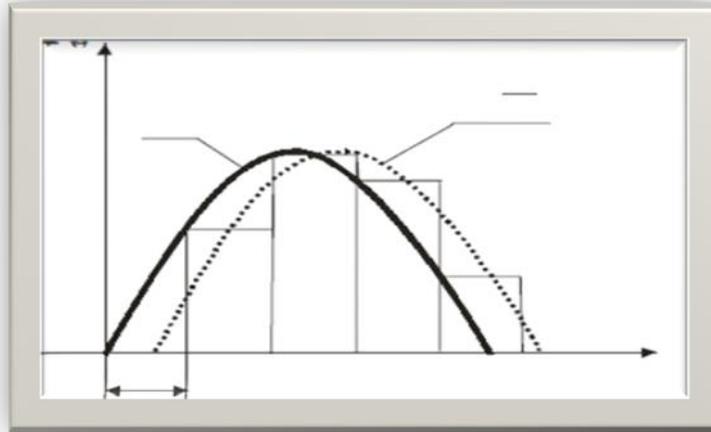


Figura 3. Aproximación de muestreo y retención por tiempo muerto
(Tihamér et al., 2003)

En particular, como los diferentes efectos del actuador, el sensor y el controlador existen en los sistemas de control, los retrasos a menudo se formulan como retardo de tiempo de estado, retardo de tiempo de entrada y retardo de tiempo de salida, en un marco de tiempo continuo o tiempo discreto (Townsend et al., 2017; Hannachi et al., 2018; Xu & Luo, 2018), tal como se representa en la figura 3, donde el retardo relacionado con la señal es el resultado del tiempo finito que toma calcular el siguiente estado de conmutación.

Para simular y diseñar digitalmente un sistema de control retardado de tiempo continuo, a menudo se requiere obtener un modelo equivalente de tiempo discreto. Para optimizar el comportamiento en un sistema de tiempo continuo con múltiples retardos de tiempo, se han propuesto varias teorías de control avanzadas y técnicas de diseño en la práctica (M. Liu et al., 2017; Song et al., 2018).

La totalidad de los procedimientos de control se formulan para un marco de tiempo continuo, para el cual muchas herramientas de análisis y metodologías de control están bien establecidas. Con los rápidos avances en tecnología digital y computadoras (X. Su et al., 2018), el control digital ofrece varias ventajas sobre su contraparte analógica para una mejor confiabilidad, menor costo, menor tamaño,

más flexibilidad y mejor rendimiento. Así, el sistema de tiempo continuo digitalmente controlado resultante se convierte en un sistema de datos muestreados.

Los sistemas que incluyen el retardo de tiempo, debido a la dinámica del sistema, están ampliamente presentes en la industria, lo que impone muchas restricciones que dificultan el control y la programación por computadora de dicho sistema (Ma & Lu, 2018; Yuan et al., 2019; Bataev & Aleksandrova, 2020). Luego, el control de un sistema con un retardo de tiempo es generalmente difícil debido a las restricciones impuestas por el tiempo de retardo. Y es que estas restricciones pueden causar un deterioro del rendimiento que lleva al proceso a la inestabilidad, especialmente cuando se opera en circuito cerrado (Y. Chen et al., 2019).

La mayoría de los sistemas físicos, en un punto de vista macroscópico, son continuos. Por su parte, en los sistemas de control, la información se procesa digitalmente, lo que requiere señales de muestreo; en este caso se habla de sistemas muestreados o discretos. Si es necesario, siempre es posible obtener las ecuaciones diferenciales en una función de transferencia (Higuera et al., 2018).

Es por esta razón que se precisa la discretización de los sistemas de retardo de tiempo continuo. Por lo tanto, el objetivo de este apartado es ampliar y analizar el Método de transformada z bilineal de Tustin, de acuerdo con (H'mida et al., 2015) que es el más utilizado para discretizar sistemas continuos de los siguientes cuatro métodos: Zero Order Hold (ZOH), Method Matched Pole-Zero, Method Backward Difference Method y Bilinear transformation. A continuación, se desarrolla el método.

El método de la bilineal de Tustin se aplica fundamentalmente en el control digital, método que se basa en la técnica de integración numérica conocida como la regla del trapecio. Si el intervalo de muestreo T se selecciona adecuadamente, esta técnica da una buena aproximación de tiempo discreto para un sistema lineal en tiempo continuo que se obtiene a través de la transformada bilineal, de manera

que $wT \leq 0.5$, siendo w la magnitud del polo de la función de transferencia del sistema de tiempo continuo lejos del origen del plano S .

Sin embargo, mientras que la transformada z bilineal conduce a una realización en forma de una matriz de función de transferencia, el método basado en la regla trapezoidal conduce directamente a una realización de espacio de estado, más adecuada para la simulación digital, aplicando una aproximación de segundo orden por transformada homográfica bilineal: discretización de Tustín. La aproximación lineal de la función de segundo orden exponencial se representa de la siguiente manera (1):

$$Z = \frac{1 + S\frac{T}{2}}{1 - S\frac{T}{2}}$$

Ecuación 1. Z en plano complejo S

De acuerdo con la ecuación 1, se despeja S para obtener la ecuación en términos de Z , y desarrollando la ecuación, se obtiene la ecuación 2:

$$S = \frac{2Z - 1}{T(Z + 1)} = \frac{2(1 - Z^{-1})}{T(1 + Z^{-1})}$$

Ecuación 2. Plano complejo S en transformada Z

Esta aproximación resulta de la integración numérica aproximada por la regla trapezoidal entre dos tiempos de muestreo. A continuación, se representa en la ecuación 3:

$$y(t) = \int x(t)dt \quad \text{o} \quad Y(S) = \frac{1}{T}X(S)$$

Ecuación 3. Integración numérica

Donde, desarrollando las operaciones correspondientes, se obtiene la ecuación 4, que se representa de la siguiente manera:

$$S = \frac{X(S)}{Y(S)}$$

Ecuación 4. Función de transferencia en S

Asimismo, al aproximarnos entre dos segundos de muestreo, se obtiene la ecuación 5:

$$y_k = y(kT) \approx y_{k-1} + \frac{X_{k-1} + X_k}{2} T$$

Ecuación 5. Función de muestreo

La función de transformada z es representada por la ecuación 6:

$$(1 - z^{-1})Y(z) = \frac{T}{2}(1 + z^{-1})X(z)$$

Ecuación 6. Función en su transformada Z

Donde, realizando los despejes necesarios, se obtiene la ecuación 7:

$$\frac{X(z)}{Y(z)} = \frac{2z - 1}{Tz + 1}$$

Ecuación 7. Función de transferencia en su transformada Z

Relacionando la ecuación 7, podemos obtener la ecuación 8, que representa el método de la bilineal:

$$S = \frac{2z - 1}{Tz + 1} = \frac{2\mathbf{1} - z^{-1}}{T\mathbf{1} + z^{-1}}$$

Ecuación 8. Función de transferencia en S

Se puede mostrar que la matriz de la función de transferencia de tiempo discreto, con la función de transferencia dada, se obtiene utilizando el método de transformada bilineal después de sustituir S, para obtener la ecuación dinámica del sistema de ecuaciones diferenciales en su modelo matemático de ecuación discreta, y así lograr la aplicación del diseño de la planta industrial en los escenarios de realidad virtual, el cual es el objetivo principal de esta tesis.

2.3. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Los PLC suelen ser una parte principal de los sistemas automáticos en la industria (Bührer et al., 2015). Son muy eficientes y fiables en aplicaciones de control secuencial y sincronización de procesos y elementos auxiliares en las industrias de fabricación, investigación energética, estudios de ingeniería, aplicaciones de control industrial y monitoreo de plantas (Namekar & Yadav, 2020).

Además de tener ventajas tecnológicas, el uso de PLC también reduce los precios en el sistema de control complejo y de nivel avanzado (Vergnano et al., 2017; İrsel & Altinbalik, 2018). Y es que los PLC están diseñados para usar un lenguaje de programación en forma de diagrama de escalera que ya es familiar para los técnicos y electricistas.

Las innovaciones y mejoras en la tecnología de microprocesadores (Kulisz et al., 2015) y las técnicas de programación de software han agregado más características y capacidades al PLC (Hinterreiter et al., 2018; Darvas et al., 2019). Estas mejoras permiten al PLC realizar aplicaciones de control (Tasca et al., 2020) de procesos y movimiento más complejas y con mayor velocidad (Müller et al., 2017). Actualmente, más de una docena de fabricantes producen PLC, estadística que se puede apreciar en la tabla 1 (Alphonsus & Abdullah, 2016). La mayoría de estas empresas fabrican varios modelos que varían en tamaño, costo y sofisticación para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas.

Tabla 1. Lista de fabricantes de PLC en el mercado global

No	Fabricantes	No	Fabricantes
1	Siemens	9	Panasonic
2	ABB	10	Idec
3	Schneider (Modicon)	11	Keyence
4	Rocwell (Allen-Bradley)	12	Toshiba
5	Mitsubishi	13	Fuji
6	GE-Fanuc	14	Beckhoff
7	Omrom	15	Bosch Rexroth
8	Koyo	16	Rockwell/Allen-Bradley

(Alphonsus & Abdullah, 2016)

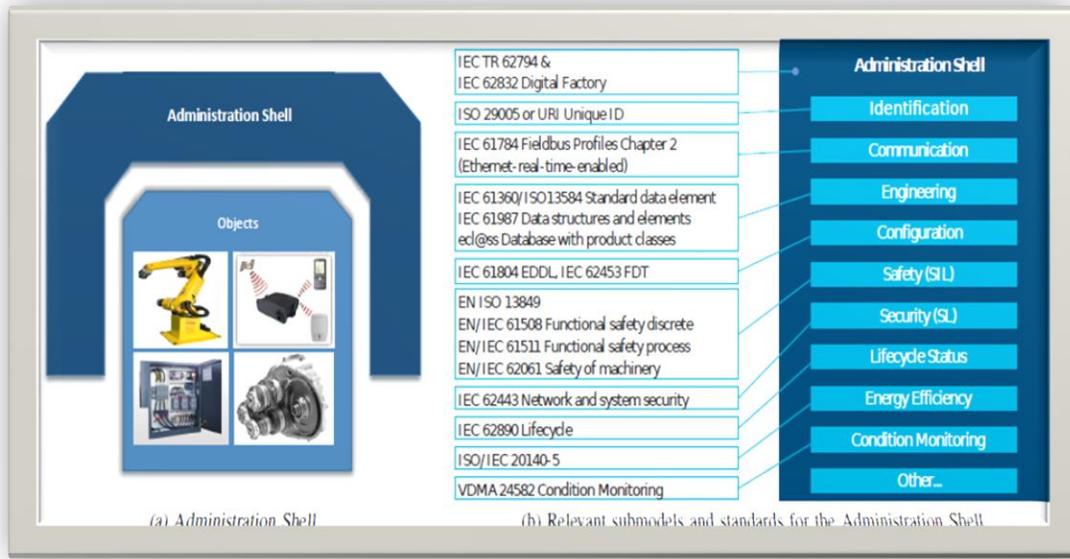


Figura 4. Estandarización en la programación del PLC: a) Administración Shell y b) Submodelos y estándares relevantes para el Shell de administración (Grángel-Gonzalez et al., 2017)

Esta área ha producido los correctos métodos de diseño y lenguajes de programación, y debido a su importancia para la aplicación industrial, muchos de estos métodos han sido estandarizados internacionalmente; la figura 4 muestra una descripción general de la estandarización. Actualmente, los estándares más influyentes son IEC 1131 (Comisión Internacional de Electrotécnica) (Contreras et al., 2018) ,que especifica las cuatro formas de programar el PLC y IEC 1499 (Peake & Blech, 2017).

La progresiva complejidad en los inconvenientes de control, la demanda de tiempo de desarrollo reducido y la posible reutilización del módulo de software existente hacen que sea necesario un enfoque formal en la programación de PLC; los trabajos de (Dániel Darvas et al., 2017) y (Xiong et al., 2020) principalmente apuntan en esta dirección. La demanda de soluciones de alta calidad, especialmente la aplicación de PLC en procesos críticos para la seguridad necesita procedimientos de verificación y validación, es decir, métodos formales para demostrar propiedades estáticas y dinámicas específicas de los programas, tales

como la interacción en tiempo real, no ambigüedad y el tiempo de respuesta. Los artículos de (Vieira et al., 2017) y (Gröhn et al., 2017) tratan precisamente este aspecto de la aplicación de métodos formales a la programación de PLC.

Para el proceso de diseños de control lógico en aplicaciones industriales, como, por ejemplo, el proceso de fabricación farmacéutica, que es continuo y en tiempo real, se requiere un diseño sistemático bajo una estrategia de control avanzada y eficiente para controlar los atributos de calidad críticos. De acuerdo a Nunes de Barros et al., 2017, los modelos dinámico son capaces de predecir respuestas de procesos lineales y no lineales, que consisten en la identificación del sistema con modelos de espacio de estado, diseño de control y métricas de análisis (Q. Su et al., 2017).

De igual forma, para la implementación de los controladores lógicos programables se requieren enfoques formales basados en el uso y la adaptación/extensión de la teoría de control de supervisión de los sistemas de eventos discretos (Zaytoon & Riera, 2017). Dado que en los sistemas de control a nivel industrial se requiere controlar variables de señales analógicas, actualmente el PLC cuenta con un PID integrado, que se optimiza cambiando los parámetros, con lo que se obtiene una mejor respuesta del control, como, por ejemplo, la utilización del método de optimización de enjambre de partículas (PSO) y el algoritmo genético (GA) (Kanango et al., 2019).

2.3.1. Implementación en un PLC con requerimientos en tiempo real

En trabajos anteriores (Lechler et al., 2019) y (Alves & Morris, 2018), se ha investigado la aplicación para la programación de software de automatización basado en PLC que utiliza IEC 61131-3 (Merdan et al., 2019). El estado actual de la práctica industrial lo determina el uso de entornos de tiempo de ejecución conforme a IEC 61131. Por lo tanto, una implementación conforme a esta norma está enfocada en aumentar la aplicabilidad del concepto en la industria. Si bien IEC 61499 (Bonci et al., 2020) representa un concepto prometedor para implementar software de

automatización inteligente flexible (Novak et al., 2017; Atmojo & Vyatkin, 2018), no se ofrece un soporte de hardware adecuado en términos de interoperabilidad con los dispositivos de campo industriales actuales.

Además, se presenta el procesamiento del modelo propuesto para una implementación en PLC descentralizado que permite la reconfiguración dinámica del software de automatización en tiempo real. Si bien los trabajos anteriores se enfocaron principalmente en aplicaciones de automatización en procesos con comportamiento continuo, en este trabajo se empleó el concepto para aplicaciones en automatización de fabricación y se investigaron las adaptaciones necesarias para sistema discreto (booleano).

La realidad virtual en el documento (Berg & Vance, 2017) por sí sola ya es utilizada para capacitación o entrenamiento de operadores en la planta, pero, como se sabe, en cualquier planta industrial se requiere de un control fácilmente programable, flexible, confiable, robusto y rentable, como lo es el PLC.

2.3.2. Conceptos para el software de automatización flexible

La tecnología de agente, como un concepto especializado para el software de automatización cognitiva (Abar et al., 2017), se ocupa cada vez más para el software de automatización flexible con el fin de realizar diferentes funciones requeridas para la supervisión confiable de la producción, el diagnóstico y el control de fallas (Rehberger et al., 2017 y Vogel-Heuser et al., 2017).

La mayoría de las aplicaciones de la tecnología de agentes en entornos industriales tratan diferentes problemas de reconfiguración de los sistemas de control para hacer frente a las averías de los módulos o los cambios estructurales del sistema (B. Chen et al., 2017). Se han llevado a cabo actividades de investigación a largo plazo en este dominio (Dias et al., 2017).

Los sistemas basados en agentes también se han aplicado para fabricar productos en función de su procedimiento (Cruz Salazar et al., 2019) y para realizar la planificación de la producción distribuida (Ocker et al., 2019; Karnouskos et al., 2019), logrando así niveles más altos de autonomía y adaptabilidad de los sistemas de producción.

La recomendación y la producción de módulos de autocontenido se centran en los sistemas de producción evolutivos (Borangiu et al., 2019). Sobre la base de una descripción de las tareas para realizar un proceso de producción requerido, se han propuesto funciones auto organizadoras que controlan los componentes del sistema (Karnouskos et al., 2020).

Estos enfoques abordan aspectos organizativos de un sistema de producción respecto a patrones, es decir, las opciones de decisión requeridas se realizan a través de la duplicación de patrones o funciones de control redundante ofrecidas por diferentes módulos. Los defectos de los sensores y su impacto en el control y la calidad no se consideran.

En los últimos años, se han llevado a cabo muchas actividades en la investigación y la industria sobre la norma IEC 61499 (Lyu & Brennan, 2021) para sistemas de control de automatización distribuidos industriales (Gröhn et al., 2017; C. A. García et al., 2018; Merdan et al., 2019), lo que ha resultado en una mayor investigación en software de PLC reconfigurable. M. V. García et al., 2017 y Spinelli et al., 2018 han propuesto una aplicación para la reconfiguración en línea del comportamiento de control de los sistemas logísticos internos.

Para razonar sobre el comportamiento de ejecución de las capacidades de control, se aplican máquinas de estado anidadas para definir las operaciones necesarias encaminadas a adaptar el comportamiento de control (Schulte & Spencer, 2020), utilizando patrones redundantes autocontenido.

Para cumplir con los requisitos en tiempo real utilizando sistemas de agente, los enfoques descritos anteriormente dividen el nivel de control en una parte superior e inferior. Por lo tanto, separan la tarea de control subyacente de la tarea de reconfiguración, lo que da como resultado que los agentes influyan en la aplicación de control, variando los valores de los parámetros lentamente y con débiles requerimientos en tiempo real.

Sin embargo, los agentes deben cumplir requisitos estrictos en tiempo real (por ejemplo, ciclos de operación del PLC). Una plataforma de agente para operación en tiempo real, como lo presentado por (Vale et al., 2021), por ejemplo, o donde no se consideran los estándares existentes, como el presentado por (Zhao et al., 2017), se aplica para implementar software de automatización en PLC.

En la industria de procesos, se han propuesto varias aplicaciones basadas en agentes, especialmente para procesos críticos (Joseph & Olaiya, 2017; Abar et al., 2017; Khan et al., 2019). Por lo tanto, los grandes esfuerzos de ingeniería (incluidos los estudios detallados de hardware instalado y la producción bajo control) para desarrollar modelos precisos dificultan las aplicaciones con los procesos críticos.

2.3.3. PID del controlador lógico programable

En este apartado revisaremos una estructura de control particular que se ha utilizado casi universalmente en el control industrial, la cual se basa en una determinada familia de controladores de estructura fija. Se trata de la denominada familia de controladores proporcional-integral-derivativo, que han demostrado ser robustos en el control de muchas aplicaciones importantes.

Los controladores PID son la forma más común de los controladores, por su versatilidad garantiza la relevancia y la popularidad de éste. También es importante ver esta configuración de segundo orden como un caso especial de los métodos de diseño modernos. Esto se hace debido a la importancia histórica y práctica de los métodos y su uso continuo en la industria.

Los métodos más notables para ajustar los parámetros PID son el método de Ziegler-Nichols (1942) (Wiharya et al., 2021), el método de Cohen-Coon (1953) (Azman et al., 2017) y el método de Astrom (Tasoren et al., 2018). En (Romasevych et al., 2019) se encuentra un conjunto detallado de varias técnicas de ajuste de controladores PID y PI.

En la revisión del estado del arte, se ha logrado analizar cómo realizar un ajuste automático del controlador PID utilizando el método óptimo simétrico de Kessler (Dulf, 2019). Su método aborda la robustez y los problemas de rendimiento de circuito cerrado de las unidades eléctricas. El trabajo de (Szekely et al., 2019) ha mostrado cómo diseñar controladores robustos que sean óptimos y de orden fraccional aplicados a muchos campos de la industria, como la biología, la medicina, la generación de energía, la ingeniería química, entre otros.

Para los PID, se ha considerado el uso del cálculo fraccional para modelar sistemas físicos (Nguyen & Nguyen, 2018; Jakovljević et al., 2021). También podemos encontrar trabajos relacionados con la aplicación de esta herramienta matemática en la teoría del control (Al-Dhaifallah et al., 2018; Hamouda et al., 2020; Birs et al., 2020; Kampker et al., 2020). A continuación, se muestra la ecuación de transferencia (9) de un PID que representa el sistema de control en tiempo continuo (dominio s):

$$U(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i} + T_d s \right] E(s)$$

Ecuación 9. Función de transferencia del PID en S

Para los PID, asumimos que un modelo de tiempo discreto está disponible desde los primeros principios o los métodos de identificación del sistema, y de ahí en adelante. Lo anterior permite que los diseños se integren fácilmente en métodos que involucran la identificación computacional del sistema a través de los datos de acceso para la implementación de un control con señales reales de un PLC,

esto mediante el modelado de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual, lo cual es precisamente el objetivo principal de esta tesis.

Otro aspecto importante de este trabajo radica en el hecho de que todos los algoritmos se crean completamente en tiempo discreto. En términos generales, hay dos enfoques para diseñar en tiempo discreto: se diseña el sistema en tiempo continuo (dominio s) del PID, y luego se usa una transformada de Tustín de preservación de fase para lograr el formato de tiempo discreto (dominio z) y la implementación en computadora; finalmente, se diseña el sistema en tiempo discreto usando la transformada bilineal (Tustín). Para esta investigación no fue necesario discretizar la ecuación del PID debido a que cualquier PLC que se aplica en la actualidad ya trae integrado en forma digital su PID.

2.4. PLANTA INDUSTRIAL AUTOMATIZADA VIRTUALMENTE

Hasta la fecha de hoy, en su totalidad, las industrias que experimentan con la funcionalidad existente en un proceso productivo industrializado (Thannhuber et al., 2017) deben tener en cuenta que todo el equipamiento que realiza el proceso del sistema debe estar ensamblado en su conjunto, gracias a la implementación exitosa de la fabricación digital, se hace factible la experimentación y validación del diseño, así como la configuración de productos, procedimientos y sistemas (Mabkhot et al., 2018; Mourtzis, 2020), sin ensamblar ningún componente físico.

De lo antes mencionado, una gran representación de inconvenientes de diseño y fallas permanecen indetectables, incluso hasta que se prueba cualquier sistema, generándose demoras en la entrega del proyecto, re-trabajos y pérdidas financieras. Según Zäh and Wünsch (2005), el tiempo de puesta en marcha consume arriba del 15-20 % del tiempo de diseño de ingeniería y construcción de un sistema automatizado, y más de un 70 % de este tiempo se desperdicia corrigiendo errores del software de control que permite la interacción entre el PLC y cada uno de los componentes del sistema (Rahman & Mohamad, 2016).

Precisamente, para evitar pérdidas en la puesta en marcha de una planta industrial, se hace uso de tecnologías emergentes que puedan recrear plantas que apenas se van a poner en operación con la realidad virtual y conectarla al PLC en tiempo real, evitando así las pérdidas de tiempo en programación en el software de control que permite la interacción entre el PLC y cada uno de los componentes del sistema.

En la actualidad, el significado de la puesta en marcha virtual ha incorporado una solución soberanamente viable para resolver los inconvenientes citados. La idea primordial es ensamblar una fábrica virtual a un controlador real, de modo que ingenieros de diferentes áreas (procesos y automatización, por ejemplo) se pueda operar junto como un prototipo común.

De esta forma, el programa del PLC puede ser probado sin tener que esperar la implementación física del proceso, y la funcionalidad general de la planta puede ser validada (Lechler et al., 2019; Eros et al., 2019; Hanna et al., 2019). Estudios han demostrado los efectos positivos de trabajar con la puesta en marcha virtual, reduciendo costos y añadiendo valor (Delgado et al., 2019; Fernández et al., 2019). Asimismo, se ha estudiado su escalabilidad económica y tecnológica (Woods et al., 2017; Ahrens et al., 2019).

En la literatura se encuentra disponible una gran variedad de trabajos que representan esfuerzos importantes para la implementación de la puesta en marcha virtual (Hoedt et al., 2017; Paasivaara et al., 2018; Dingsøyr et al., 2018; Bikhmukhametov & Jäschke, 2020). Cada uno de estos trabajos muestran grandes avances en esta temática, y la totalidad de estos revela ciertos aspectos o inconvenientes en los que resulta inevitable trabajar.

Entre estos destacan: 1.- La generación de los escenarios de realidad virtual dada la necesidad de software altamente especializado y 2.- La adecuada modelación del comportamiento físico de los componentes involucrados en la escena 3D,

específicamente dispositivos altamente especializados como robots, sistemas térmicos, hidráulicos, neumáticos, químicos, entre otros.

A continuación, en la figura 5 se muestra una revisión en las bases científicas de Scopus sobre cómo han evolucionado los sistemas de simulación en la manufactura, estos datos son presentados por la revista Internacional Journal of Production Research, contemplando que la simulación en el diseño de sistemas de fabricación (marcado con color azul) tiene un aumento exponencial de acuerdo con los trabajos publicados por encima de las 10,000 publicaciones. La simulación en el funcionamiento de sistemas de fabricación (marcado de color verde) también tiene un comportamiento exponencial pero más pequeño que el anterior, estando por encima de las 4,000 publicaciones. La simulación en sistemas de fabricación (marcada de color gris) tiene un comportamiento mucho mayor que los dos anteriores, y están por encima de las 23,000 publicaciones.

Por último, se muestra la simulación en el diseño y operación de los sistemas de fabricación (marcado de color amarillo), que tiene un pequeño comportamiento exponencial mucho menor que los tres anteriores, estando apenas por encima de las 1,700 publicaciones. Y es en esta parte donde cae el desarrollo de la aplicación de esta tesis, con esto se demuestra que hay un amplio campo para realizar tales desarrollos.

La gran totalidad de las plataformas disponibles hacia la mejora de aplicaciones virtuales (como se muestra en la figura 6), con la evolución histórica de la simulación se ha admitido la inserción de código de programación en lenguajes de alto nivel, para el desarrollo de estas plataformas virtuales, por lo que es viable que se logre implementar el modelado dinámico de los sistemas físicos embebidos en la escena para garantizar una simulación apegada a la realidad con la implementación del PLC.

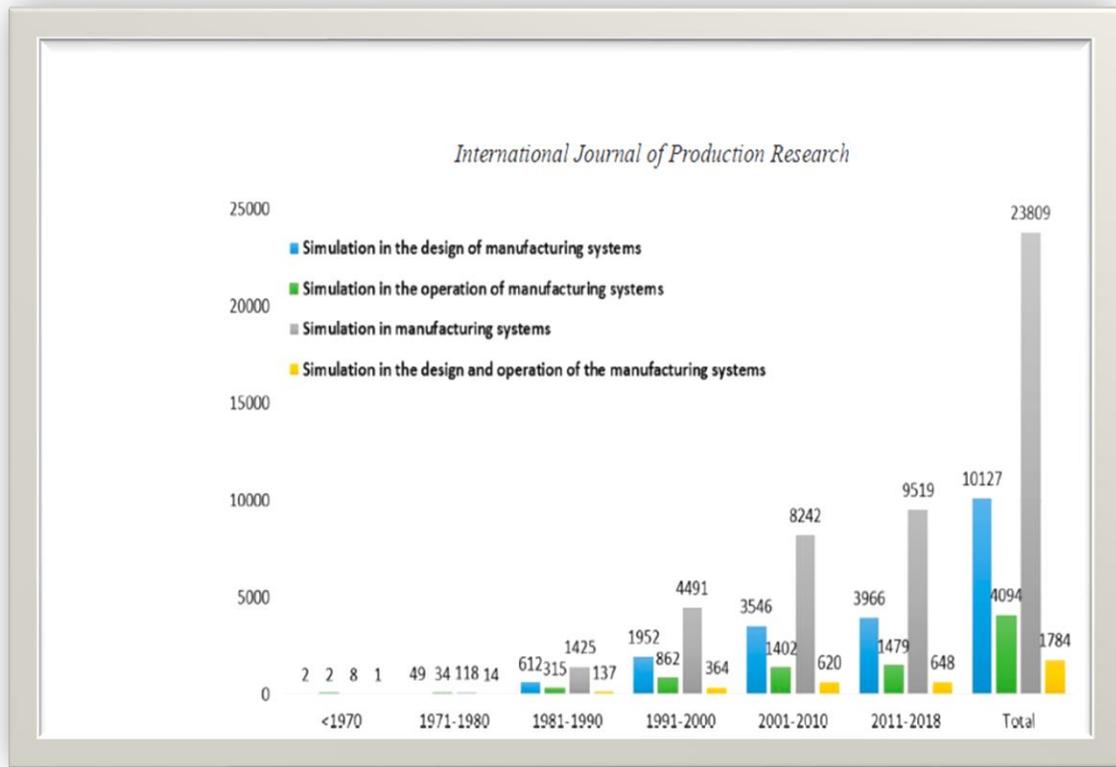


Figura 5. Número de publicaciones basadas en la puntuación de la base de datos Scopus (Mourtzis, 2020)

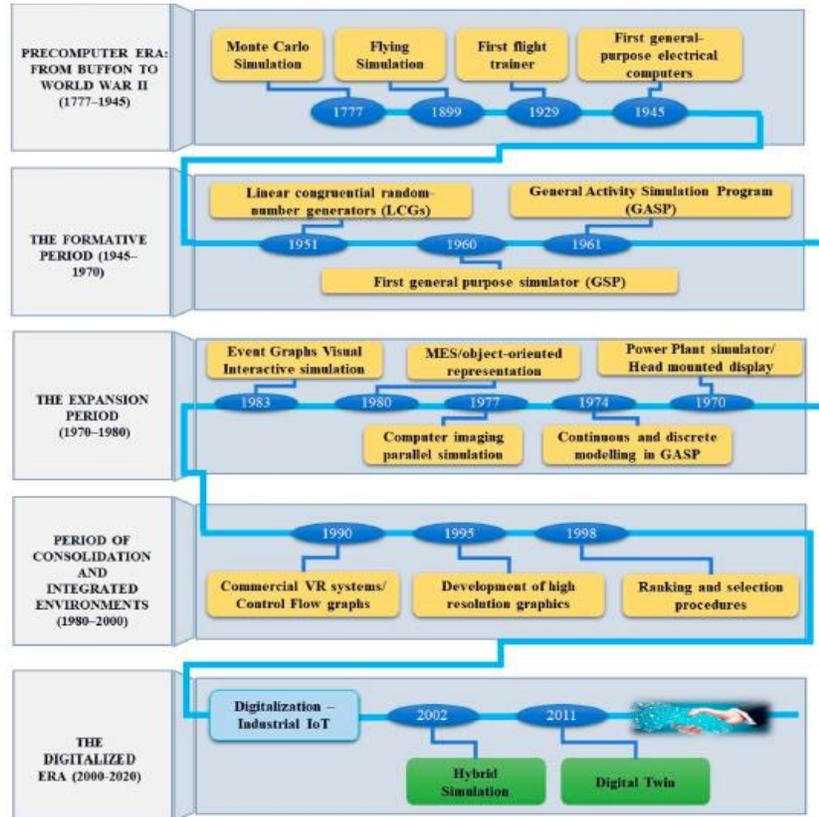


Figura 6. Evolución histórica de la simulación
(Mourtzis, 2020)

De manera similar, se admite la posibilidad de realizar un protocolo de comunicación entre el escenario virtual y cualquier PLC, pero para poder controlar cualquier sistema dinámico se debe modelar el sistema embebido en escena (Ortega-Moody et al., 2017). En la tabla 2 se muestra la comparación de técnicas (representada por la columna uno, visor), atributos (representados en la columna dos, resolución, columna tres, frecuencia de actualización y columna cuatro, ángulo de visión) y costos de los visores aplicados en la realidad virtual, según la revisión de Alfaro.

Tabla 2. Comparación de técnicas, atributos y costos

Visor	Resolución	Frecuencia de actualización	Ángulo de visión	Precio en dólares
Oculus Rift	2160x1200	90 Hz.	110	700.00
Hololens	1920x1080	120 Hz.	110	3,000.00
PlayStation VR	1920x1080	120 Hz.	100	400.00
HTC Vive	2160x1200	90 Hz.	110	900.00
Gear VR	2560x1440	60 Hz.	96	100.00
CardBoard	Variable	Var	90	5.00
Oculus GO	2560x1440	72-60 Hz.	110	169.00

(Alfaro et al., 2019)

Tabla 3. Comparación entre metodologías de formación

Aspectos	Métodos de entrenamiento			
	Classroom training	On-the-job training	Convention al OTS	OTS in VR environments
Exposición práctica	x	✓	✓	✓
Sensación real del proceso	x	✓	x	✓
Visualización de la vida real de varios aspectos del proceso (escenario de accidente, por ejemplo)	x	✓	x	✓
Riesgo para la planta durante la formación	x	✓	x	x

(Patle et al., 2019)

Asimismo, Patle et al. realizó una revisión en las plataformas de Scopus para hacer una comparación de los diferentes métodos de entrenamiento, contemplando los siguientes aspectos: exposición práctica, sensación real del proceso, visualización de la vida real de varios aspectos del proceso y riesgos de la planta durante la formación, según la tabla 3.

Tabla 4. Fuentes de revisión sistemática: bases de datos de búsqueda, cadenas y número de resultados.

Base de datos	Cadena de búsqueda	Resultados
ACM Digital Library	acmdlTitle:(<i>"virtual reality"</i> VR) AND acmdlTitle:(classroom school education)	15
IEEE Xplore	((<i>"Document Title":</i> <i>"virtual reality"</i>) OR (<i>"Document Title":</i> VR)) AND ((<i>"Document Title":</i> education) OR (<i>"Document Title":</i> classroom) OR (<i>"Document Title":</i> school))	39
Web of science	Title:(<i>"Virtual reality"</i> OR <i>"VR"</i>) and Title:(education OR school OR classroom)	128
Scopus	TITLE (<i>"virtual reality"</i> OR vr) AND TITLE (education OR school OR classroom) AND PUBYEAR > 2009	179
ERIC	((<i>title:"virtual reality"</i>) OR (<i>title:"VR"</i>)) AND ((<i>title:"education"</i>) OR (<i>title:"school"</i>) OR (<i>title:"classroom"</i>))	18
Total		378

(Kavanagh et al., 2017)

Por último, Kavanagh et al. efectuó una revisión en las bases mostradas en la tabla 4 sobre la aplicación de sistemas virtuales en las instituciones educativas de nivel superior, encontrando un total de 378 aplicaciones, por lo que se requiere redoblar esfuerzos para el desarrollo en estas aplicaciones al demostrar ser una excelente herramienta de formación.

Se realizó una revisión basada en publicaciones académicas, verificada por pares en las bases de datos Scopus, utilizando laboratorios virtuales aplicados a la simulación en áreas relacionadas con el tema de investigación. De esta forma, la importancia de la simulación inmersiva en aplicaciones de formación es cada vez mayor en diferentes áreas, tales como la industrial, la médica, la aeroespacial, entre otras, se pone de manifiesto por el aumento exponencial de publicaciones sobre el tema.

Por tal motivo, la simulación es una parte cada vez más significativa con el potencial de sustentar aspectos como el ahorro de tiempo y de costos, principalmente, tales como los mostrados en la tabla 5, donde se observa que en los laboratorios no realizan la aplicación de controles industriales externos.

Tabla 5. Revisión sistemática de laboratorios virtuales

Autores	Título del artículo	Técnica	Sistema de control	Plataforma	Ventajas	Desventajas
Zhibao et al., 2017	A Robotic Simulation System Combined USARSim and RCS Library	Framework of simulation system	Virtual	USARSim y RCS	Controlar el modelo de un robot	Totalmente virtual
Sánchez-Alonso et al., 2016	Uso de Plataformas para el Desarrollo de Aplicaciones Virtuales en el Modelado de Robot Manipuladores	Modelado 3D en robótica	Virtual	Unity 3D	Modelado del robot paralelo	Totalmente virtual
Mashhadany et al., 2019	Intelligent Controller for 7-DOF Manipulator Based upon Virtual Reality Model	ANFIS	Virtual	Matlab	Modelado del manipulador 7-DOF	Totalmente virtual
Xie et al., 2018	Virtual Experiments for Design of Robotics Based on V-REP	Modelado 3D en robótica	Virtual	V-REP	Modelado de robot base para paletizado	Totalmente virtual
Uk et al., 2020	Modeling, control, and simulation of a SCARA PRR-type robot manipulator	PRR (Prismatic-Revolute-Revolute)	Virtual	Matlab VRLM	Modelado del manipulador SCARA, Par mayor	Dificultad en el control
Safeea & Neto, 2018	Human-Robot Collision Avoidance for Industrial Robots: A V-REP Based Solution	Framework's reliability	Virtual	V-REP	Valida el algoritmo de prevención de colisiones entre humanos y robots	Totalmente virtual
Román-Ibáñez et al., 2018	A Low-Cost Immersive Virtual Reality System for Teaching Robotic Manipulators Programming	AABB (Axis Aligned Bounding Box)	Virtual	Matlab OpenGL	Mejora la calidad de la enseñanza en tecnología robótica	Totalmente virtual
Marayong et al., 2020	Urban Air Mobility System Testbed using CAVE Virtual Reality Environment	CAVE VR	Joystick	Unity 3D	Control de vuelo	Control manual
Bruguera et al., 2019	Use of Virtual Reality for astronaut training in future space missions - Spacecraft piloting for the Lunar Orbital Platform - Gateway (LOP-G)	Plataforma Orbital Lunar - Gateway (LOP-G)	Virtual	Unity 3D y Orbiter Space Flight Simulator	Simulador de vuelo espacial	Totalmente virtual

Perez-Ramirez et al., 2019	The use of a virtual reality training system to improve technical skill in the maintenance of live-line power distribution networks	Mantenimiento de redes de distribución de energía con línea viva.	Virtual	Plataforma 3D	Formación de operadores en líneas aéreas	Totalmente virtual
Piechowski et al., 2020	Virtual reality as training aid for manual spacecraft docking	Cama por gravedad artificial con la ESA (AGBRESA)	Control manual	Unity 3D y el software 6df	Formación en control de nave espacial	No tiene la totalidad de controles
Feng et al., 2020	How people make decisions during earthquakes and post-earthquake evacuation: Using Verbal Protocol Analysis in Immersive Virtual Reality	El análisis de protocolo verbal (VPA)	No aplica	Unity 3D	Toma de decisiones de las personas en terremotos y evacuación	Dificultad en obtención de datos en terremotos reales
Gace et al., 2019	Virtual Reality Serious Game Prototype for Presenting Military Units	LoPoly Rigged Hand y RigidHand.	Manual	Unity 3D	Selección de la unidad militar	Totalmente virtual
Zheng et al., 2018	A Virtual Reality Rehabilitation Training System Based on Upper Limb Exoskeleton Robot	VR Rehabilitation Training Game Design	Virtual	Unity 3D	Rehabilitación cerebrovascular	Totalmente virtual
Liou & Chang, 2018	Virtual Reality Classroom Applied to Science Education	HTC Vive VR	Manual	Modelado 3D	Enseñanza de elementos químicos y experimento de anatomía humana	Totalmente virtual

(Elaboracion propia)

3. PROCEDIMIENTO

En este capítulo se explica el desarrollo del escenario de realidad virtual, aplicado como caso de estudio la puesta en marcha virtual de una planta embotelladora. La metodología desarrollada está basada en la construcción del procedimiento del proyecto, la implementación y los tipos de entrenamientos, así como las especificaciones generales del proceso, el modelado matemático del procedimiento de los sistemas especializados y la interfaz de comunicación, incorporando el escenario de realidad virtual y el control industrial con señales reales del PLC.

3.1. TEMA DE ESTUDIO: PUESTA EN OPERACIÓN VIRTUAL PARA PLANTA EMBOTELLADORA AUTOMATIZADA

En este trabajo de tesis se propone una metodología para determinar si el diseño de modelo de sistemas dinámicos, aplicado en escenarios de realidad virtual, es funcional con la implementación de un control industrial como es el PLC, y de esta manera, bajo un programa de entrenamiento, las personas puedan obtener su formación en tiempo real. El tema de estudio en cuestión se propone como "Puesta en operación virtual para planta embotelladora automatizada".

La metodología sigue los objetivos de desarrollo en el uso de los "Serious Games", directriz que utiliza motores de videojuegos o ciberfísicos y otras herramientas de gran disponibilidad (software y hardware) en el desarrollo de los escenarios virtuales de la planta embotelladora, los cuales se contempla que hagan más realista el entretenimiento.

La gran totalidad de las plataformas disponibles hacia la mejora de aplicaciones virtuales admite la introducción de código de programación en lenguajes de alto nivel, lo cual facilita realizar la programación del modelado dinámico de los sistemas físicos embebidos en la escena y posibilita avalar una simulación acoplada a la realidad. De manera similar, se permite la posibilidad de realizar un protocolo

de comunicación incorporando el escenario virtual y cualquier marca o modelo de PLC.

3.2. METODOLOGÍA

La metodología usada en el diseño es mostrada en la Figura 7. Esta inicia con una serie de especificaciones mostradas en el anexo C del proceso a virtualizar. Una vez que las características físicas son obtenidas del proceso, al igual que el comportamiento dinámico de cada elemento (mecanismos, sensores y actuadores) y su diseño asistido por computadora (CAD), el tercer paso es insertar los diseños CAD en el motor de física para asignar el comportamiento dinámico de cada elemento. Finalmente, el desempeño de cada elemento es probado para asegurar que su comportamiento se acerca lo más posible a la realidad.

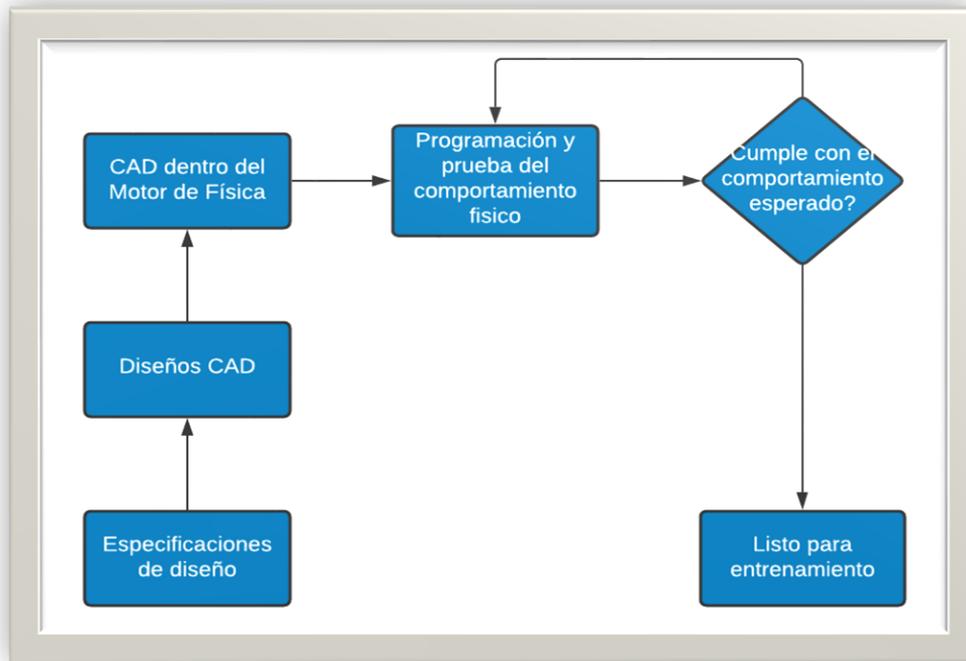


Figura 7. Metodología
Elaboración propia

3.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el diseño e implementación del trabajo de investigación, se analizó la arquitectura del sistema, que la componen los motores ciberfísicos y la interfaz electrónica física serial, que es la que realiza la comunicación con el PLC. A su vez, éste se comunica con la computadora personal y otros controladores para el buen funcionamiento del laboratorio virtual y la formación, así como la implementación con los componentes del escenario virtual construido de la planta automatizada en el sistema de ciberfísicos.

Finalmente, se realizan las conexiones de la interfaz electrónica física, que es la que realiza la comunicación de los motores ciberfísicos con el PLC para ser implementado en tiempo real con señales digitales. Asimismo, dichas señales son emuladas desde dispositivos virtuales, tales como motores, pistones, interfaz hombre máquina (HMI), entre otros.

Cabe aclarar que el comportamiento de estos dispositivos depende del grado de sofisticación del modelo, que es comparado con el comportamiento de dispositivos físicos reales. Además de que son señales eléctricas reales, porque se conectan físicamente las terminales de entrada y las terminales de salidas en el PLC físico, con el fin de llevar a cabo los tipos de entrenamiento para la formación en tiempo real.

3.3.1. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema es mostrada en la figura 8, como base principal hace uso de los motores ciberfísicos que son representados en los bloques de inicio de la figura, en los que se implementan los escenarios de realidad virtual de la planta automatizada, los cuales se comunican con los controladores externos a través del protocolo de comunicación serial.

En el siguiente bloque de la figura 8, es representada la interfaz electrónica física serial, quien realiza la comunicación e interpretación de los datos del escenario virtual industrial y los datos que emanan del control industrial. Es mediante tal comunicación que el acceso a las señales desde los sensores y actuadores virtuales es posible, así como mediante las señales de las terminales de entradas y las terminales de salida de cualquier PLC.

El bloque siguiente de la figura 8, representa el control industrial que se implementó, siendo este el PLC Compact Logix 5370 L1 de la empresa Allen Bradley. Dicho PLC se comunicó con el puerto ethernet de un equipo de cómputo independiente para realizar la programación en escalera del PLC. De esta manera se logró controlar el sistema virtual de todos los componentes de la planta industrial embebidos en ambiente, gracias además a las condiciones del desarrollo del software para el desempeño de los motores de física virtuales de videojuego que usa Unity 3D, implementado en una laptop gamer novena generación marca Lenovo Legión.

Asimismo, los últimos bloques representado en la figura 8, los controladores externos (PC, controles externos, comunicación mdbus, entre otros) que se conectan directamente al control industrial o PLC son representados, por botones de encendido y paro de la planta, y mediante el envío de señales y comandos por la tarjeta electrónica se actualizan continuamente el estatus y los resultados de la simulación.

La simulación del comportamiento físico de los objetos es llevada a cabo por medio de un motor de física independiente a la tarjeta de comunicación del control industrial con el PLC, lo cual ayuda al sistema a no volverse lento debido a cálculos excesivos y lo libera para concentrarse en la comunicación con el cliente.

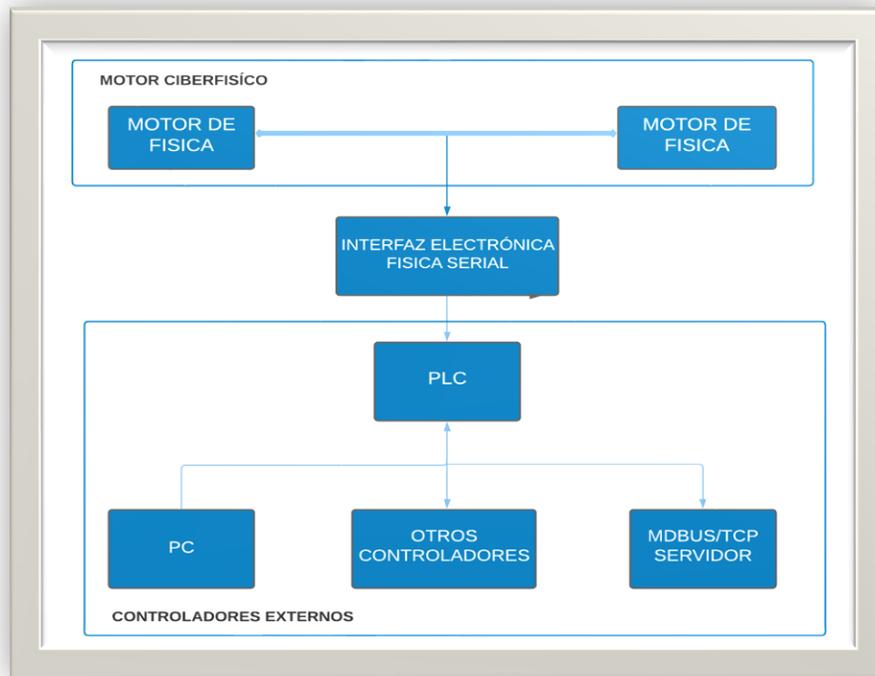


Figura 8. Arquitectura del sistema
Elaboración propia

3.3.2. Implementación

Con respecto a la implementación, el escenario de realidad virtual de la puesta en operación es una planta embotelladora automatizada como tema de estudio. Este escenario de puesta en operación de una planta automatizada de llenado de botellas fue implementado con el control industrial PLC; además, sensores, capacitivos e inductivos, y actuadores, como motores CD y pistones, fueron virtualizados. También fueron añadidos sonidos a todos los equipos, representando las características de los procesos y su función para crear un ambiente virtual ajustado a la realidad.

La otra tecnología utilizada es el motor de física o ciberfísicos, en este caso NVIDIA® PhysX®, uno de los motores de física comercialmente disponible más robustos. Un motor de física es un software que provee una simulación aproximada de ciertos sistemas físicos, tales como cuerpos rígidos, cuerpos flexibles y fluidos. Esto significa

que, a través de un motor de física, el comportamiento real de todos los sistemas embebidos en el escenario son representados con precisión.

En el caso de la planta automatizada de llenado de botellas, los sistemas físicos son representados por un sistema dinámico, donde el motor de física provee la oportunidad de configurar muchas características para simular el comportamiento de sistemas dinámicos, incluyendo gravedad, detección de colisiones, masa, centro de masa, velocidades, aceleraciones, fuerzas, torques, mezclado, calentamiento, entre otras variables.

La tecnología anteriormente mencionada, aunada al modelado de sistemas dinámicos, da como resultado un conjunto de escenarios con un elevado grado de realismo en el comportamiento de todos los sistemas embebidos en el ambiente virtual.

3.3.3. Tipos de entrenamiento

El laboratorio consiste en dos condicionantes: la de los escenarios de realidad virtual, que permiten entrenar por separado el control industrial mediante la programación en escalera del PLC, y la operación de la máquina virtual a operar con dos personas simultáneamente, en la que un operador puede estar programando el PLC con una computadora diferente para estar controlando la planta automatizada, mientras un ingeniero de campo entrena en la escena con el Oculos Rift. Es importante mencionar que tal interacción en el escenario virtual se puede realizar simultáneamente.

Al aplicar ambos modos al mismo tiempo, el operador puede visualizar la planta en operación y puede interactuar dentro del escenario virtual, supervisando el llenado de las botellas con las manos e interactuando con cualquier otro componente dentro del escenario virtual, mientras que el ingeniero de campo que está entrenando y se mueve libremente dentro de la escena, lo cual se muestra en la figura 9.

La automatización de la planta virtual de la puesta en marcha de llenado de botellas tiene lugar programando un PLC con todas las rutinas para cada componente industrial, procedimiento para el que se utilizó el *Rockwell Automation RS Logix 500*. En el escenario virtual propuesto, la tarea del usuario es programar el PLC, probar la rutina programada y hacer correcciones en caso de ser necesarias.



Figura 9. Ingeniero dentro de la escena.

Elaboración propia

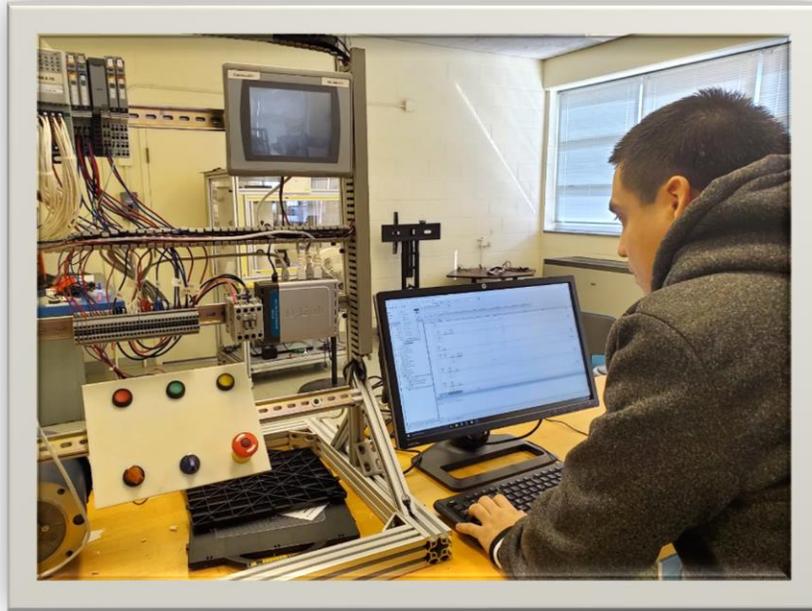


Figura 10. Ingeniero programando el PLC.
Elaboración propia

El objetivo del ejercicio de entrenamiento es la puesta en operación de una planta automatizada virtual completamente funcional. La figura 10 muestra al segundo ingeniero interactuando con el PLC real por medio de la interfaz interactiva, donde puede visualizar y modificar los parámetros dinámicos de la planta industrial automatizada de botellas. Esta interfaz es la forma manual en la que el usuario puede controlar la operación de la planta automatizada.

3.4. EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO

El proceso se fundamenta en la articulación de una pequeña planta automatizada para el embotellado de un producto líquido (figura 11 a). El proceso se prepara con la mezcla y calentamiento de dos ingredientes que componen el producto, los cuales proceden de dos tanques diferentes (figura 11 b). Una vez que la mezcla logra la temperatura equivalente (establecida por el operario de la planta virtual), el producto es enviado por conductos al sistema de llenado (figura 11 c).

El sistema de llenado es compuesto primordialmente por un tanque de almacenamiento y cuatro inyectores para el llenado simultaneo de igual cantidad de botellas. Las botellas plásticas son transportadas hacia el sistema de llenado a través de bandas transportadoras, y posteriormente se trasladan hacia el área de tapado y sellado, adonde finaliza el proceso.

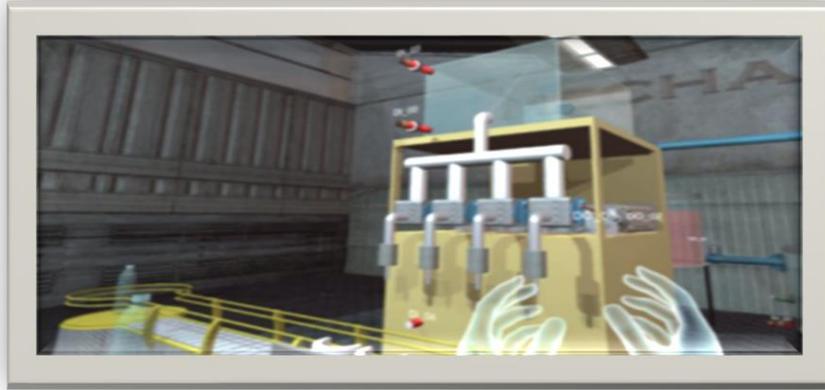
El estudio concluye en el desarrollo hacia la puesta en operación virtual de la planta embotelladora automatizada, que permite la navegación 3D y la operación de objetos (figura 11 d) por parte del operario a través del hardware "Oculus Rift".



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11. Planta embotelladora virtual. a) Perspectiva general. b) Sistema de mezclado y calentamiento. c) Sistema de llenado. d) Operario tocando botella llena.

Elaboración propia

El tanque de mezclado y calentamiento forma un sistema dinámico, donde se consideran propiedades físicas como el flujo másico del fluido, el volumen contenido en el tanque, la viscosidad o densidad, el calor específico, la capacidad calorífica del sistema de calentamiento, entre otros. La señal de control en el periodo derivado del PLC hacia este sistema es en función de las únicas características físicas de ésta, tal y como sería en el proceso de control de un sistema térmico real. Se implementó el sistema dinámico bajo el supuesto de ser un

sistema aislado, lo que indica que no hay intercambio térmico entre el contenido del tanque y el exterior.

Esta es la parte más importante del laboratorio de realidad virtual, ya que se trata de un sistema dinámico. Aplicando las teorías de control sobre la planta (tanque de mezclado y calentamiento), se tiene un sistema dinámico o de comportamiento de primer orden, del cual se obtiene su función de transferencia con un balance térmico de energía.

El escenario virtual queda especificado para interactuar a través de una interfaz física y un protocolo de comunicación con cualquiera de las I/O, tanto analógicas como digitales del PLC, que sean necesarias para automatizar todo proceso con actuadores y sensores.

3.4.1. Modelado 3D

La etapa de modelado comienza con la caracterización de todos los objetos que quedarán visualmente disponibles en la escena: botoneras, tanques, válvulas llenadoras, bandas transportadoras, botellas, entre otros. Posteriormente, se procede a diseñar con las especificaciones del fabricante, o comenzando en cero cada uno de estos componentes.

En cuanto a todos los modelos CAD manipulados, estos fueron desarrollados a escala real en SolidWorks®, y después fueron enviados en formato STL (Stereo Lithography) hacia 3DS MAX, adonde se trabajó en la disminución de los polígonos que constituyen el mallado de cada modelo 3D. La intención de este tratamiento es reducir el costo computacional del desarrollo gráfico de la aplicación virtual. A continuación, cada modelo 3D es mandado en formato FBX (FilmBox) hacia Unity 3D.

3.4.2. Ensamblaje y arreglo de la escena virtual

El escenario virtual adquiere representación en la medida que se inician a importar los modelos CAD a Unity 3D. A cada componente implantado se le conoce como 'game object', y posee un sin número de propiedades, algunas tan elementales como son su posición, su rotación y su escala, que al ser transformadas vía código de programación admiten animar al 'game object'. Si se quiere que el objeto reaccione ante cualquier propiedad física, como la gravedad, ciertos torques externos, asignación de masa, un material determinado, entre otros, es necesario configurarlo como 'rigid body'.

Otra propiedad sustancial por configurar es la de 'collider', la cual le admite a un objeto interactuar con otros en la escena; se trata de una región envolvente que define el área de acercamiento de un cuerpo, logrando que esta zona tome la forma de distintas figuras geométricas, como esferas y cubos, o inclusive que tome la forma justa de las mallas del objeto sobre el cual opera. Y es que un cuerpo logra interactuar con distintos cuerpos gracias a la operación de una o diversas articulaciones. Éstas y diversas características físicas, tales como luces, texturas, sonidos, entre otras, logran ser configuradas en Unity 3D.

El área de la realidad virtual crece tenazmente, y este aumento ha traído logros de una extensa disponibilidad de hardware hacia estos proyectos. Uno de los accesorios crecidamente poderosos y accesibles en el mercado es el 'oculos rift', mostrado en el anexo A, el cual contiene unos lentes de realidad virtual suministrados con controles manuales que quedan interconectados a sensores de posición fijos.

'Oculus rift' es compatible con varios motores de videojuegos, como Unity 3D, gracias al acceso abierto de los drivers y su cómoda instalación. Para el propósito de puesta en operación virtual, mostrado en este trabajo, el operario puede navegar libremente en primera persona dentro de toda la escena e interactuar

con cosas con sus propias manos. En la figura 12 se representa la experiencia del operario de la fábrica automatizada dentro del escenario virtual.



Figura 12. Interacción en el escenario virtual mediante 'oculos rift'

Elaboración propia

3.5. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DINÁMICO DE LOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS

Los equipos tecnológicos fijados en el escenario virtual se categorizan en dos clases: aquellos cuya etapa en el tiempo logra tomar cualquier valor dentro de una categoría y aquellos cuyo estado queda incorporado a una variable booleana.

El tanque donde se mezcla y calienta el producto a envasar debe ser modelado tal como un sistema dinámico, que a su vez responde a un sistema térmico, en el que el valor de la temperatura es variable en el tiempo hasta que logra una temperatura esperada. Así, el tiempo y la forma en la que se logra la temperatura esperada dependen de las características físicas de los elementos implicados en el sistema.

De forma general, se logró expresar que este sistema está caracterizado por la función de transferencia del calor de un fluido dentro de un tanque, con el análisis de la ecuación de balance de energía. Dicho análisis considera que la acumulación de la energía calorífica del fluido dentro del tanque es igual a la energía calorífica del fluido, basándose en las diferencias de temperaturas más la energía calorífica que se le aplica al fluido dentro del tanque, menos la energía calorífica por conducción. Para el último cambio de energía, se considera como 0 porque se encuentra bien aislado el tanque, y se representa en la siguiente ecuación (10),

$$VC_p\rho\frac{dT}{dt} = \rho C_p F [T_e - T(t)] + Q - \frac{T(t) - T_a(t)}{R}$$

Ecuación 10. Balance de energía en la planta

Donde $T(t)$ es la temperatura del fluido a la salida del tanque, F el flujo másico, V el volumen, T_e la temperatura inicial o de entrada, Q el flujo de calor aplicado al fluido dentro del tanque, $T_a(t)$ la temperatura ambiente fuera del tanque, R la resistencia del material térmico adherido al tanque, ρ la densidad del fluido y C_p el calor específico.

Como el tanque se encuentra bien aislado, esto es representado por la ecuación 11, y las condicionantes y desarrollo de ésta son propias del sistema:

$$\frac{T(t) - T_a(t)}{R} = 0$$

Ecuación 11. Intercambio de calor con el ambiente

Por lo tanto, la ecuación de balance de energía queda representado por la ecuación 12:

$$VC_p\rho\frac{dT}{dt} = \rho C_p F [T_e - T(t)] + Q$$

Ecuación 12. Balance de energía real

Para poder obtener la ecuación que representa la planta (tanque), esta ecuación diferencial la pasamos al dominio de Laplace. Para facilitar el desarrollo de la ecuación, se realiza un cambio de constantes considerando las ecuaciones 13, 14 y 15, representadas de la siguiente manera:

$$K_1 = VC_p\rho$$

Ecuación 13. Constante K_1 del líquido

$$K_2 = \rho C_p F$$

Ecuación 14. Constante K_2 del líquido

$$K_3 = \rho C_p F$$

Ecuación 15. Constante K_3 del líquido

Como la temperatura del fluido a la entrada es constante, se tiene la ecuación 16:

$$T_e = Cte$$

Ecuación 16. Temperatura T_e constante

Por su parte, la ecuación 17 (diferencial) está basada en la temperatura:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d\Delta T}{dt}$$

Ecuación 17. Diferencial de temperatura del líquido

Y al sustituir todos estos términos en la ecuación 17 (diferencial), se obtiene la siguiente ecuación 18:

$$K_1 \frac{d\Delta T}{dt} = Q - K_2 \Delta T$$

Ecuación 18. Ecuación diferencial de la planta

Con la ecuación 18, se trabaja con la transformada de Laplace para obtener una ecuación algebraica (19), la cual se muestra a continuación:

$$\mathcal{L}\left[K_1 \frac{d\Delta T}{dt} = Q - K_2 \Delta T\right]$$

Ecuación 19. Representación de la ecuación de Laplace

La ecuación establecida de Laplace (19) se desarrolla para obtener la ecuación 20, transformada en el dominio de S , representada de la siguiente forma:

$$K_1 S \Delta T = Q - K_2 \Delta T$$

Ecuación 20. Transformada de Laplace de la planta

De la ecuación anterior se separan las variables de entrada y las variables de salida, y se despeja Q , que es la potencia calorífica, obteniendo la ecuación 21:

$$K_1 S \Delta T + K_2 \Delta T = Q$$

Ecuación 21. Variable de entrada y de salida de la planta

Factorizando ΔT en la ecuación 21, se obtiene la ecuación 22:

$$[K_1 S + K_2] \Delta T = Q$$

Ecuación 22. Factorización del primer termino

Despejado ΔT de la ecuación 22, se obtienes la ecuación 23:

$$\Delta T = \frac{Q}{[K_1 S + K_2]}$$

Ecuación 23. Variable de entrada despejada

De acuerdo con la teoría de control clásico, la ecuación de transferencia de la planta (tanque) es obtenida con la variable que representa la salida entre la variable que representa la entrada, por lo que la ecuación de transferencia dinámica en el dominio de Laplace (24) quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{K_1 S + K_2}$$

Ecuación 24. Función de transferencia de la planta

La ecuación correspondiente el dominio de Laplace, que representa la planta (tanque) para que el sistema reconozca en tiempo real el funcionamiento de la planta automatizado de llenado de botellas en realidad virtual, se requiere obtenerla en tiempo discreto para poderla implementar en Unity 3D. Por otro lado, respecto a las investigaciones del estado del arte de la aplicación en sistemas digitales el método más recomendable es la transformada bilineal (método Tustín).

Aplicando el proceso de la transformada bilineal de la ecuación 8, donde se expresa Z^{-1} en el dominio complejo de S , y considerando un periodo menor de 0.05, a continuación, se muestra la sustitución en la ecuación (23), donde T representa el periodo de la función digital y Z la transformada en el dominio digital. Por su parte, se consideran a K_1 y K_2 como constantes del fluido y Q como la constante térmica, obteniendo la ecuación 25 en el dominio digital:

$$T(Z) = \frac{Q(Z)}{K_1 \left[\frac{2}{T} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \right] + K_2}$$

Ecuación 25. Función de la planta en el dominio de Z

Desarrollando la ecuación en el denominador, se obtiene la ecuación 26:

$$T(Z) = \frac{Q(Z)}{\frac{2K_1[1 - Z^{-1}] + TK_2[1 + Z^{-1}]}{T[1 + Z^{-1}]}}$$

Ecuación 26. Función factorizada en el dominio de Z

Multiplicando el denominador final con el primer numerador de la ecuación anterior, se obtiene la ecuación 27:

$$T(Z) = \frac{TQ(Z)[1 + Z^{-1}]}{2K_1[1 - Z^{-1}] + TK_2[1 + Z^{-1}]}$$

Ecuación 27. Relación del numerador y del denominador en el dominio de Z

Desarrollando las operaciones de multiplicación y suma en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación 28:

$$T(Z) = \frac{TQ(Z) + TQ(Z)Z^{-1}}{2K_1 - 2K_1Z^{-1} + TK_2 + TK_2Z^{-1}}$$

Ecuación 28. Desarrollo de la multiplicación en el dominio de Z

Factorizando la ecuación 28 en el denominador respecto a Z , se obtiene la ecuación 29:

$$T(Z) = \frac{TQ(Z)Z^{-1} + TQ(Z)}{[TK_2 - 2K_1]Z^{-1} + [TK_2 + 2K_1]}$$

Ecuación 29. Desarrollo de la factorización en el dominio de Z

Despejando el denominador de la ecuación 29, se obtiene la ecuación 30:

$$T(Z)[[TK_2 - 2K_1]Z^{-1} + [TK_2 + 2K_1]] = TQ(Z)Z^{-1} + TQ(Z)$$

Ecuación 30. Despejando el denominador en el dominio de Z

Desarrollando las multiplicaciones correspondientes en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación 31:

$$[TK_2 - 2K_1]T(Z)Z^{-1} + T(Z)[TK_2 + 2K_1] = TQ(Z)Z^{-1} + TQ(Z)$$

Ecuación 31. Desarrollo de la multiplicación en el dominio de Z

Con la resolución de la ecuación 31, por el método de la bilineal, la transformamos en una ecuación discreta respecto a K , quedando la ecuación 32 de la siguiente forma:

$$[TK_2 - 2K_1]T(K - 1) + T(K)[TK_2 + 2K_1] = TQ(K - 1) + TQ(K)$$

Ecuación 32. Función discreta en el dominio de K

Despejando el primer término de la ecuación 32 en función de la temperatura actual, se obtiene la ecuación 33:

$$T(K)[TK_2 + 2K_1] = TQ(K - 1) + TQ(K) - [TK_2 - 2K_1]T(K - 1)$$

Ecuación 33. Función de la temperatura actual en el dominio de K

Despejando de la ecuación 33 el término que es constante, se obtiene la ecuación 34:

$$T(K) = \frac{TQ(K - 1)}{TK_2 + 2K_1} + \frac{TQ(K)}{TK_2 + 2K_1} - \frac{[TK_2 - 2K_1]T(K - 1)}{TK_2 + 2K_1}$$

Ecuación 34. Función de la temperatura en el dominio de K

Sustituyendo los términos que componen las constantes K_1 y K_2 en la ecuación 34, se obtiene la ecuación 35:

$$T(K) = \frac{TQ(K - 1)}{T\rho C_p F + 2VC_p\rho} + \frac{TQ(K)}{T\rho C_p F + 2VC_p\rho} - \frac{[T\rho C_p F - 2VC_p\rho]T(K - 1)}{T\rho C_p F + 2VC_p\rho}$$

Ecuación 35. Función discreta en el dominio de K

De acuerdo con lo anterior desarrollado, la ecuación 35 es la que se aplica en Unity 3D para establecer el sistema dinámico en forma digital de la planta (tanque).

De lo antes expuesto, es viable deducir la señal de control necesaria en el tiempo (flujo de calor) hacía controlar la temperatura de la composición en el tanque, tal como si se estuviera operando con un sistema automatizado real. No obstante, la ejecución de este sistema se forma fundamentalmente a través de código de programación. Asimismo, es preciso incluir dentro de la escena una representación visual para enriquecer la aplicación virtual con los componentes que se presentan en el anexo A, y cuyo costo se presenta en forma general en el anexo B.

En la figura 13 se muestra un tanque de mezclado y calentamiento completamente proporcionado. Se observa uno de los tubos de acceso, el tubo de salida, las aspás del mezclador y el calentador en la parte interior del depósito, así como el motor del mezclador y el sensor de temperatura en la parte superior del depósito, y los sensores de nivel. La fábrica embotelladora no únicamente cuenta con el proceso de mezclado y calentamiento, e incorpora una serie de dispositivos (sensores y actuadores) que admiten que se logre automatizar todo el proceso.

A continuación, se mencionan los sensores de nivel en los depósitos y el sensor de presencia cuando da inicio la operación de llenado dividiendo las botellas en grupos de 4 (figura 13). Posteriormente, se muestran los actuadores, que son: las electroválvulas que admiten el flujo a través de las tuberías de los depósitos, el motor que mueve la banda transportadora y el actuador neumático que asegura las botellas durante el proceso de llenado (figura 14).

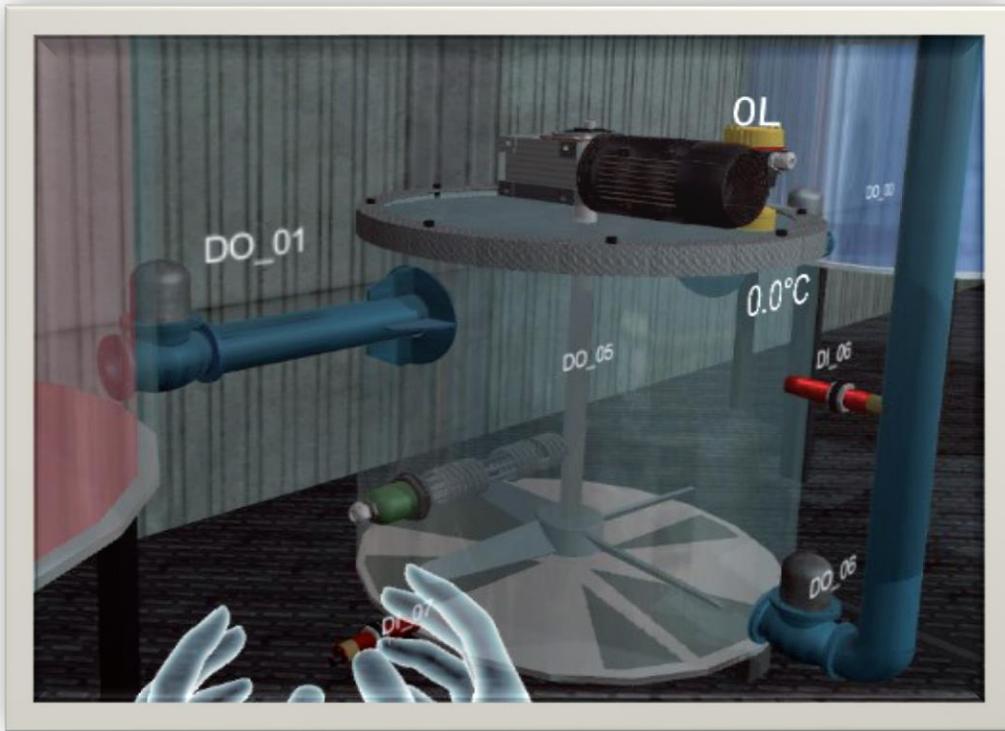


Figura 13. Presentación del sistema dinámico (tanque de mezclado y calentamiento)
Elaboración propia

A diferencia del depósito de mezclado y calentamiento, los dispositivos mencionados muestran un comportamiento considerablemente más simple de modelar, ya que su estado en el tiempo depende de una variable booleana (on/off).

Por ejemplo, para el sensor de presencia, al principio del llenado se selecciona la opción 'trigger' del 'collider' del 'game object', que personifica al sensor en la escena; de modo que, cuando el 'collider' del sensor entra en contacto con el 'collider' de una botella, una variable booleana previamente determinada toma valor verdadero, lo que admite el conteo de cuatro botellas que consecutivamente son llenadas.

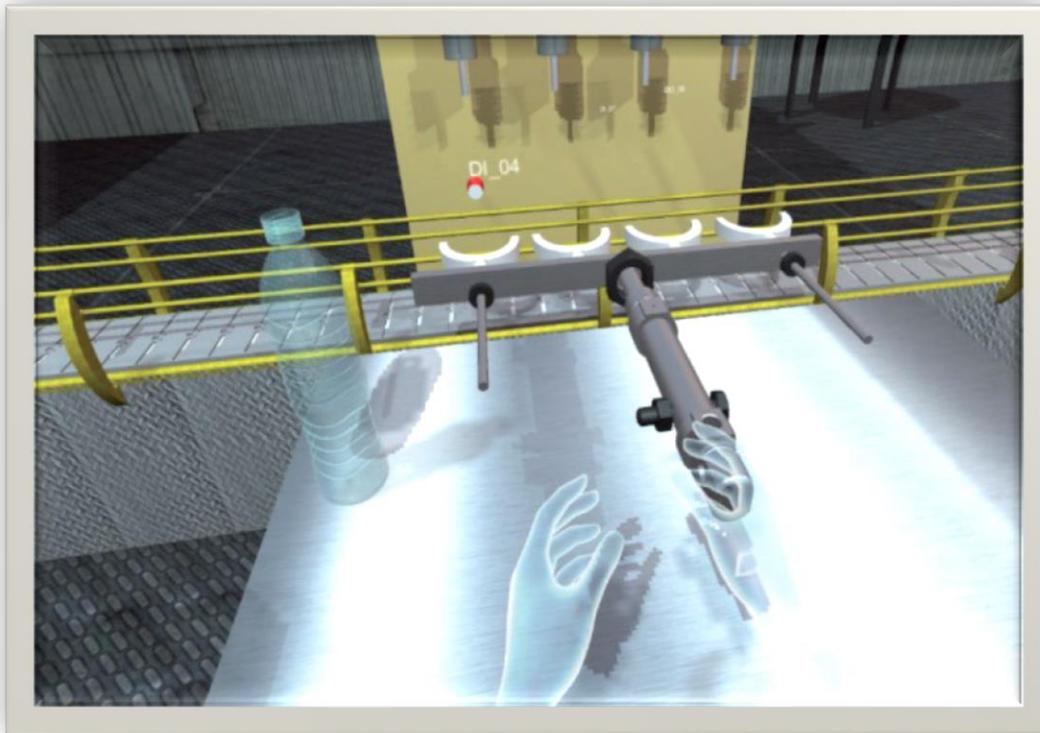


Figura 14. Banda transportadora y actuador neumático
Elaboración propia

3.6. DISEÑO ELÉCTRICO Y PLACA DE CIRCUITO IMPRESO

Las investigaciones previas que se realizaron en el estado del arte dieron la pauta para poder tener la posibilidad de vincular un PLC a un ambiente de realidad virtual. Sin embargo, de forma similar que otros investigadores del área, requerían de plantear e implementar la comunicación física y lógica según el tipo de PLC a manejar.

En este proyecto de investigación, se desarrolló una interfaz física general que admite conectar cualquier tipo de PLC con el escenario virtual de la planta automatizada. La interfaz propuesta (figura 15) agrega un "arduino mega", así como 16 relevadores y 16 opto acopladores para manipular las señales de ingresos y las señales de salidas digitales del PLC. Asimismo, son incorporados filtros RC

(resistivo-capacitivo y amplificadores operacionales) para trabajar con señales de entradas y salidas analógicas.

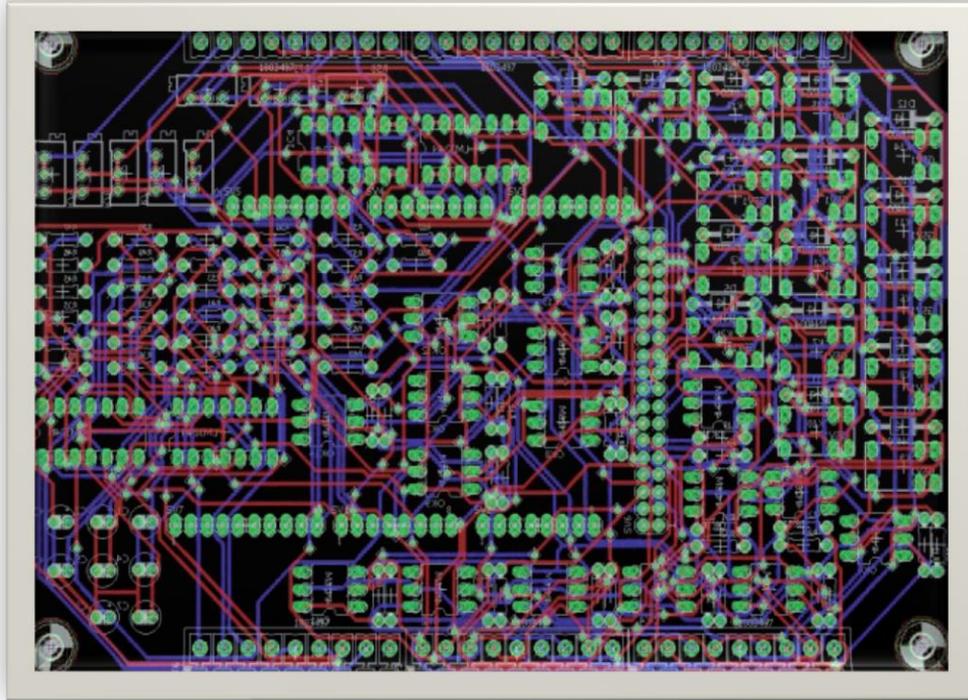


Figura 15. Diseño y trazado de la placa de circuito impreso
Elaboración propia

3.7. CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN

El proceso de comunicación implica tres subsistemas: el escenario virtual desarrollado, la interfaz física y el control industrial. Los pines de las señales de entradas y salidas analógicas o digitales del PLC deben ser distinguidas de forma opuesta por la aplicación virtual. Las salidas en control son percibidas como entradas para la aplicación virtual y viceversa, las entradas se contemplan como salidas de la aplicación virtual. Una situación semejante ocurre entre la interfaz física y el PLC y entre la aplicación virtual y la interfaz física.

Por su parte, el proceso virtual de llenado de botellas se controla a través del PLC compactlog 5370 L1 de la familia de Allen Bradley, el cual está programado con

el software RSLogix 500 (figura 16). En conclusión, en el PLC se manipulan: 12 salidas digitales para controlar las electroválvulas, el motor de la banda transportadora, los inyectores de llenado y otros actuadores; 14 entradas digitales para monitorear el nivel de los depósitos, el conteo de las botellas, entre otros; 1 salida analógica incorporada a la señal de control en el tiempo que va al calentador; y 1 entrada analógica asociada al registro en el tiempo encargado por el sensor de temperatura.

El escenario virtual es configurado para comunicarse con la interfaz física a través del puerto serial; desde el punto del PLC, los pines de las señales de las entradas digitales son recibidas a partir de la interfaz de control mediante la activación de relevadores. Por otra parte, las salidas digitales llegan a la interfaz física a través de optoacopladores, la cual deviene en la entrada analógica vía PWM (Pulse-Width Modulation). Consecutivamente, son transformadas las señales analógicas a través de filtros RC y amplificadas a los niveles reconocidos por el PLC mediante amplificadores operacionales. Las salidas analógicas del PLC pasan por amplificadores operacionales para acondicionarlas según las especificaciones de entrada de la interfaz física.

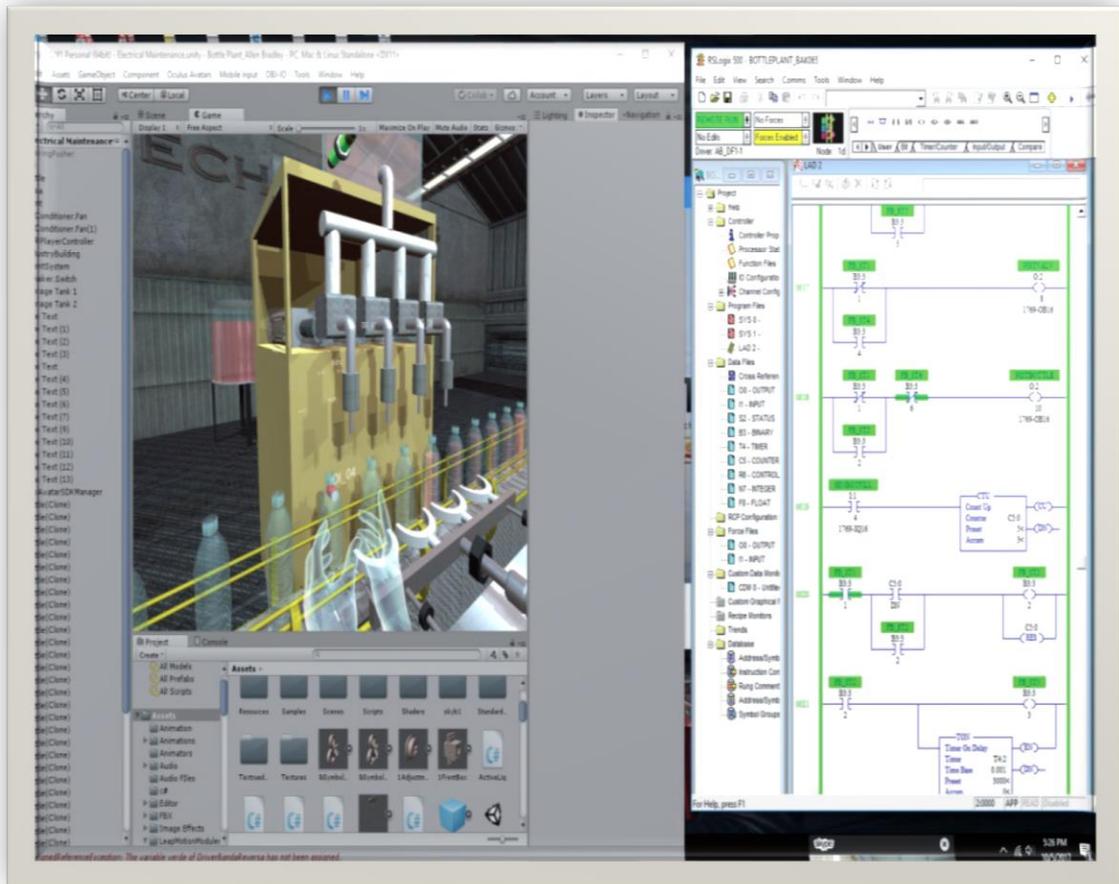


Figura 16. Perspectiva de la ejecución del programa de control en RS Logix 500.

Elaboración propia

4. RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados que se lograron en la investigación del proyecto; los experimentos están relacionados con la respuesta en tiempo discreto de la operación de la planta embotelladora. Primeramente, se llevó a cabo la determinación experimental de la función de transferencia con el software Minitab 2019. Después se realizó el análisis matemático para demostrar la factibilidad del proyecto en tiempo real con el software MATLAB R2015, etapa en la que fue prioritario obtener la respuesta en tiempo continuo con la función de transferencia obtenida de la planta. Posteriormente, se logró la respuesta en tiempo discreto aplicando la función de Tustín. Por último, se obtuvo la respuesta discretizada exportando los datos a Excel para comprobar el funcionamiento de la puesta en operación de la planta industrial automatizada, conectando el PLC físicamente con la realidad virtual para el entrenamiento.

4.1. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CON MINITAB 2019

4.1.1. Muestreo de una señal

Para poder saber que el procesamiento de la señal principal es la planta, se requiere de la reconstrucción de la señal en su forma digital, la utilizada en el sistema ciberfísico. El primer paso de la conversión de la señal analógica a digital es el muestreo, debido a que se trata de recuperar una señal que, de acuerdo con la teoría sobre el muestreo de señales desarrollada por H. Nyquist, conocida como teorema de muestreo, establece las condiciones de muestrear una señal sin pérdida de información. La primera condición para recuperar la señal original sin error, a partir de muestras tomadas en iguales intervalos de tiempo, es que el ancho de banda de la señal original debe ser limitado; mientras que la segunda condición define que, para una señal de ancho de banda limitado, el valor de la frecuencia de muestreo F_s (sampling frequency) debe ser mayor o igual que el doble de su ancho de banda, es decir $F_s \geq 2B$. Sin embargo, para el caso tratado en esta tesis,

la señal no es de banda limitada y se consideran frecuencias por encima de $F_s/2$, por lo que, según lo expresado anteriormente, se debe llevar a cabo un muestreo dirigido o intencional, y para este caso seleccionaremos la frecuencia de muestreo de la señal a 50 Hz.

4.1.2. Cuantificación de una señal

Para el proceso de conversión de la señal analógica a digital, se discretiza tanto el eje de tiempos en la fase de muestreo, como el eje de amplitud en la fase de cuantificación. Los pasos de cuantificación equivalen a la misma proporción de la señal y al mismo error de cuantificación. En cualquier caso, es evidente que la digitalización de amplitud implica una pérdida de información de cada valor analógico, que no tiene un valor digital equivalente que lo diferencia del resto, puesto que todos aquellos valores analógicos pertenecientes a un mismo intervalo o escalón se representarán por el mismo valor digital.

En relación con el número de bits que se representa la señal, siempre será deseable que sea el menor posible, aunque, como en el mundo digital trabaja con potencia de 2, la cuantificación con la que se trabaja es de 8 bits, siendo estos los bits de transmisión normalizados por el puerto serial o RS235.

Por tal motivo, para poder realizar un análisis de la señal bajo la consideración de la ecuación de transferencia obtenida para la planta, cuyo muestreo dirigido o intencional se efectúa aplicando una frecuencia de muestreo de 50 Hz, y ya que estas muestras tienen que ser equiespaciados, se tiene que considerar un muestreo periódico cada $T_s = 0.02$ seg. De esta manera, se obtienen para el caso de estudio 3999 valores que forman la muestra, sobre los cuales se desarrolla el análisis en el software Minitab versión 2019 para demostrar el comportamiento del sistema dinámico, logrando obtener los siguientes resultados.

Primeramente, para efectuar un buen análisis estadístico de las muestras obtenidas bajo el modelo matemático del sistema dinámico, se tiene que realizar la prueba de normalidad para demostrar la hipótesis propuesta.

En la estadística básica, se realiza la prueba de normalidad o de relaciones lineales para corroborar que los datos generados son paramétricos y siguen una distribución normal en la utilización de las mediciones continuas. Asimismo, se contempla la hipótesis nula $H_0: p \geq 0.5$ o hipótesis de investigación o alternativa $H_A: p < 0.5$ para determinar la hipótesis resultante. Los datos muestreados se someten al software Minitab 2019, y se obtiene la gráfica mostrada en la figura 17.

Como se puede observar en la figura 17, el valor en prueba de normalidad o probabilística es de $p < 0.5$, que representa una distribución no lineal, por lo que se descarta la hipótesis nula para esta investigación. Para la aplicación de las muestras dirigidas denominadas no probabilísticas (debido al procedimiento de selección orientado por las características de la investigación, más que por un criterio estadístico de generalización), se consideró el análisis estadístico no paramétrico para comprobar la hipótesis alternativa o de investigación de la propuesta.

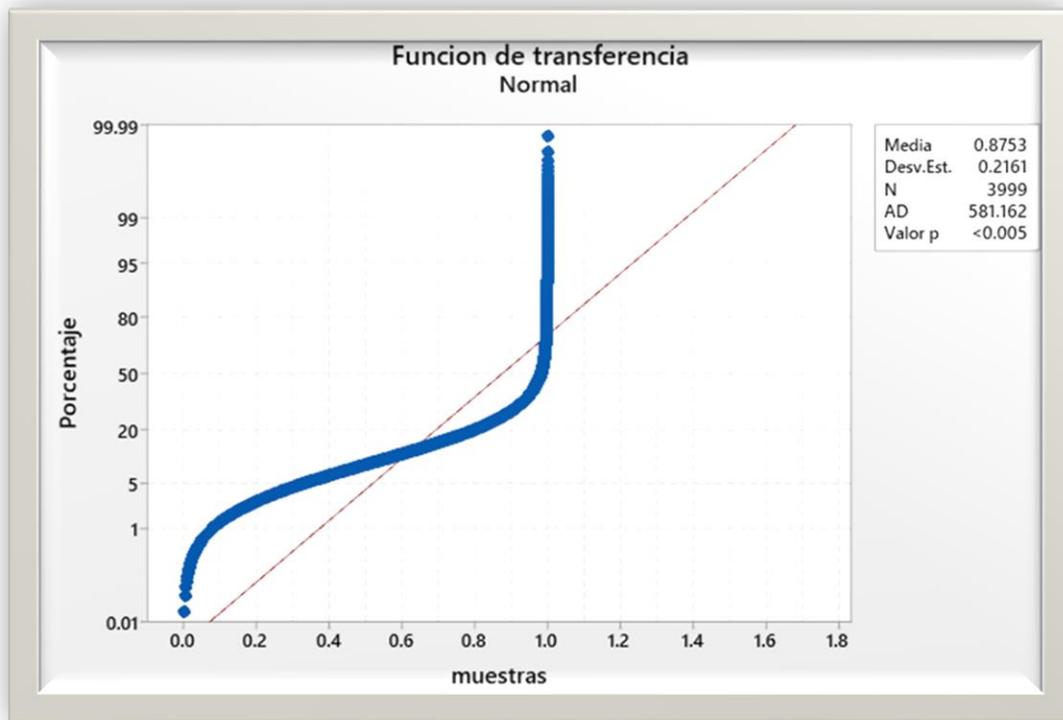


Figura 17. Prueba de normalidad en la función de transferencia.
Elaboración propia

Como segundo paso, se analizaron las muestras mediante el software Minitab, con el que se aplicó la herramienta estadística de calidad de parámetros no normales bajo el análisis de capacidad del proceso de muestra. Lo anterior determina que la salida del proceso satisface los requerimientos de la implementación de la función de transferencia, ya que sus datos no siguen una distribución normal y se obtiene una respuesta más consistente, como la mostrada en la figura 18.

Como se podrá observar en la figura 19, el muestreo de los datos para obtener la cuantificación del sistema propuesto es a partir de 0.90 al 1.00; la variación permanece constante o se normaliza, dando como resultado en el comportamiento del modelo matemático una respuesta estable. Mientras que del 0.00 al 0.90, la respuesta del sistema se comporta con una variación no lineal, y se representa la parte dinámica de la función de transferencia. Así, en la figura 20 se muestra la distribución normal a partir de 0.87.

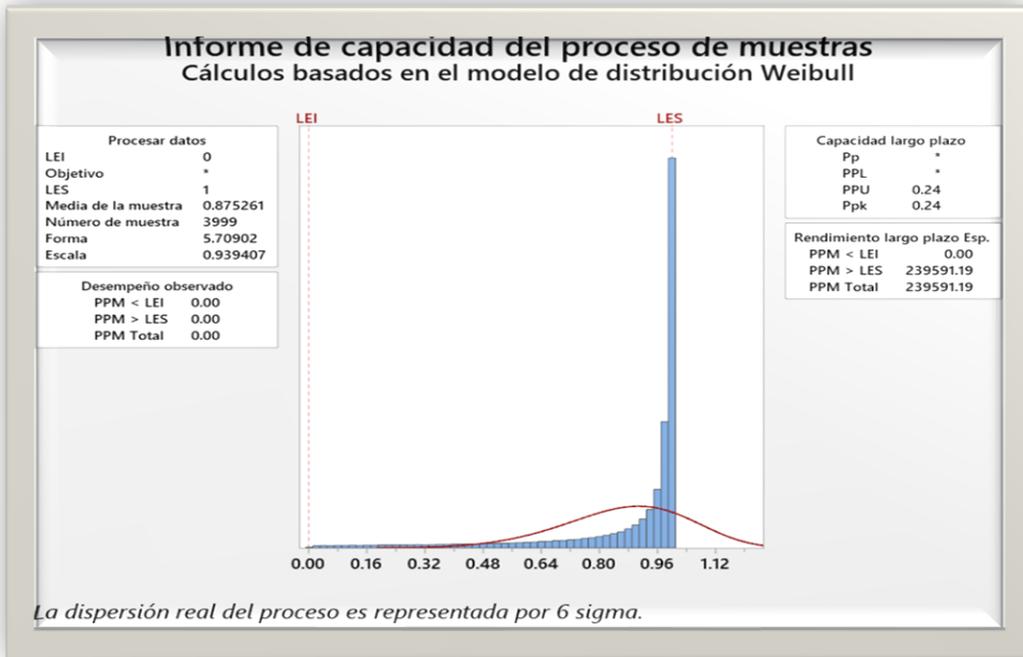


Figura 18. Prueba de no normalidad en la función de transferencia.

Elaboración propia

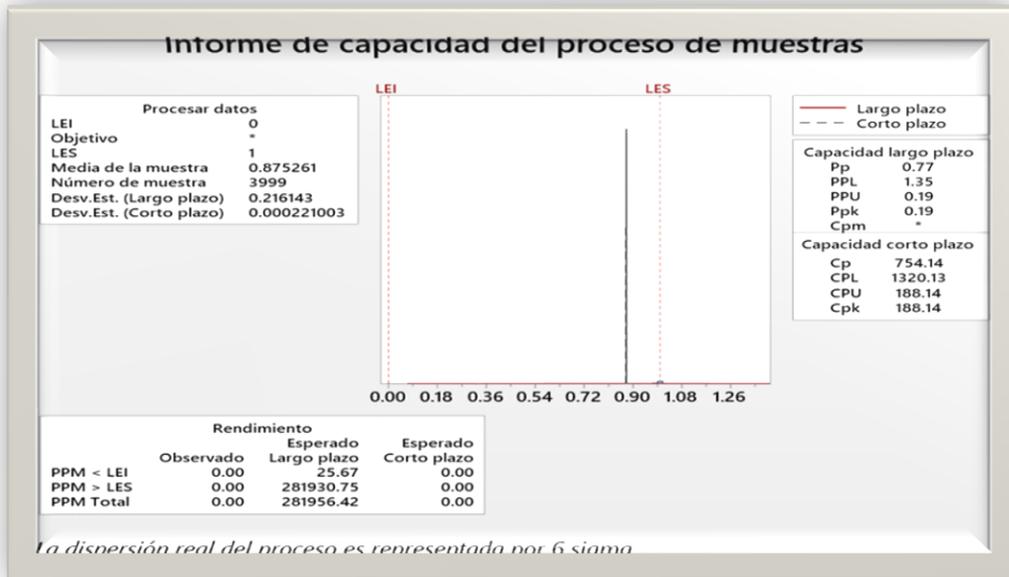


Figura 19. Distribución normal a partir de 0.85 de la función de transferencia.

Elaboración propia

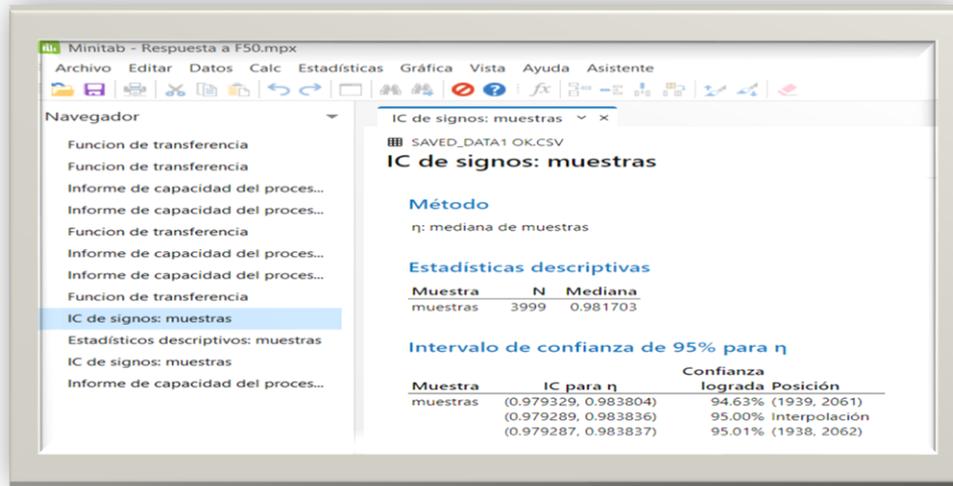


Figura 20. Nivel de confianza del 95% de la función de transferencia.

Elaboración propia

Con lo explicado y mostrado en las figuras anteriores, se logró comprobar que la hipótesis más convincente y adecuada para este trabajo es alternativa o de investigación $H_A: p < 0.5$, dando como resultado una función no lineal, la cual es un modelo matemático ajustado a datos del mundo real o que los describen; y es que, en sí, el principal objetivo es describir brevemente la manera de utilizar la tecnología para obtener un buen modelo matemático. De tal forma, y de acuerdo con lo representado en la figura 20, se afirma que el sistema dinámico obtenido en la función de transferencia de la planta automatizada embotelladora se valida por su nivel de confianza del 95%.

4.2. RESULTADO DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA APLICANDO MATLAB R2015

Como se podrá observar en el apartado 5 del capítulo III, se realizó el desarrollo de las ecuaciones matemáticas del sistema o planta, y para analizar el comportamiento de la planta en el sistema, se utilizó el software MATLAB R2015 con la función de transferencia, la cual se obtuvo del balance de energía con el sistema de ecuaciones y la transformada de Laplace, consiguiendo la respuesta en tiempo

continuo. Después, se obtuvo la respuesta de la misma ecuación de transferencia, pero discretizada con la función de Tustin que tiene MATLAB R2015, cumpliendo el primer objetivo planteado, que consiste en “caracterizar el modelo dinámico en tiempo discreto del sistema industrial a implementar, con el fin de discretizar el comportamiento dinámico del sistema físico embebido en ambiente” del laboratorio de realidad virtual para entrenamiento de programación de PLC's, el cual se muestra en la figura 21 abajo representada.

De igual manera, considerando el agua como líquido, tomando su densidad, peso específico, flujo másico y calor específico, se realizó la simulación nuevamente en MATLAB R2015 para ver cómo se comportaba el sistema de ecuaciones, aplicando el método de Tustin con un muestreo de 0.02 y obteniendo como resultado una similitud con la simulación que se representó en tiempo continuo. En la figura 22 se muestran los tiempos y la amplitud de la función para la planta.

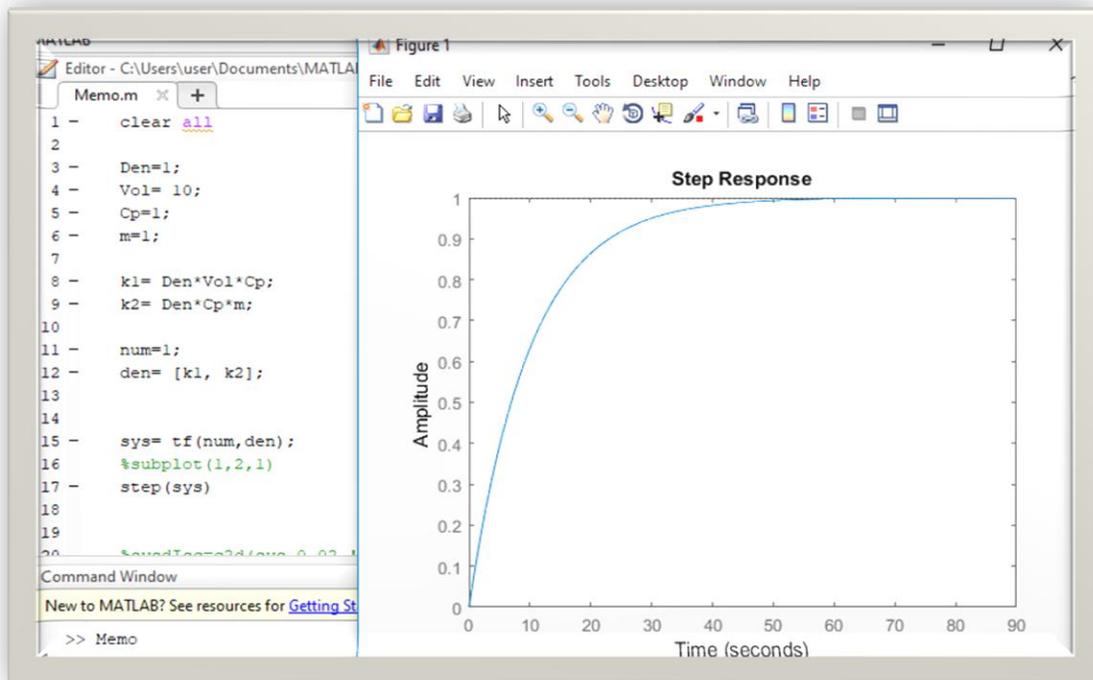


Figura 21. Representación de la planta en tiempo continuo

Elaboración propia

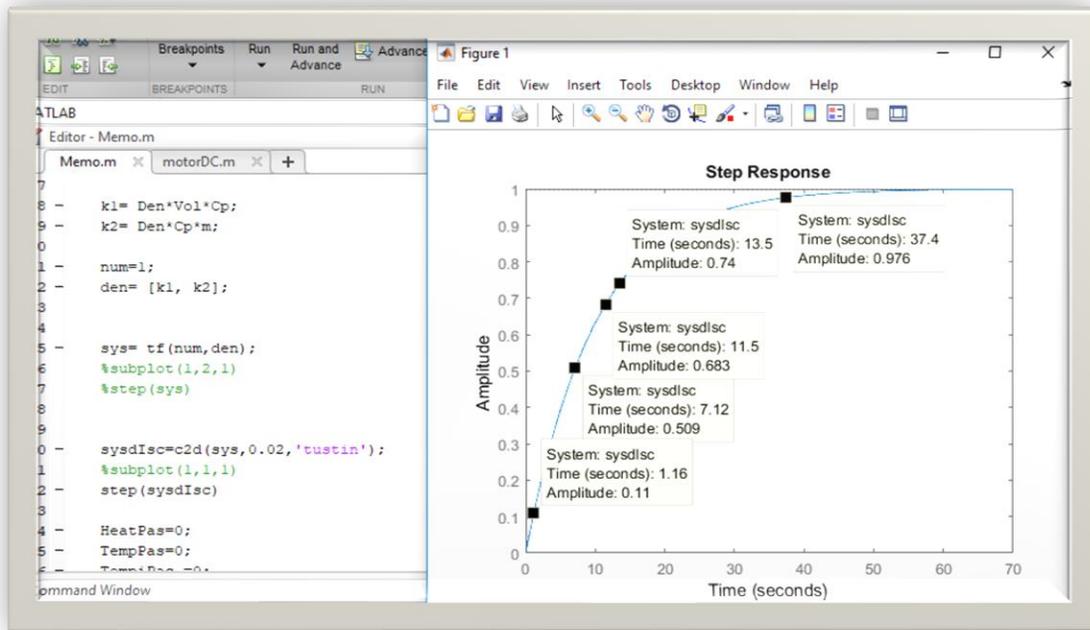


Figura 22. Gráfica de la planta usando la función de Tustín en MATLAB R2015

Elaboración propia

Para obtener los datos que realmente muestran el funcionamiento de la planta del laboratorio de realidad virtual, y demostrar así la implementación del PLC en tiempo real por medio de su conexión de las terminales de entrada y salidas digitales, la obtención de datos se realizó directamente de Unity 3D al poner en funcionamiento la planta. Desde Unity 3D se exportaron a Excel 3999 valores de la muestra resultante, aplicando un periodo de $T=0.02$, y lo obtenido de la gráfica se ejecutó en 180 segundo utilizando una laptop gamer de última generación (los datos se muestran al 20% en la figura 23). De igual forma se logró la gráfica de la figura 24, con el 63% de los datos muestreados, mientras que para la gráfica de la figura 25 se muestra el 90% de datos muestreados; por último, en la gráfica de la figura 26 se muestra el 100% de los datos muestreados en la planta. De esta manera se cumplió el segundo objetivo del presente trabajo, que plantea "implementar el modelo dinámico en un ambiente de realidad virtual", teniendo como prueba los datos muestreados directamente de Unity 3D a Excel para la obtención de la graficas mostradas.

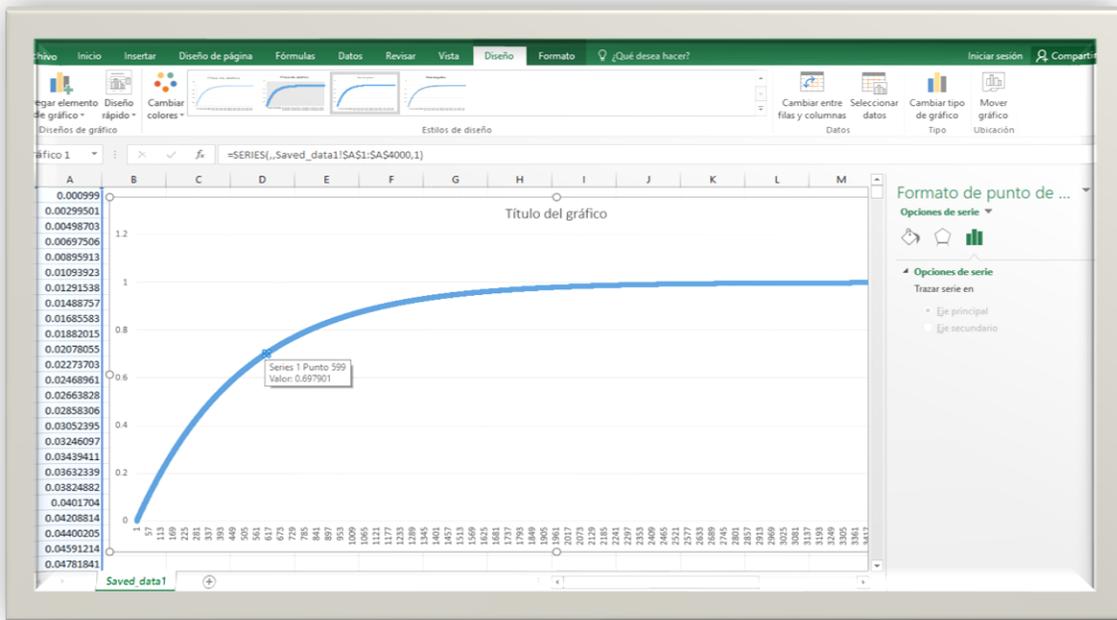


Figura 23. Representación del 20% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel
Elaboración propia

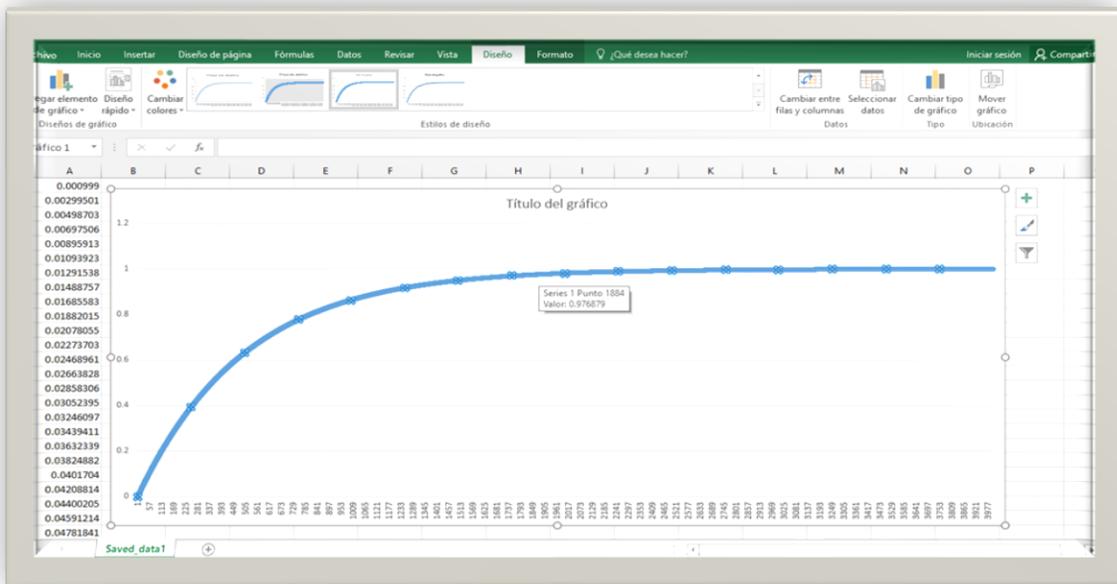


Figura 24. Representación del 63% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.
Elaboración propia

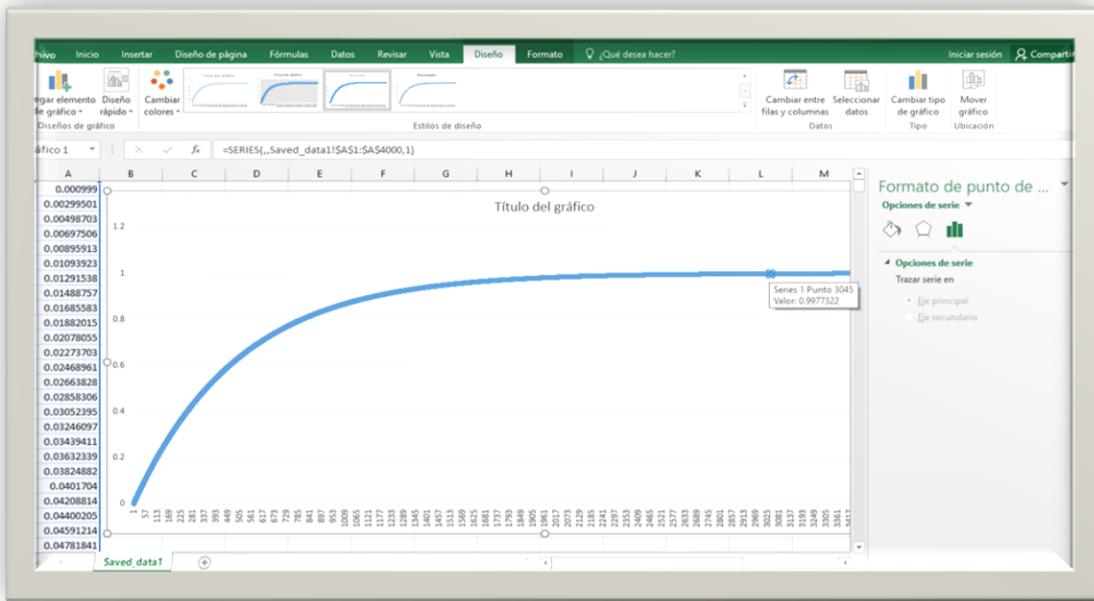


Figura 25. Representación del 90% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.
Elaboración propia

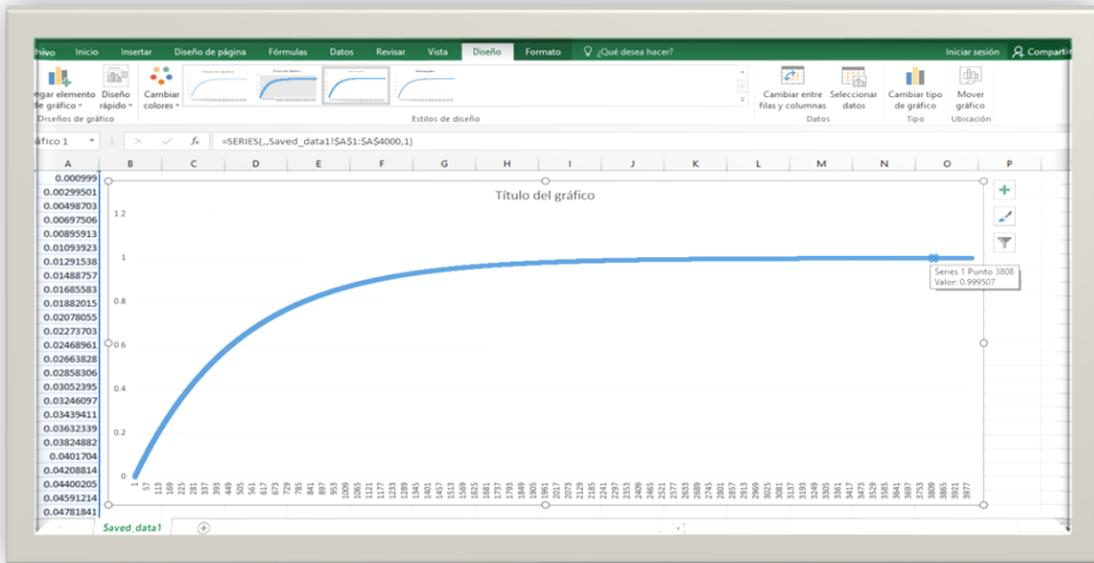


Figura 26. Representación del 100% de datos muestreados de la planta exportados de Unity 3D a Excel.
Elaboración propia

Para desarrollar equivalencias, se tuvieron los datos al 100% de los valores muestreados. En la gráfica de la figura 26 está representado el 100% en 3815 valores de la muestra.

Por su parte, la figura 27 ilustra el comportamiento de la planta en tiempo continuo, representando los tiempos al 20%, 63%, 90% y 100%, para realizar el comparativo con la función discreta de la planta, y así poder determinar si la ecuación de la planta es semejante a la de tiempo continuo por medio del error cuadrático utilizando la ecuación 36:

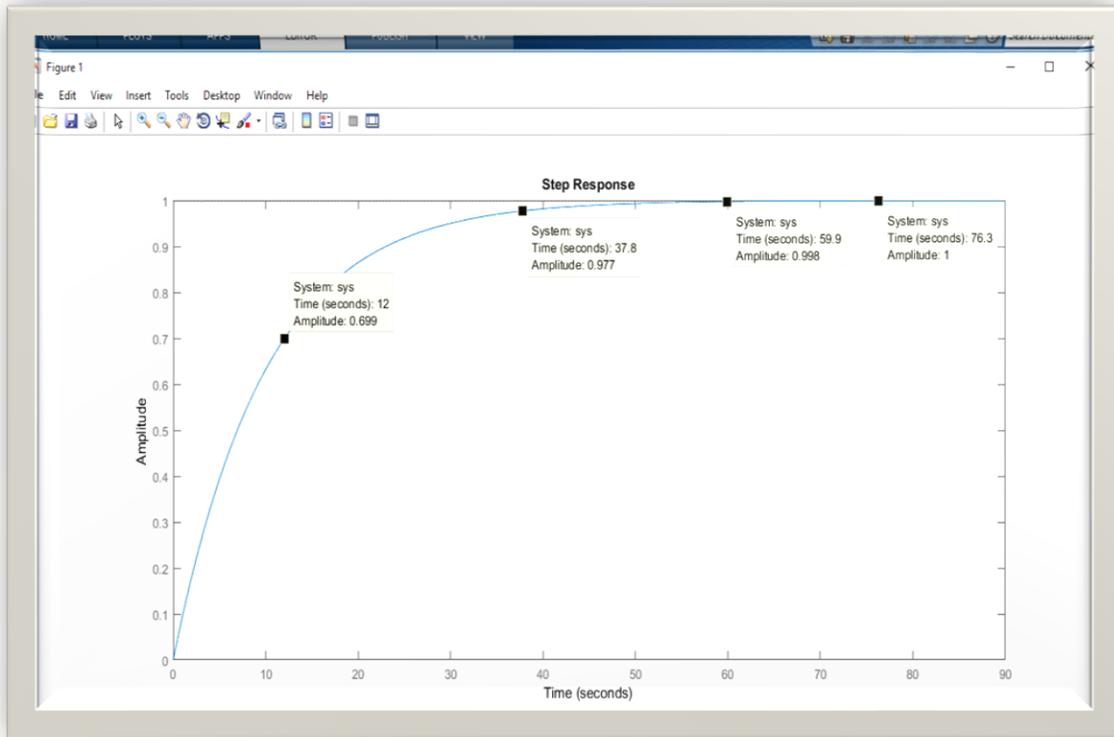


Figura 27. Representación de la planta al 20%, 63%, 90% y 100% en tiempo continuo

Elaboración propia

$$Er = \frac{\text{periodo en tiempo continuo} - \text{Muestras en tiempo discreto}}{\text{periodo en tiempo continuo}} * 100$$

Ecuación 36. Error relativo

Realizando el comparativo de los valores en tiempo continuo y los del periodo muestreado obtenidos en las gráficas antes señaladas, aplicando la ecuación 36 sobre el error relativo en los porcentajes donde se obtuvieron las diferencias, tenemos:

$$Er_{20\%} = \left[\frac{0.699 - 0.6989003}{0.699} \right] * 100 = 0.014263$$

Ecuación 36. Error relativo al 20%

$$Er_{63\%} = \left[\frac{0.977 - 0.976879}{0.977} \right] * 100 = 0.0123$$

Ecuación 36. Error relativo al 63%

$$Er_{90\%} = \left[\frac{0.998 - 0.99770378}{0.998} \right] * 100 = 0.02968$$

Ecuación 36. Error relativo al 90%

$$Er_{100\%} = \left[\frac{1 - 0.999507}{1} \right] * 100 = 0.0493$$

Ecuación 36. Error relativo al 100%

Como se podrá observar al calcular las diferencias entre la señal analógica y la señal discreta obtenida a través de los datos exportados de Unity 3D a Excel, teniendo como resultado los porcentajes arriba mostrados en el orden de las centésimas, este procedimiento permite que el sistema se adapte a la realidad, así como conectar el escenario industrial de realidad virtual al PLC, para procesar las señales con la puesta en operación de la planta automatizada de llenado de botellas en tiempo real. Según Rosengaus (1998), citado por Sánchez et al., 2004, los laboratorios que trabajan con procesamiento de señales permiten un máximo error relativo de 0.25%. Así, de acuerdo con los datos obtenidos, se demuestra que el sistema virtual se adapta a la realidad; por lo tanto, el controlador industrial PLC opera en tiempo real controlando toda la maquinaria que se encuentre en los escenarios de realidad virtual.

Tales resultados demuestran la hipótesis del trabajo de investigación que sostiene que “mediante el desarrollo de un modelo de sistemas dinámicos en escenarios de

realidad virtual, es posible la implementación de un control industrial de señales reales con PLC".

4.3. RESULTADO DEL LABORATORIO DE REALIDAD VIRTUAL PARA LA PROGRAMACIÓN DEL PLC's

Después de haber obtenido el resultado favorable para demostrar la hipótesis del trabajo de investigación de la presente tesis doctoral, también se logró la implementación de dos tipos de entrenamiento. El primero consiste en que el alumno o persona a capacitar realice la programación del PLC en forma física, de acuerdo con lo que requiere el proceso de la planta, que para este caso es la puesta en operación de la máquina automatizada de llenado de botellas; mientras que el segundo entrenamiento la persona trata de sumergirse en la planta de realidad virtual mediante un equipo especializado conocido como 'oculos rift' (casco de realidad virtual).

Para el entrenamiento de programar el PLC, se tomó la secuencia de llenado del tanque 1, llenado del tanque 2, llenado del tanque 3, funcionamiento de la banda transportadora, se direcciona la válvula que alimentan a los cilindros de doble efecto para extraer el líquido, se activan los cilindros que se encuentran sobre la banda transportadora para tomar las botellas, se vuelve activar la válvula para llenar las botellas, que en este caso está diseñada para el llenado de cuatro botellas de manera simultánea. Posteriormente, se repite el proceso y la banda transportadora lleva las botellas llenas hacia el almacén.

A continuación, en las figuras 28 a, b, c, d se muestra la programación que se logró obtener en la secuencia de la puesta en operación de la fábrica automatizada:

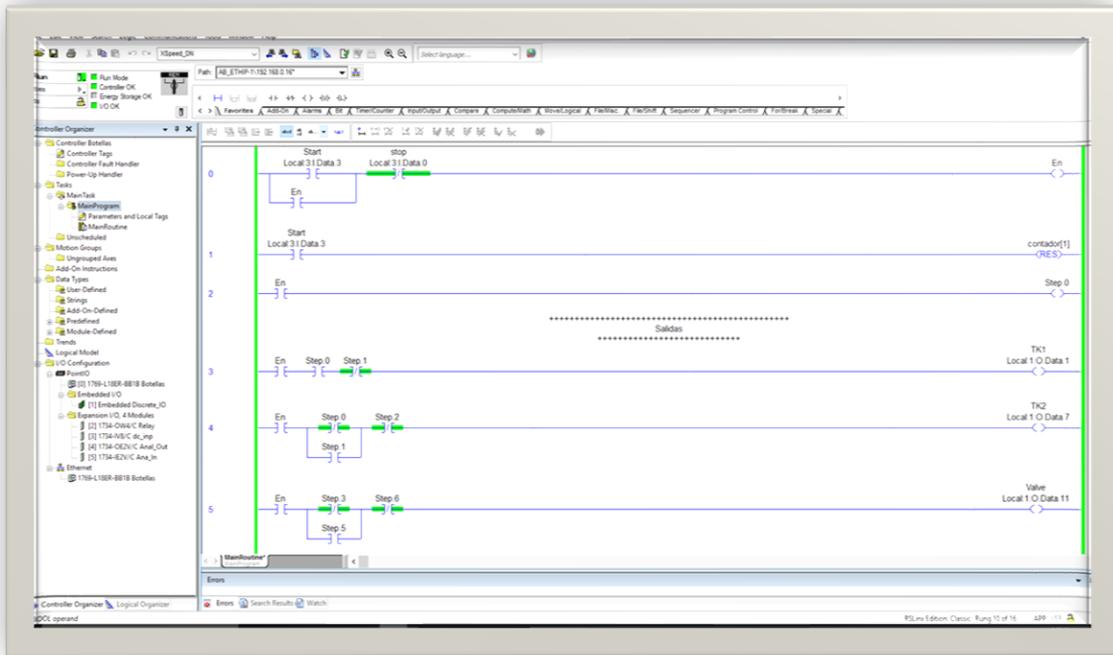


Figura 28 a) Inicio del diagrama de escalera de la operación de la fábrica.
Elaboración propia

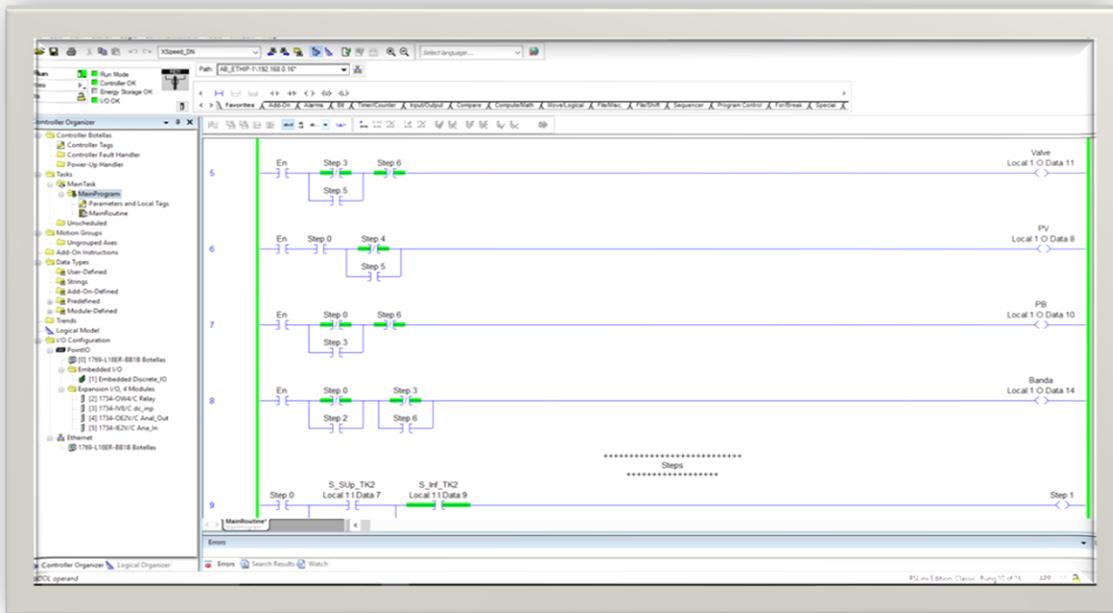


Figura 28 b) Secuencia del diagrama de escalera de la operación de la fábrica.
Elaboración propia

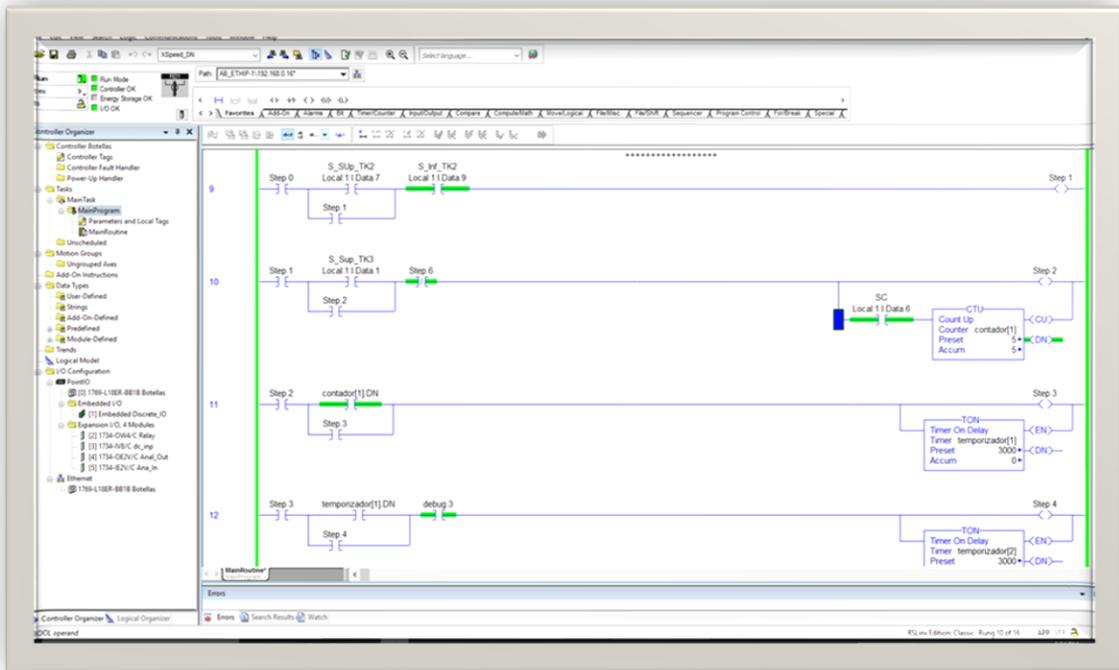


Figura 28 c) Contadores y temporizadores de la operación de la fábrica.

Elaboración propia

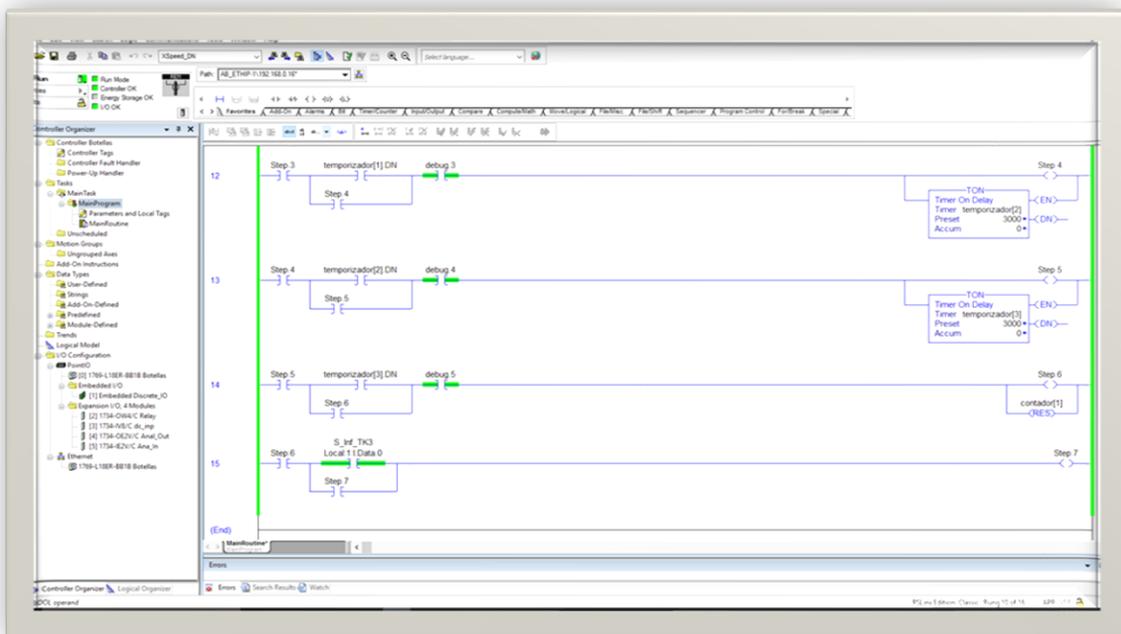


Figura 28 d) Final de la secuencia del programa del PLC de la operación de la fábrica.

Elaboración propia

Como se puede observar en las figuras de arriba, se programó en diagrama de escalera, forma que entiende un ingeniero cuando trabaja con este lenguaje. El programa se situó en línea en la operación del PLC, siendo este un Compact Logic 5370 L1 de la familia Allen Bradley, cuyas características se encuentran en el anexo A. Dicho PLC se presenta en la figura 29, evidencia del cumplimiento del tercer objetivo, el cual propone “desarrollar la programación del controlador lógico en lenguaje de escalera (Ladder) del PLC para manipular las características del ambiente virtual”.

De igual forma, se utilizó un módulo externo de botoneras que se conectaron directamente al PLC anteriormente mencionado, botones que, dependiendo su color, realizan una función concreta en la operación de la fábrica embotelladora automatizada del llenado de botellas. El botón de color verde la pone en marcha al activarlo, mientras que el botón de color rojo la pone en paro total al activarlo. El módulo mencionado de botoneras se muestra en la figura 30.

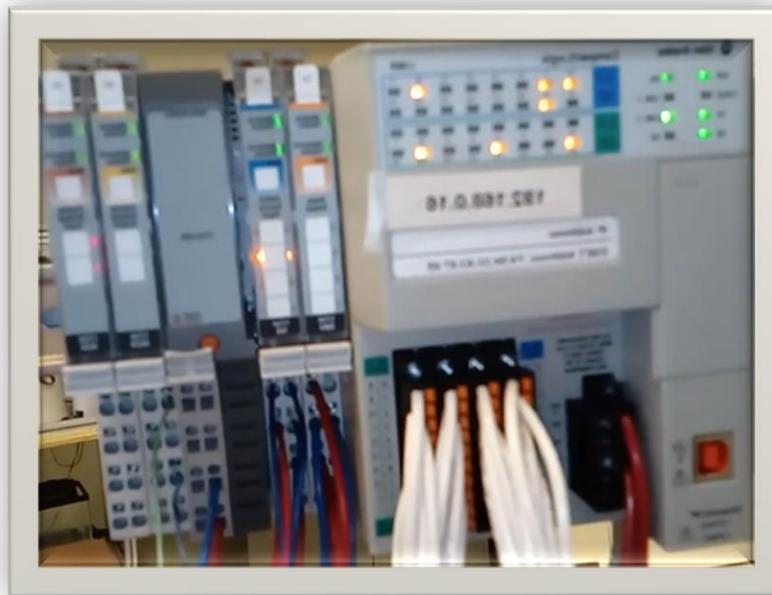


Figura 29. PLC Compact Logic 5370 L1 de Allen Bradley

Elaboración propia

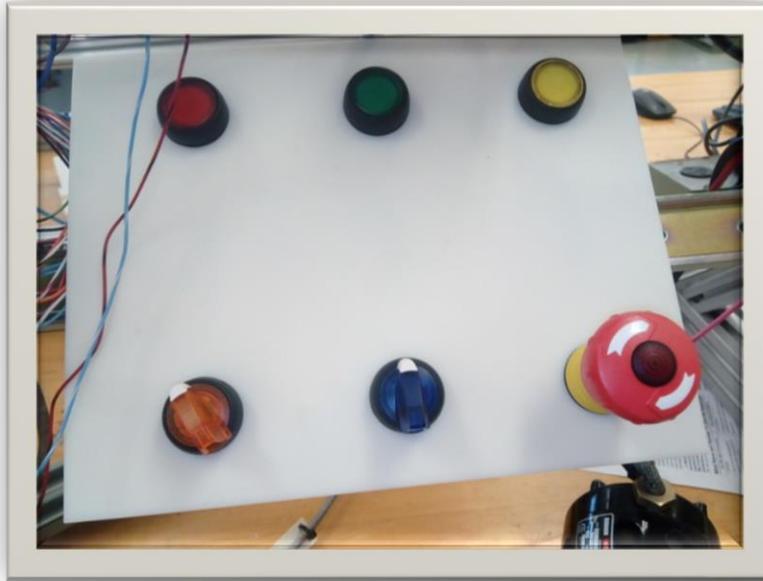


Figura 30. Módulo de botoneras
Elaboración propia

La segunda forma de entrenamiento es dentro de la planta misma, la cual es aplicada cuando el ingeniero de campo debe interactuar con los objetos que son parte de la escena, tales como el llenado de los tanques, la activación de los cilindros neumáticos, la válvula de llenado, los sensores capacitivos, la activación de la banda transportadora de las botellas, el llenado y almacenamiento de éstas, botones e interfaces, entre otros. De este modo, el ingeniero de campo se mueve a través de la planta en primera persona, ofreciendo al aprendiz la perspectiva de estar dentro de un ambiente industrial.

De esta manera, de acuerdo con los resultados obtenidos, se cumple la hipótesis que sostiene la viabilidad de la implementación de un control industrial de señales reales con PLC mediante el desarrollo de un modelo de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual, con lo cual se fortalecerá el proceso de formación en los ámbitos industrial y/o educativo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en sus diferentes apartados de la tesis doctoral, podemos decir que hay una gran diferencia por ejemplo con el trabajo de Gace et al., 2019 mostrado en la tabla 5, donde su artículo que lleva como nombre “Virtual Reality Serious Game Prototype for Presenting Military Units”, presenta un escenario virtual que permite a los cadetes familiarizarse mejor con una unidad militar específica antes de decidir en cuál inscribirse durante su estudio de ingeniería militar. Es totalmente virtual y se opera manualmente.

En cuanto al trabajo doctoral presentado que es un laboratorio virtual donde se combina un escenario virtual a nivel industrial con un modelo matemático aplicando los sistemas dinámicos, que es controlado de manera automatizada con la implementación de un control lógico programable en tiempo real, y además de poder supervisar la producción de forma manual en los escenarios virtuales de la planta automatizada.

CONCLUSIONES

La implementación del control industrial con señales reales, aplicando el PLC mediante el modelado de sistemas dinámicos en escenarios de realidad virtual, dio la pauta en el ITSSAT para demostrar que se pueden interconectar los escenarios virtuales con un control externo de tipo industrial como lo es el PLC, dependiendo siempre de las fronteras de las matemáticas aplicadas a dichos procesos. Asimismo, se demostró con ello la importancia del caso de estudio de la planta automatizada de llenado de botellas, por lo que con esta herramienta de enseñanza se podrán entrenar operadores de planta, ingenieros de campo y estudiantes en un ambiente virtual utilizando controladores reales. Esta última característica representa la posibilidad de ofrecer a los estudiantes la oportunidad de aprender a implementar rutinas de automatización en procesos complejos, con la certeza de que no se está comprometiendo la seguridad de las instalaciones ni la del personal involucrado.

Con base en la retroalimentación del sistema, el operador podrá visualizar los errores en el proceso cuando lo aplique, lo que ayudará a los usuarios a realizar cambios en los parámetros de forma que ellos puedan aprender de sus propios errores sin dañar ningún equipo físicamente.

Ante tales fines, se ostentó una metodología sistemática que contiene la consumación de la concepción de la puesta en operación virtual en la industria de la automatización. Dicha metodología se basó en el proceso de escenarios industriales a través de herramientas de factible disponibilidad, como los motores de videojuegos. Los escenarios desarrollados mediante este método son preparados para interactuar en tiempo real con el PLC de cualquier clase a través de la culminación de un protocolo de comunicación y una interfaz física, lo cual admite manipular una gran cantidad de señales de entrada y señales de salida, tanto analógicas como digitales.

De tal forma, se puede afirmar que, mediante esta metodología, es viable controlar un proceso virtual con dispositivos prácticamente de cualquier variedad (térmicos,

hidráulicos, neumáticos, eléctricos, mecánicos, entre otros) de igual forma que se instauraría en un proceso real, considerando características físicas del ambiente, de los sistemas a controlar (como señales eléctricas reales), los tipos de controladores (como el PLC), entre otras características.

Así, con este desarrollo especializado, se reducen los períodos de implementación de un proyecto de automatización y se mejora esencialmente el proceso de programación de los PLC; los experimentos se pueden formar inclusive cambiando los parámetros físicos involucrados para examinar la respuesta del controlador. Como se muestra para el tema de estudio expuesto en este trabajo, se consigue adaptar el controlador para cualquier prototipo de fluido que sea procesado, de acuerdo con estudios de este tipo de iniciativas no se restringen a la puesta en operación. Con esta ciencia aplicada, se logra fortalecer el proceso de instrucción para los ingenieros en automatización o de cualquier área afín a procesos industriales.

RECOMENDACIONES

Actualmente, la aplicación virtual está en desarrollo, y los trabajos futuros para este desarrollo tecnológico están orientados en tres direcciones: 1.- En cuanto al proceso de enseñanza-aprendizaje, se evaluará comparando el proceso de enseñanza-aprendizaje tradicional del alumno. 2.- Nuevos escenarios con procesos industriales más complejos serán diseñados, modelados y virtualizados para ofrecer un rango más completo de herramientas para el entrenamiento. 3.- Elaboración de temáticas relacionadas con incrementar la experiencia realista de los usuarios, no únicamente desde la perspectiva del desarrollo de mejores gráficos, contraste, audio, etcétera, sino también a través de la incorporación de nuevas tecnologías (tales como cascos de realidad virtual y lentes de realidad aumentada), lo cual constituyen opciones viables para proveer al usuario la sensación de estar completamente inmerso en el ambiente recreado.

Las aplicaciones de realidad virtual derivadas de la metodología propuesta son completamente confiables para aplicaciones con señales reales, por lo que un aspecto importante a desarrollar es la comunicación de este tipo de herramientas con otras de tipo industrial para procesos de productos terminal. A futuro, en el caso particular de dispositivos externos, valdría la pena invertir esfuerzos de investigación en implementar otra directriz de trabajo, que esté enfocada en aumentar la experiencia realista del usuario al momento de ejecutar simulaciones, por ejemplo, a través de nuevas técnicas como la realidad aumentada.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La aportación de la presente tesis a la contribución de la ciencia es la de haber logrado, desarrollado y validado un nuevo concepto innovador de un sistema híbrido que relaciona el uso de las tecnologías emergentes, como son la realidad virtual y un control industrial (PLC). Actualmente las causas de riesgo en la industria, tales como la seguridad, la rentabilidad y la formación de operadores especializados, son un proceso vital e imperecedero a nivel industrial. Hoy por hoy, vivimos la cuarta revolución industrial "Industria 4.0", en la que tecnologías emergentes (caso de la realidad virtual) que utilizan los sistemas ciberfísicos y la automatización industrial inteligente de un sistema de control deben ser fácilmente programables, flexibles, confiables, robustas y rentables. De esta manera, mediante el procesamiento de señales, se logra la implementación del control industrial PLC y el escenario virtual de una planta para ponerla en operación en tiempo real. El escenario virtual es construido con un modelo matemático, que brinda respuesta en tiempo discreto de un sistema dinámico aplicado en el sistema ciberfísico, logrando la incorporación del control de estos sistemas mediante el PLC con señales físicas para la formación en tiempo real. Para este trabajo de tesis, la aportación al conocimiento fue publicada en la revista de ingeniería DYNA (España), indexada al informe de citas de revistas científicas (JCR). La referencia bibliográfica del documento es: Reyes-Morales, G., Mudiki, S., Salinas, A., Ortega-Moddy, J.A., Sánchez-Alonso, R. E. & Samudio, A. E. (2019). Puesta en marcha virtual de la automatización de una planta industrial. Revista DYNA, 94(1), 42-45.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

La aportación social de la presente tesis consiste en la aplicación del conocimiento de las fronteras de las matemáticas bajo modelos matemáticos de sistemas dinámicos enfocados en la ingeniería, específicamente en el desarrollo del conocimiento íntegro en la educación de los alumnos de nivel superior. Lo anterior posibilita que las instituciones que no cuentan con equipo o maquinaria industrial puedan aplicar sus conocimientos en los laboratorios virtuales, llevando estos conocimientos a millones de alumnos universitarios de México. De esta forma, se les brinda un mejor proceso de adquisición del conocimiento, convirtiéndolos en profesionales aptos para realizar prácticas de alto nivel en ingeniería al operar en un ambiente real maquinarias en las industrias, y volviéndolos capaces de encarar la resolución de problemas actuales que atañen a microempresas y gran escala a nuestra sociedad.

REFERENCIAS

- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., & O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Adamson, G., Wang, L., & Moore, P. (2017). Feature-based control and information framework for adaptive and distributed manufacturing in cyber physical systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.12.003>
- Aguilar-Lazcano, C. A., Rechy-Ramírez, E. J., Hu, H., Ríos-Figueroa, H. V., & Marín-Hernández, A. (2019). Interaction Modalities Used on Serious Games for Upper Limb Rehabilitation: A Systematic Review. *Games for Health Journal*, 8(5), 313–325. <https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0129>
- Ahrens, M., Richter, C., Hehenberger, P., & Reinhart, G. (2019). Novel approach to establish model-based development and virtual commissioning in practice. *Engineering with Computers*, 35(3), 741–754. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0622-6>
- Ajwad, Syed A., Asim, N., Islam, R. U., & Iqbal, J. (2017). Role and review of educational robotic platforms in preparing engineers for industry. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 11(February), 17–34.
- Ajwad, Syed Ali, Islam, M. R. U., & Iqbal, J. (2017). Exploring the Training Potential of Recent Virtual Robotic Platforms: A Comprehensive Review. *Journal of Advancements in Robotics*, 4(2), 9–25.
- Al-antari, M. A., & Kim, T. S. (2020). Evaluation of deep learning detection and classification towards computer-aided diagnosis of breast lesions in digital X-ray mammograms. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 196, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105584>
- Al-Dhaifallah, M., Kanagaraj, N., & Nisar, K. S. (2018). Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Fractional Model of Pneumatic Pressure System. *Mathematical Problems in Engineering*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/5478781>
- Albalawi, F., Durand, H., & Christofides, P. D. (2018). Process operational safety via model predictive control: Recent results and future research directions. *Computers and Chemical Engineering*, 114, 171–190. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.006>
- Alda, R., Boholano, H., & Dayagbil, F. (2020). Teacher education institutions in the philippines towards education 4.0. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 19(8), 137–154. <https://doi.org/10.26803/ijlter.19.8.8>
- Alfaro, L., Rivera, C., Luna-Urquizo, J., Alfaro, S., & Fialho, F. (2019). Virtual reality full immersion techniques for enhancing workers performance, 20 years Later: A review and a reformulation. *International Journal of Advanced Computer*

- Science and Applications*, 10(10), 500–510.
<https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101066>
- Almeida, F., & Simoes, J. (2019). The role of serious games, gamification and industry 4.0 tools in the education 4.0 paradigm. *Contemporary Educational Technology*, 10(2), 120–136. <https://doi.org/10.30935/cet.554469>
- Alphonsus, E. R., & Abdullah, M. O. (2016). A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60(July 2016), 1185–1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- Alves, T., & Morris, T. (2018). OpenPLC: An IEC 61,131–3 compliant open source industrial controller for cyber security research. *Computers and Security*, 78(February), 364–379. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.07.007>
- Antony, A. P., & Varghese, E. (2016). Comparison of performance indices of PID controller with different tuning methods. *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2016*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2016.7530307>
- Atmojo, U. D., & Vyatkin, V. (2018). A Review on Programming Approaches for Dynamic Industrial Cyber Physical Systems. *Proceedings - IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2018*, 713–718. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471945>
- Azman, A. A., Rahiman, M. H. F., Mohammad, N. N., Marzaki, M. H., Taib, M. N., & Ali, M. F. (2017). Modeling and comparative study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) tuning method for Multi-tube aluminum sulphate water filter (MTAS). *Proceedings - 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2017, 2017-Decem*(October), 25–30. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2017.8239027>
- Barbieri, G., & Fantuzzi, C. (2016). Design of cyber-physical systems: Definition and metamodel for reusable resources. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733733>
- Bataev, A. V., & Aleksandrova, A. (2020). Digitalization of the World Economy: Performance Evaluation of Introducing Cyber-Physical Systems. *ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management*, 265–269. <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080378>
- Becerra, J., Peñaloza, M., Rodríguez, J., Chacón, G., Martínez, J., Saquipay, H., Castañeda, D., Pesantez, X., Salazar, J., Añez, R., & Bermúdez, V. (2019). La realidad virtual como herramienta en el proceso de aprendizaje del cerebro. *AVFT – Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 38(2).
- Benninghoff, H., Rems, F., Risse, E.-A., & Mietner, C. (2017). European Proximity Operations Simulator 2.0 (EPOS) - A Robotic-Based Rendezvous and Docking Simulator. *Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF*, 3. <https://doi.org/10.17815/jlsrf-3-155>

- Berg, L. P., & Vance, J. M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey. *Virtual Reality*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0293-9>
- Bikmukhametov, T., & Jäschke, J. (2020). First Principles and Machine Learning Virtual Flow Metering: A Literature Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184(March 2019), 106487. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106487>
- Birs, I., Folea, S., Prodan, O., Dulf, E., & Muresan, C. (2020). An experimental tuning approach of fractional order controllers in the frequency domain. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/app10072379>
- Bonci, A., Longhi, S., Lorenzoni, E., & Pirani, M. (2020). RMAS architecture for industrial agents in IEC 61499. *Procedia Manufacturing*, 42, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.026>
- Boranguiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A., Leitão, P., & Barata, J. (2019). Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. *Computers in Industry*, 108, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.006>
- Botero, M. L., Selmer, A., Watson, R., Bansal, M., & Kraft, M. (2016). Cambridge weblabs: A process control system using industrial standard SIMATIC PCS 7. *Education for Chemical Engineers*, 16, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2016.04.001>
- Bruguera, M. B., Ilk, V., Ruber, S., & Ewald, R. (2019). Use of Virtual Reality for astronaut training in future space missions - Spacecraft piloting for the Lunar Orbital Platform - Gateway (LOP-G). *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2019-October*(October), 1–10.
- Bührer, U. T., Legat, C., & Vogel-Heuser, B. (2015). Changeability of manufacturing automation systems using an orchestration engine for programmable logic controllers. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 1573–1579. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.310>
- Cañas Plaza, J. M., Martín Florido, A., Perdices García, E., Rivas Montero, F., & Calvo Palomino, R. (2018). Entorno Docente Universitario para la Programación de los Robots. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 15(4), 404–415. <https://doi.org/10.4995/riai.2018.8962>
- Cen, J., Liufu, R., Wen, S., Qiu, H., Liu, X., Chen, X., Yuan, H., Huang, M., & Zhuang, J. (2020). Three-Dimensional Printing, Virtual Reality and Mixed Reality for Pulmonary Atresia: Early Surgical Outcomes Evaluation. *Heart Lung and Circulation*, 30(2), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.hlc.2020.03.017>
- Checa, D., & Bustillo, A. (2020). A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. *Multimedia Tools and Applications*, 79(9–10), 5501–5527. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08348-9>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2017). Smart Factory of

- Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Chen, H. (2017). Theoretical Foundations for Cyber-Physical Systems: A Literature Review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 02(03), 1750013. <https://doi.org/10.1142/s2424862217500130>
- Chen, Y., Zulfiqar, A., Ma, D., Shi, Y., Chen, J., & Allgöwer, F. (2019). Simultaneous stabilization of discrete-time delay systems and bounds on delay margin. *Automatica*, 101, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.12.016>
- Ciocolanti, L., Tascioni, R., Pirro, M., & Arteconi, A. (2020). Development of a hardware-in-the-loop simulator for small-scale concentrated solar combined heat and power system. *Energy Conversion and Management: X*, 8(June), 100056. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100056>
- Coburn, J. Q., Freeman, I., & Salmon, J. L. (2017). A Review of the Capabilities of Current Low-Cost Virtual Reality Technology and Its Potential to Enhance the Design Process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(3), 1–15. <https://doi.org/10.1115/1.4036921>
- Contreras-Espinosa, R. S., Eguía-Gómez, J. L., & Albajes, L. S. (2016). Action research as a game design methodology for a serious game. *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 19(2), 71–90. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5944/ried.19.2.15624>
- Contreras, J. D., Cano, R., & García, J. (2018). Proposal of a Procedure for Automating an Industrial Process Using Petri Nets as a Formal Tool. *Revista Politécnica*, 14(26), 29–41. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a3>
- Cosenza, C., Niola, V., & Savino, S. (2018). A mechanical hand for prosthetic applications: multibody model and contact simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 232(8), 819–825. <https://doi.org/10.1177/0954411918787548>
- Cruz Salazar, L. A., Ryashentseva, D., Lüder, A., & Vogel-Heuser, B. (2019). Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 4035–4035. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03800-4>
- Czekster, R. M., Morisset, C., Clark, J. A., Soudjani, S., Patsios, C., & Davison, P. (2021). Systematic review of features for co-simulating security incidents in Cyber-Physical Systems. *Security and Privacy*, April 2020, 1–20. <https://doi.org/10.1002/spy2.150>
- Darvas, D., Blanco, E., & Molnár, S. V. (2019). PLCverif Re-engineered: An Open Platform for the Formal Analysis of PLC Programs. *17th Int. Conf. on Acc. and Large Exp. Physics Control Systems*, New York, NY, USA, 21–27. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2019-MOBPP01>
- Darvas, Dániel, Majzik, I., & Viñuela, E. B. (2017). PLC program translation for

- verification purposes. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 61(2), 151–165. <https://doi.org/10.3311/PPee.9743>
- De Backer, K., & DeStefano, T. (2021). Robotics and the Global Organisation of Production. In *Robotics, AI, and Humanity*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6>
- Delgado, D., Ružarovský, R., Holubek, R., & Velíšek, K. (2019). Into the early steps of Virtual Commissioning in Tecnomatix Plant Simulation using S7-PLCSIM Advanced and STEP 7 TIA Portal. *MATEC Web of Conferences*, 299. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929902005>
- Días, J., Vallhagen, J., Barbosa, J., & Leitao, P. (2017). Agent-based reconfiguration in a micro-flow production cell. *Proceedings - 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2017*, 1123–1128. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2017.8104931>
- Dingsøyr, T., Moe, N. B., & Seim, E. A. (2018). Coordinating Knowledge Work in Multiteam Programs: Findings From a Large-Scale Agile Development Program. *Project Management Journal*, 49(6), 64–77. <https://doi.org/10.1177/8756972818798980>
- Dulf, E. H. (2019). Simplified fractional order controller design algorithm. *Mathematics*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/MATH7121166>
- Eros, E., Dahl, M., Hanna, A., Albo, A., Falkman, P., & Bengtsson, K. (2019). Integrated virtual commissioning of a ROS2-based collaborative and intelligent automation system. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2019-Septe*, 407–413. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869444>
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Lovreglio, R., & Cabrera-Guerrero, G. (2018). Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. *Computers and Education*, 127, 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.002>
- Feng, Z., González, V. A., Trotter, M., Spearpoint, M., Thomas, J., Ellis, D., & Lovreglio, R. (2020). How people make decisions during earthquakes and post-earthquake evacuation: Using Verbal Protocol Analysis in Immersive Virtual Reality. *Safety Science*, 129(October 2019), 104837. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104837>
- Ferguson, C., van den Broek, E. L., & van Oostendorp, H. (2020). On the role of interaction mode and story structure in virtual reality serious games. *Computers and Education*, 143(August). <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103671>
- Fernández, I. A., Eguía, M. A., & Echeverría, L. E. (2019). Virtual commissioning of a robotic cell: An educational case study. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2019-Septe*, 820–825. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869373>
- Gace, I., Jaksic, L., Murati, I., Topolovac, I., Zilak, M., & Car, Z. (2019). Virtual reality

- serious game prototype for presenting military units. *ConTEL 2019 - 15th International Conference on Telecommunications, Proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ConTEL.2019.8848505>
- Gamino-Carranza, A., & Acosta-González, M. (2016). Modelo curricular del Tecnológico Nacional de México. *Revista Electrónica Educare*, 20(1), 1–25. <https://doi.org/10.15359/ree.20-1.10>
- Gamito, P., Oliveira, J., Coelho, C., Morais, D., Lópes, P., Pacheco, J., Brito, R., Soares, F., Santos, N., & Barata, A. F. (2015). Cognitive training on stroke patients via virtual reality-based serious games. *Disability and Rehabilitation*, 39(4), 385–388. <https://doi.org/10.3109/09638288.2014.934925>
- García, C. A., Castellanos, E. X., & García, M. V. (2018). UML-based cyber-physical production systems on low-cost devices under IEC-61499. *Machines*, 6(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/MACHINES6020022>
- García, M. V., Irisarri, E., Pérez, F., Estévez, E., & Marcos, M. (2017). An Open CPPS Automation Architecture based on IEC-61499 over OPC-UA for flexible manufacturing in Oil&Gas Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 1231–1238. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.347>
- Gavrilova, L., Kotik, A., Tsoy, T., Martínez-garcía, E. A., Svinin, M., & Magid, E. (2020). Facilitating a preparatory stage of real-world experiments in a humanoid robot assisted English language teaching using Gazebo simulator. *2020 IEEE 13th International Conference on Developments in ESystems Engineering (DeSE)*, 216–221.
- González-Mendívil, J. A., Rodríguez-Paz, M. X., & Reyes-Zárate, G. G. (2020). Virtual reality as a factor to improve productivity in learning processes. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1217 AISC(July), 762–768. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51828-8_101
- Graafland, M., & Schijven, M. (2018). *How Serious Games Will Improve Healthcare* (Issue February, pp. 139–157). https://doi.org/10.1007/978-3-319-61446-5_10
- Grángel-González, I., Baptista, P., Halilaj, L., Lohmann, S., Vidal, M. E., Mader, C., & Auer, S. (2017). The industry 4.0 standards landscape from a semantic integration perspective. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247584>
- Grodzki, J., Ortelt, T. R., & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0: Achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University. *Procedia Manufacturing*, 26, 1349–1360. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126>
- Gröhn, L., Metsälä, S., Nyholm, M., Saikko, L., Väänänen, E., Gulzar, K., & Vyatkin, V. (2017). Manufacturing System Upgrade with Wireless and Distributed Automation. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 1012–1018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.207>

- Guo, Y., Zhu, J., Wang, Y., Chai, J., Li, W., Fu, L., Xu, B., & Gong, Y. (2020). A Virtual Reality Simulation Method for Crowd Evacuation in a Multiexit Indoor Fire Environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120750>.
- H'mida, B., Sahbi, M., & Soudani, D. (2015). Discretizing of linear systems with time-delay Using method of Euler ' s and Tustin ' s approximations. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 5(3), 83–89.
- Hamouda, N., Babes, B., Hamouda, C., Kahla, S., Ellinger, T., & Petzoldt, J. (2020). Optimal tuning of fractional order proportional-integral-derivative controller for wire feeder system using ant colony optimization. *Journal Europeen Des Systemes Automatises*, 53(2), 157–166. <https://doi.org/10.18280/jesa.530201>.
- Hanna, A., Bengtsson, K., Dahl, M., Eros, E., Götvall, P. L., & Ekström, M. (2019). Industrial Challenges when Planning and Preparing Collaborative and Intelligent Automation Systems for Final Assembly Stations. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2019-Septe*, 400–406. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869014>.
- Hannachi, M., Bencheikh Ahmed, I., & Soudani, D. (2018). Internal model control of a paper machine headbox time-delay system with uncertain parameters in discrete-time. *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies, IC_ASET 2018*, 427–431. <https://doi.org/10.1109/ASET.2018.8379894>.
- Harrison, R., Vera, D., & Ahmad, B. (2016). Engineering Methods and Tools for Cyber-Physical Automation Systems. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 973–985. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2510665>.
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Aklı, I. (2019). Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33(15–16), 764–799. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>.
- Hernández-de-Menéndez, M., & Morales-Menéndez, R. (2019). Technological innovations and practices in engineering education: a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(2), 713–728. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00550-1>.
- Hernández-de-Menéndez, M., Vallejo Guevara, A., & Morales-Menéndez, R. (2019). Virtual reality laboratories: a review of experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(3), 947–966. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00558-7>.
- Hernández-de-Menéndez, M., Vallejo Guevara, A., Tudón Martínez, J. C., Hernández Alcántara, D., & Morales-Menéndez, R. (2019). Active learning in engineering education. A review of fundamentals, best practices and experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(3), 909–922. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00557-8>.
- Higueras, I., Ketcheson, D. I., & Kocsis, T. A. (2018). Optimal Monotonicity-Preserving

- Perturbations of a Given Runge–Kutta Method. *Journal of Scientific Computing*, 76(3), 1337–1369. <https://doi.org/10.1007/s10915-018-0664-3>.
- Hinterreiter, D., Prahofer, H., Linsbauer, L., Grunbacher, P., Reisinger, F., & Egyed, A. (2018). Feature-Oriented Evolution of Automation Software Systems in Industrial Software Ecosystems. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2018-Septe*, 107–114. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502557>.
- Hoedt, S., Claeys, A., Van Landeghem, H., & Cottyn, J. (2017). The evaluation of an elementary virtual training system for manual assembly. *International Journal of Production Research*, 55(24), 7496–7508. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1374572>.
- Ionescu, T. B. (2020). *Leveraging Graphical User Interface Automation for Generic Robot Programming*. 10(3), 232–239. <https://doi.org/10.3390/robotic10010003>.
- Ionescu, T. B., Fröhlich, J., & Lachenmayr, M. (2020). Improving Safeguards and Functionality in Industrial Collaborative Robot HMIs through GUI Automation. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2020-Septe(October)*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9211886>.
- İrsel, G., & Altınbalık, M. T. (2018). Adaptation of tilt adjustment and tracking force automation system on a laser-controlled land leveling machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150(April), 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.021>.
- Jakovljević, B., Lino, P., & Maione, G. (2021). Control of double-loop permanent magnet synchronous motor drives by optimized fractional and distributed-order PID controllers. *European Journal of Control*, 58, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.06.005>.
- Joseph, E., & Olaiya, O. O. (2017). Cohen-coon PID Tuning Method; A Better Option to Ziegler Nichols-PID Tuning Method. *International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD) Www.Ijrerd.Com | |*, 02(11), 141–145.
- Kamińska, D., Sapiński, T., Wiak, S., Tikk, T., Haamer, R. E., Avots, E., Helmi, A., Ozcinar, C., & Anbarjafari, G. (2019). Virtual reality and its applications in education: Survey. *Information (Switzerland)*, 10(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/info10100318>.
- Kampker, A., Wessel, S., Lutz, N., Reibetanz, M., & Hehl, M. (2020). Virtual Commissioning for Scalable Production Systems in the Automotive Industry: Model for evaluating benefit and effort of virtual commissioning. *ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management*, 107–111. <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080348>.
- Kanango, A., Mittal, M., & Dewan, L. (2019). GA and PSO Based Optimization for Benchmark Thermal System Using Wavelet-Based MRPID Controller. *Advances in Renewable Energy and Sustainable Environment*, 667, 385–395.

https://doi.org/10.1007/978-981-15-5313-4_36.

- Karnouskos, S., Leitao, P., Ribeiro, L., & Colombo, A. W. (2020). Industrial Agents as a Key Enabler for Realizing Industrial Cyber-Physical Systems: Multiagent Systems Entering Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(3), 18–32. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2962225>.
- Karnouskos, S., Ribeiro, L., Leitao, P., Luder, A., & Vogel-Heuser, B. (2019). Key directions for industrial agent based cyber-physical production systems. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems, ICPS 2019*, 17–22. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2019.8780360>.
- Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., & Plimmer, B. (2017). A Systematic Review of Virtual Reality in Education. *Themes in Science and Technology Education*, 10(2), 85–119.
- Khan, Z. A., Khan, M. T., Ul Haq, I., & Shah, K. (2019). Agent-based fault tolerant framework for manufacturing process automation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(3), 268–277. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571235>.
- Kulisz, J., Chmiel, M., Krzyzyk, A., & Rosół, M. (2015). A hardware implementation of arithmetic operations for an FPGA-based programmable logic controller. *IFAC-PapersOnLine*, 28(4), 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.078>.
- Lameras, P., Arnab, S., Dunwell, I., Stewart, C., Clarke, S., & Petridis, P. (2017). Essential features of serious games design in higher education: Linking learning attributes to game mechanics. *British Journal of Educational Technology*, 48(4), 972–994. <https://doi.org/10.1111/bjet.12467>.
- Lechler, T., Fischer, E., Metzner, M., Mayr, A., & Franke, J. (2019). Virtual commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP*, 81, 1125–1130. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.278>.
- Lei, Z., Hu, W., Zhou, H., & Zhang, W. (2018). Integrating a wireless power transfer system into online laboratory: Example with NCSLab. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 22, 278–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_26.
- Li, D., Wang, Y., Wang, J., Wang, C., & Duan, Y. (2020). Recent advances in sensor fault diagnosis: A review. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 309, 111990. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111990>.
- Li, L., Yu, F., Shi, D., Shi, J., Tian, Z., Yang, J., Wang, X., & Jiang, Q. (2017). Application of virtual reality technology in clinical medicine. *American Journal of Translational Research*, 9(9), 3867–3880.
- Liou, W. K., & Chang, C. Y. (2018). Virtual reality classroom applied to science education. *2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology, IT 2018*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SPIT.2018.8350861>.
- Liu, M., Zhang, L., Shi, P., & Zhao, Y. (2017). Sliding mode control of continuous-time Markovian jump systems with digital data transmission. *Automatica*, 80, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.02.002>.

- Liu, S., Qiu, Z. cheng, & Zhang, X. min. (2017). Singularity and path-planning with the working mode conversion of a 3-DOF 3-RRR planar parallel manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, 107(March 2016), 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.004>.
- Liu, X., Zhang, J., Hou, G., & Wang, Z. (2018). Virtual Reality and Its Application in Military. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/3/032155>.
- Liu, Z., Suchold, N., & Diedrich, C. (2012). Virtual Commissioning of Automated Systems. *Automation*. <https://doi.org/10.5772/45730>.
- Lyu, G., & Brennan, R. W. (2021). Towards IEC 61499-Based Distributed Intelligent Automation: A Literature Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2295–2306. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3016990>.
- Ma, Y., & Lu, C. (2018). Efficient Holistic Control over Industrial Wireless Sensor-Actuator Networks. *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet, ICII 2018, Icii*, 89–98. <https://doi.org/10.1109/ICII.2018.00018>.
- Mabkhot, M. M., Al-Ahmari, A. M., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. *Machines*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/MACHINES6020023>.
- Macías García, M. E., Cortés Pérez, A. A., & Izaguirre Alegría, A. R. (2020). Cyber-Physical Labs to enhance engineering training and education. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(4), 1253–1269. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00704-6>.
- Mahmood, K., & Ismail, N. A. (2020). Application of multibody simulation tool for dynamical analysis of tethered aerostat. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, S1018363920302981. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.005>.
- Marayong, P., Shankar, P., Wei, J., Nguyen, H., Strybel, T. Z., & Battiste, V. (2020). Urban Air Mobility System Testbed using CAVE Virtual Reality Environment. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172534>.
- Martín-Gutiérrez, J., Mora, C. E., Añorbe-Díaz, B., & González-Marrero, A. (2017). Virtual technologies trends in education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(2), 469–486. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00626a>.
- Ménard, A. D., & Trant, J. F. (2020). A review and critique of academic lab safety research. *Nature Chemistry*, 12(1), 17–25. <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0375-x>.
- Merdan, M., Hoebert, T., List, E., & Lepuschitz, W. (2019). Knowledge-based cyber-physical systems for assembly automation. *Production and Manufacturing Research*, 7(1), 223–254. <https://doi.org/10.1080/21693277.2019.1618746>.
- Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems:

- state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1927–1949. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>.
- Müller, R., Vette, M., & Geenen, A. (2017). Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.113>.
- Namekar, S. A., & Yadav, R. (2020). Programmable Logic Controller (PLC) and its Applications. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 4(3), 372–376.
- Nguyen, N. H., & Nguyen, P. D. (2018). Overshoot and settling time assignment with PID for first-order and second-order systems. *IET Control Theory and Applications*, 12(17), 2407–2416. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5076>.
- Nieto-Jalil, J. M., Rodríguez-Álvarez, E., Kawaminami-García, I. R., & Almaguer, S. P. (2020). Work in progress: Design and construction of physics laboratory equipment and an authentic evaluation system as a pedagogical tool in the integral training of engineering students. *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON, 2020-April*, 1471–1477. <https://doi.org/10.1109/EDUCON45650.2020.9125294>.
- Nolen, S. B., & Koretsky, M. D. (2018). Affordances of Virtual and Physical Laboratory Projects for Instructional Design: Impacts on Student Engagement. *IEEE Transactions on Education*, 61(3), 226–233. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2791445>.
- Novak, P., Kadera, P., & Wimmer, M. (2017). Agent-based modeling and simulation of hybrid cyber-physical systems. *2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics, CYBCONF 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/CYBConf.2017.7985755>.
- Nunes de Barros, F., Bhaskar, A., & Singh, R. (2017). A Validated Model for Design and Evaluation of Control Architectures for a Continuous Tablet Compaction Process. *Processes*, 5(4), 76. <https://doi.org/10.3390/pr5040076>.
- O'Donovan, P., Gallagher, C., Leahy, K., & O'Sullivan, D. T. J. (2019). A comparison of fog and cloud computing cyber-physical interfaces for Industry 4.0 real-time embedded machine learning engineering applications. *Computers in Industry*, 110, 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.016>.
- Ocker, F., Kovalenko, I., Barton, K., Tilbury, D., & Vogel-Heuser, B. (2019). A Framework for Automatic Initialization of Multi-Agent Production Systems Using Semantic Web Technologies. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 4330–4337. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2931825>
- Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna* (PEARSON (ed.); Quinta edi). Prentice Hall.
- Orduña, P., García-Zubia, J., Rodríguez-Gil, L., Angulo, I., Hernández-Jayo, U., Dziabenko, O., & López-de-Ipiña, D. (2018). The weblab-deusto remote laboratory management system architecture: Achieving scalability,

- interoperability, and federation of remote experimentation. *Cyber-Physical Laboratories in Engineering and Science Education*, 17–42. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76935-6_2.
- Orduña, P., Rodríguez-Gil, L., García-Zubia, J., Angulo, I., Hernández, U., & Azcuenaga, E. (2018). Increasing the value of remote laboratory federations through an open sharing platform: LabsLand. *Online Engineering & Internet of Things, Springer.*, 22, 859–873. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_80.
- Ortega-Moody, J.-A., Sánchez-Alonso, R.-E., Grisé, W. R., García-Malacara, J.-L., Vidaña-Morales, R.-Y., Reyes-Morales, G., & Guerrero-Hernández, V. (2017). Virtual laboratory of industrial scenarios for training in the areas of automation and control. *DYNA Ingeniería e Industria*, 92(3), 285–287. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/8051> 1.
- Ortega Moody, J. A., Sánchez Alonso, R. E., González Barbosa, J. J., & Reyes Morales, G. (2016). Virtual Laboratories for Training in Industrial Robotics. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 665–672. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7437208>.
- Paasivaara, M., Behm, B., Lassenius, C., & Hallikainen, M. (2018). Large-scale agile transformation at Ericsson: a case study. *Empirical Software Engineering*, 23(5), 2550–2596. <https://doi.org/10.1007/s10664-017-9555-8>.
- Pahl, M. O. (2017). The iLab Concept: Making Teaching Better, at Scale. *IEEE Communications Magazine*, 55(11), 178–185. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700394>.
- Pasqualetto Cassinis, L., Fonod, R., Gill, E., Ahrns, I., & Gil-Fernández, J. (2021). Evaluation of tightly- and loosely-coupled approaches in CNN-based pose estimation systems for uncooperative spacecraft. *Acta Astronautica*, 182(December 2020), 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.035>.
- Patle, D. S., Manca, D., Nazir, S., & Sharma, S. (2019). Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review. *Virtual Reality*, 23(3), 293–311. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0354-3>.
- Peake, I. D., & Blech, J. O. (2017). A Candidate Architecture for Cloud-Based Monitoring in Industrial Automation. *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion, QRS-C 2017*, 548–554. <https://doi.org/10.1109/QRS-C.2017.93>.
- Peña, C. J., Vargas, L., & Murcia, J. C. (2020). Approach to professional practice from simulators and virtual laboratories. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/844/1/012036>.
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S., & Hammadi, M. (2017). Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. *Computers in Industry*, 86, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>.
- Phan, M. H., & Ngo, H. Q. T. (2020). A multidisciplinary mechatronics program: From

- project-based learning to a community-based approach on an open platform. *Electronics (Switzerland)*, 9(6), 1–46. <https://doi.org/10.3390/electronics9060954>.
- Piechowski, S., Pustowalow, W., Arz, M., Rittweger, J., Mulder, E., Wolf, O. T., Johannes, B., & Jordan, J. (2020). Virtual reality as training aid for manual spacecraft docking. *Acta Astronautica*, 177(April), 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.017>.
- Pierrot, F., Reynaud, C., & Fournier, A. (1990). Delta: A simple and efficient parallel robot. *Robotica*, 8(2), 105–109. <https://doi.org/10.1017/S0263574700007669>.
- Pinho, C., Franco, M., & Mendes, L. (2018). Web portals as tools to support information management in higher education institutions: A systematic literature review. *International Journal of Information Management*, 41(March), 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.04.002>.
- Rahman, A. A. A., & Mohamad, N. R. (2016). Software-in-the-Loop technique: An approach to support reconfiguration of manufacturing system. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(16), 9789–9795.
- Rai, P., & Kumar, A. (2021). Review on PLC SCADA Based Automated System Control Applications and Challenges. *International Journal of Research and Development in Applied Science and Engineering*, 21(1).
- Rana, K., & Rana, K. (2020). ICT Integration in Teaching and Learning Activities in Higher Education: A Case Study of Nepal's Teacher Education. *Malaysian Online Journal of Educational Technology*, 8(1), 36–47. <https://doi.org/10.17220/mojet.2020.01.003>.
- Rehberger, S., Spreiter, L., & Vogel-Heuser, B. (2017). An agent-based approach for dependable planning of production sequences in automated production systems. *At-Automatisierungstechnik*, 65(11), 766–778. <https://doi.org/10.1515/auto-2017-0040>.
- Riansyah, M. I., Nugraha, Y. P., Ridlwan, H. M., & Trilaksono, B. R. (2017). 3D mapping hexacopter simulation using gazebo and robot operating system (ROS). *ACM International Conference Proceeding Series*, 507–510. <https://doi.org/10.1145/3055635.3056659>.
- Robles-Durazno, A., Moradpoor, N., McWhinnie, J., Russell, G., & Maneru-Marín, I. (2019). PLC memory attack detection and response in a clean water supply system. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.05.003>.
- Rodríguez Ibáñez, R. E. (2018). La realidad virtual en la migración de plataformas educativas de 2D a 3D en los escenarios de las Universidades de San José de Cúcuta. *Revista Perspectivas*, 3(2), 86–96. <https://doi.org/10.22463/25909215.1592>.
- Román-Ibáñez, V., Pujol-López, F. A., Mora-Mora, H., Pertegal-Felices, M. L., & Jimeno-Morenilla, A. (2018). A low-cost immersive virtual reality system for teaching robotic manipulators programming. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4),

- 1–13. <https://doi.org/10.3390/su10041102>.
- Romasevych, Y., Loveikin, V., & Usenko, S. (2019). Pi-controller tuning optimization via PSO-based technique. *Przeglad Elektrotechniczny*, *95*(7), 33–37. <https://doi.org/10.15199/48.2019.07.08>.
- Romero, M. L. A., Valbuena, Y., Velasco, A., & Solaque, L. (2017). Soft-actuated modular knee-rehabilitation device: Proof of concept. *ACM International Conference Proceeding Series*, 71–78. <https://doi.org/10.1145/3175587.3175593>.
- Sadiku, M. N. O., Wang, Y., Cui, S., & Musa, S. M. (2017). Cyber-Physical Systems: A Literature Review. *European Scientific Journal, ESJ*, *13*(36), 52–58. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p52>.
- Safeea, M., & Neto, P. (2018). Human-robot collision avoidance for industrial robots: A v-rep based solution. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, *7*, 301–309. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-301>.
- Salazar-Escoboza, M. A., Laborin-Álvarez, J. F., Álvarez-Chávez, C. R., Noriega-Orozco, L., & Borbón-Morales, C. (2020). Safety climate perceived by users of academic laboratories in higher education institutes. *Safety Science*, *121*(September 2019), 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.003>.
- Salmerón-Manzano, E., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). The higher education sustainability through virtual laboratories: The Spanish University as case of study. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su10114040>.
- Salunkhe, O., Gopalakrishnan, M., Skoogh, A., & Fasth-Berglund, Å. (2018). Cyber-Physical Production Testbed: Literature Review and Concept Development. *Procedia Manufacturing*, *25*, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.050>.
- Sánchez-Alonso, R. E., González-Barbosa, J. J., Castillo-Castañeda, E., & García-Murillo, M. A. (2016). Análisis Cinemático de un Novedoso Robot Paralelo Reconfigurable. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, *13*(2), 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.07.007>.
- Sánchez, L. P., Díaz De León, L., Yañez, C. M., & Herrera Charles, R. (2004). The Error's Quantification in the Measurements Due to Sampling Frequency. *Computación y Sistemas*, *8*(2), 86–105.
- Sayed, A., Azar, A., Ibrahim, Z., Ibrahim, H., Mohamed, N., & Ammar, H. (2020). Deep Learning Based Kinematic Modeling of 3-RRR Parallel Manipulator. In *Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 1153 AISC*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44289-7_29.
- Schulte, P. Z., & Spencer, D. A. (2020). State machine fault protection architecture for aerospace vehicle guidance, navigation, and control. *Journal of Aerospace Information Systems*, *17*(2), 70–85. <https://doi.org/10.2514/1.1010673>.
- Shen, C. W., Ho, J. T., Luong, T. H., & Kuo, T. C. (2017). Behavioral intention of using virtual reality in learning. *26th International World Wide Web Conference 2017, WWW 2017 Companion*, 129–137. <https://doi.org/10.1145/3041021.3054152>.

- Somasundar, A. V. S. S., & Yedukondalu, G. (2018). Robotic path planning and simulation by jacobian inverse for industrial applications. *Procedia Computer Science*, *133*, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.042>.
- Song, J., Niu, Y., & Zou, Y. (2018). Asynchronous sliding mode control of Markovian jump systems with time-varying delays and partly accessible mode detection probabilities. *Automatica*, *93*, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.03.037>.
- Spinelli, S., Cataldo, A., Pallucca, G., & Brusafferri, A. (2018). A distributed control architecture for a reconfigurable manufacturing plant. *Proceedings - 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018*, 673–678. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390788>.
- Stenmark, M., Haage, M., & Topp, E. A. (2017). Simplified Programming of Re-usable Skills on a Safe Industrial Robot: Prototype and Evaluation. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Part F1271*, 463–472. <https://doi.org/10.1145/2909824.3020227>.
- Strahilov, A., & Damrath, F. (2015). Simulation of the behavior of pneumatic drives for virtual commissioning of automated assembly systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *36*, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.001>.
- Su, Q., Moreno, M., Giridhar, A., Reklaitis, G. V., & Nagy, Z. K. (2017). A Systematic Framework for Process Control Design and Risk Analysis in Continuous Pharmaceutical Solid-Dosage Manufacturing. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, *12*(4), 327–346. <https://doi.org/10.1007/s12247-017-9297-6>.
- Su, X., Liu, X., Shi, P., & Song, Y. D. (2018). Sliding mode control of hybrid switched systems via an event-triggered mechanism. *Automatica*, *90*, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.12.033>.
- Subhashini, P. V. S., Raju, N. V. S., Venkata, G., & Chinmayi, K. (2017). Placement analysis of rectangular components within the work volume using a SCARA robot. *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering, ICNTE 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947973>.
- Süß, S., Hauf, D., Strahilov, A., & Diedrich, C. (2016). Standardized Classification and Interfaces of Complex Behaviour Models in Virtual Commissioning. *Procedia CIRP*, *52*, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.049>.
- Szekely, L., Dulf, E. H., & Kovacs, L. (2019). Development of an approach to a biologically inspired self-organizing control structure. *Proceedings - 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2019*, 36–41. <https://doi.org/10.1109/CSCS.2019.00014>.
- Tasca, L. C., Pignaton de Freitas, E., & Wagner, F. R. (2020). A study on the performance impact of programmable logic controllers based on enhanced architecture and organization. *Microprocessors and Microsystems*, *76*. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103082>.

- Tasoren, A. E., Orenbas, H., & Sahin, S. (2018). Analyze and comparison of different PID tuning methods on a brushless dc motor using atmega328 based microcontroller unit. *2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018, October, 25–27*. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751768>.
- Thannhuber, M. J., Bruntsch, A., & Tseng, M. M. (2017). Knowledge Management: Managing Organizational Intelligence and Knowledge in Autopoietic Process Management Systems - Ten Years into Industrial Application. *Procedia CIRP, 63*, 384–389. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.06.002>.
- Tihamér, Á., Ádám, T., Dadvandipour, S., & Futás, J. (2003). Influence of discretization method on the digital control system performance AC drive control with FPGAs View project Influence of discretization method on the digital control system performance. *Acta Montanistica Slovaca Ročník, 8*(December 2003), 196–200.
- Townsend, C. D., Mirzaeva, G., & Goodwin, G. C. (2017). Deadtime Compensation for Model Predictive Control of Power Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics, 32*(9), 7325–7337. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2630712>.
- Uk, M. E., Sajjad, F. B., Soyaslan, M., & Eldogan, O. (2020). Modeling, control, and simulation of a SCARA PRR-type robot manipulator. *Scientia Iranica, 27*(1), 330–340. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.51214.2065>.
- Vale, Z., Faria, P., Abrishambaf, O., Gomes, L., & Pinto, T. (2021). Martine-A platform for real-time energy management in Smart grids. *Energies, 55*(5), 6. <https://doi.org/10.4337/en14071820>.
- van Ginneken, B. (2017). Fifty years of computer analysis in chest imaging: rule-based, machine learning, deep learning. *Radiological Physics and Technology, 10*(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s12194-017-0394-5>.
- Vergnano, A., Berselli, G., & Pellicciari, M. (2017). Interactive simulation-based-training tools for manufacturing systems operators: an industrial case study. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 11*(4), 785–797. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0367-7>.
- Vieira, A. D., Portela Santos, E. A., De Queiroz, M. H., Leal, A. B., De Paula Neto, A. D., & Cury, J. E. R. (2017). A Method for PLC Implementation of Supervisory Control of Discrete Event Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology, 25*(1), 175–191. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2544702>.
- Vogel-Heuser, B., Fischer, J., Feldmann, S., Ulewicz, S., & Rösch, S. (2017). Modularity and architecture of PLC-based software for automated production Systems: An analysis in industrial companies. *Journal of Systems and Software, 131*, 35–62. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.05.051>.
- Wiharya, C., Sungkowo, H., Suryandari, A. S., & Kurniawan, B. I. (2021). Design and optimization of digitalization device of temperature control system using PID Ziegler-Nichols control in chemical engineering laboratory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1073*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1073/1/012051>.

- Wijewickrema, S., Copson, B., Zhou, Y., Ma, X., Briggs, R., Bailey, J., Kennedy, G., & Oleary, S. (2017). Design and Evaluation of a Virtual Reality Simulation Module for Training Advanced Temporal Bone Surgery. *Proceedings - IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, 2017-June*, 7–12. <https://doi.org/10.1109/CBMS.2017.10>.
- Woods, D., Noble, T., Acker, B., Budwig, R., & Wymelenberg, K. Van Den. (2017). Optimizing Economizer Operation by Virtual Commissioning through Remote Co-Simulation. *Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017*, 1905–1912. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.514>.
- Xiaowei, C., & Chuanwei, S. (2017). The study of robot simulation applications based on the LabVIEW robotics. *ICCSS 2017 - 2017 International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems*, 66–71. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2017.8091386>.
- Xie, M., Zhou, D., Shi, Y., & Jia, R. (2018). Virtual Experiments Design for Robotics Based on V-REP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 428(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/428/1/012069>.
- Xiong, J., Zhu, G., Huang, Y., & Shi, J. (2020). A user-friendly verification approach for IEC 61131-3 PLC programs. *Electronics (Switzerland)*, 9(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/electronics9040572>.
- Xu, C., & Luo, W. (2018). Stabilization of Linear Discrete-Time Systems with Multiple Input and Output Delays by Observer-based Delayed Output Feedback. *Chinese Control Conference, CCC, 2018-July(1)*, 1325–1330. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483973>.
- Yao, P., Zhou, K., Lin, Y., & Tang, Y. (2019). Light-weight topological optimization for upper arm of an industrial welding robot. *Metals*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/met9091020>.
- Yohanandhan, R. V., Elavarasan, R. M., Manoharan, P., & Mihet-Popa, L. (2020). Cyber-Physical Power System (CPPS): A Review on Modeling, Simulation, and Analysis with Cyber Security Applications. *IEEE Access*, 8, 151019–151064. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016826>.
- Yuan, S., Zhang, L., & Baldi, S. (2019). Adaptive stabilization of impulsive switched linear time-delay systems: A piecewise dynamic gain approach. *Automatica*, 103, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.02.004>.
- Zaytoon, J., & Riera, B. (2017). Synthesis and implementation of logic controllers – A review. *Annual Reviews in Control*, 43, 152–168. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.03.004>.
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access*, 5, 26901–26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>.
- Zhao, C., Zhang, L., Liu, Y., Zhang, Z., Yang, G., & Li, B. H. (2017). Agent-based

simulation platform for cloud manufacturing. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 8(3), 1–20. <https://doi.org/10.1142/S1793962317420016>.

Zhibao, S., Haojie, Z., & Sen, Z. (2017). A robotic simulation system combined USARSim and RCS library. *2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS 2017*, 240–243. <https://doi.org/10.1109/ACIRS.2017.7986100>.

Zlatintsi, A., Rodomagoulakis, I., Koutras, P., Dometios, A. C., Pitsikalis, V., Tzafestas, C. S., & Maragos, P. (2018). Multimodal signal processing and learning aspects of human-robot interaction for an assistive bathing robot. *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 3171–3175. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461568>

ANEXOS

ANEXO A. ESPECIFICACIONES RELATIVAS A LOS EQUIPOS O MATERIALES EMPLEADOS

En el presente anexo, se hace referencia a las especificaciones del PLC CompactLogix 5370 L1 y los componentes utilizados para el laboratorio virtual.

CompactLogix 5370 L1 Programmable Automation Controllers



1769-L16ER-BB1B, 1769-L18ER-BB1B, 1769-L18ERM-BB1B, 1769-L19ER-BB1B

Features and Benefits

The CompactLogix 5370 L1 controllers combine the power of the Logix architecture with the flexibility of POINT I/O™ modules in a compact, affordable package.

Machine builders and end users can take advantage of the benefits of an Integrated Architecture system with the following features in a lower cost system:

- Ideal for small, to mid-size applications that require low axis motion and I/O point counts
- Offers support for Integrated Motion over EtherNet/IP for maximized scalability
- Provides support for Device Level Ring (DLR) network topologies to help increase network resiliency
- Removes the need for lithium batteries with built-in energy storage
- Includes up to a 2-GB Secure Digital (SD) card for fast program save and restore
- Offers a smaller form factor for maximized cabinet space
- Supports up to 2 axes Kinematics for simple articulated robotics
- Open socket capability allows support for Modbus TCP as well as devices such as printers, barcode readers and servers

CompactLogix 5370 L1 PACs offer up to 1 MB of user memory for increased storage capabilities



Expanding on the scalability of the Logix family of controllers, the CompactLogix™ 5370 L1 Programmable Automation Controllers (PACs) are designed to meet the growing need for a higher performance controller in a compact, affordable package. Offering reduced panel space, the L1 controllers truly enable you to build a high performance, more cost-effective system.

As part of the Integrated Architecture® system, the CompactLogix 5370 L1 controllers use the same programming software, network protocol and information capabilities as all Logix controllers, providing a common development environment for all control disciplines. Consistent tools and features allow users to lower engineering investment costs, ease diagnostics and troubleshooting and speed up time to market.

Integrated Motion on EtherNet/IP

The CompactLogix 5370 L1 controllers meet the needs of customers looking for performance and cost competitive motion solutions that:

- Support up to 2 axes of integrated motion
- Offer a scalable motion solution with the Kinetix® 350

Network Capabilities

Dual Ethernet ports and an integrated Ethernet switch allow support for Device Level Ring (DLR) topologies, which simplifies the integration of components in your control system. DLR connectivity helps to increase network resiliency and allows individual device replacements without compromising production. A daisy chain configuration helps reduce the number of required Ethernet switches in the control system, which can help produce a cost-effective system solution.



CompactLogix 5370 L1 Controller Product Specifications

	1769-L16ER-BB1B	1769-L18ER-BB1B	1769-L18ERM-BB1B	1769-L19ER-BB1B
User memory ¹	0.375 MB	0.5 MB	0.5 MB	1 MB
Controller tasks	32	32	32	32
Programs per task	100	100	100	100
Integrated Motion	–	–	2 axis CIP motion position loop axis	–
Package Size	100mm wide x 130mm high x 105mm deep			
Certifications	cULH (Class I Division 2), KCC / UL (UL 508), ULH (Class I & II, Division 2 and Class III, Divisions 1 & 2) / ATEX, CE, C-Tick, GOST-R, Marine			
Local Expansion I/O Points ²	80	96	96	96
Local Expansion Modules	6	8	8	8
Embedded I/O	16 digital inputs, 16 digital outputs			
Servo Drives (Position Loop CIP)	–	–	2	–
Flash Memory Card	Industrially rated and certified Secure Digital (SD) memory card (1 and 2 GB options); all controllers shipped with 1 GB card			
Ethernet I/O IP nodes	4	8	8	8
Virtual axes	100	100	100	100
Feedback only, torque, velocity, Vhz (max CIP motion drives)	–	–	8	–
Axes/ms	–	–	2	–
Kinematics support	–	–	yes	–
Software / Firmware	RSLogix 5000® v20 and RSLinx® Classic v2.59 Firmware v20.1x or later			Studio 5000 v28 and RSLinx v2.59 or later. Firmware v28.xxx or later

¹ Check controller memory estimator to ensure there is enough memory to execute the controller program for your application.

² Based on six 8 point digital modules (48 pts.) and embedded 32 points (16 digital inputs, 16 digital outputs)

CompactLogix, Integrated Architecture, Kinetix, RSLinx, RSLogix 5000, are trademarks of Rockwell Automation, Inc. Trademarks not belonging to Rockwell Automation are property of their respective companies.

www.rockwellautomation.com

Power, Control and Information Solutions Headquarters

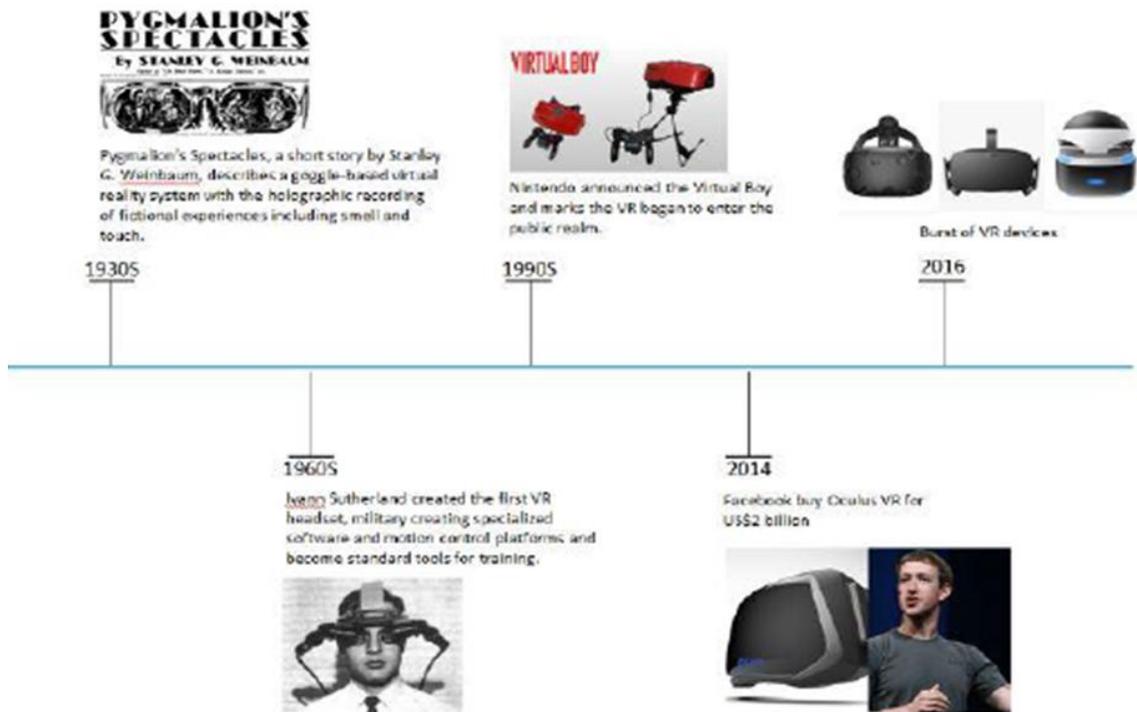
Americas: Rockwell Automation, 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204-2496 USA, Tel: (1) 414.382.2000, Fax: (1) 414.382.4444

Europe/Middle East/Africa: Rockwell Automation NV, Pegasus Park, De Kleetlaan 12a, 1831 Diegem, Belgium, Tel: (32) 2 663 0600, Fax: (32) 2 663 0640

Asia Pacific: Rockwell Automation, Level 14, Core F, Cyberport 3, 100 Cyberport Road, Hong Kong, Tel: (852) 2887 4788, Fax: (852) 2508 1846

Publication 1769-PP012D-EN-E – February 2016
Supersedes Publication 1769-PP012C-EN-E – July 2013

Copyright © 2016 Rockwell Automation, Inc. All Rights Reserved. Printed in USA.



Virtual reality timeline (filmora.wondershare.com)



Oculus rift and oculus sensors (oculus.com)



Oculus touch controllers (oculus.com)

SYSTEM REQUIREMENTS

What you need:

The diagram shows three components in a row, each with a plus sign between them. On the left is an icon of an Oculus HMD. In the middle is an icon of a GPU. On the right is an icon of a PC tower. Below each icon is its label: "HMD", "GPU", and "PC".

HMD + GPU + PC

GeForce GTX 970 or higher

With 2x USB 3.0

Minimum Requirements*:

- **GPU:** NVIDIA GeForce GTX 970 or greater
- **CPU:** Intel Core i5-4590 equivalent or greater
- **Notebook:** NVIDIA GeForce GTX 980
- **Memory/RAM:** 8GB+ RAM
- **Outputs:** 2x USB 3.0 ports, HDMI 1.3
- **OS:** Windows 7 SP1 or newer

Oculus system requirements (oculus.com)

ANEXO B. COSTO DEL TRABAJO

En el presente anexo se presenta de forma general el costo aportado para el equipo utilizado para el laboratorio virtual.



Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

San Andrés Tuxtla, Veracruz, **30 Mayo 2019**

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Dirección de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por este medio hago constar que el C. Guillermo Reyes Morales ha concluido el proyecto titulado "Laboratorio de Realidad Virtual para Entrenamiento en programación de PLC's", cumpliendo satisfactoriamente los objetivos planteados a su ingreso en el programa de Doctorado en Manufactura Avanzada del Posgrado de CIATEQ, A.C.

Los resultados del proyecto, para el cual nuestra Institución hizo aportaciones por un total de \$100,000.00 M.N., es de gran relevancia para nuestros propósitos, debido a que *"la aplicación de los laboratorios de realidad virtual en los programas de Ingeniería Mecatrónica es de gran relevancia por la implementación, aplicabilidad, flexibilidad y los bajos costos"*.

Finalmente, manifiesto la entera satisfacción de nuestra Institución por la conclusión de los estudios de Posgrado de Guillermo Reyes Morales.

Sin más por el momento, me despido enviándole un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excellencia en Educación Tecnológica
TRANSFORMARSE PARA TRASCENDER


MTR. OCTAVIO OBIL MARTÍNEZ
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA



ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA

En el presente anexo se presenta a detalle las especificaciones de la metodología para el desarrollo del escenario virtual.

A. Determinación de las especificaciones de diseño

En esta etapa se pueden distinguir dos tipos de especificaciones de diseño: las especificaciones técnicas y las especificaciones didácticas del laboratorio. Las especificaciones técnicas van desde el tipo de proceso y layout a implementar, hasta la determinación de las características particulares de los componentes y equipos a simular. Por otro lado, en las especificaciones didácticas se define el alcance del laboratorio dentro del proceso de capacitación, lo cual está relacionado con la determinación de los conceptos a estudiar, el tipo de habilidades a desarrollar y las formas específicas a implementar para el desarrollo de estas habilidades.

B. Modelado 3D de los componentes del laboratorio

Gran parte de la experiencia realista de un ambiente virtual depende del esfuerzo que se concentre en la elaboración de los modelos 3D presentes en la escena. En la actualidad existen muchas herramientas de diseño CAD y modelado 3D que permiten obtener diseños de mecanismos robóticos con un elevado nivel de detalle. Sin embargo, hay que tener presente que mientras mayor sea el nivel de detalle en la escena, mayor será el costo computacional de la aplicación virtual desarrollada, por lo que en esta etapa se debe tener cuidado en modelar a detalle solamente aquellos componentes estrictamente necesarios.

C. Montaje de la escena

Dentro de la plataforma virtual, todos los modelos 3D obtenidos en la etapa anterior son insertados dentro de una plataforma de desarrollo virtual para ir formando el layout del laboratorio. En esta etapa se debe hacer especial énfasis en el ensamblaje de los componentes industriales dentro de la escena, por lo que el nivel de complejidad en esta tarea depende del nivel de detalle en el diseño de sus componentes.

D. Configuración y modelado del comportamiento físico

La metodología propuesta está diseñada para implementarse sobre plataformas de desarrollo virtual que incluyan motores de física de alto desempeño, lo cual permite representar las condiciones y características físicas elementales para poder simular la dinámica de cuerpos rígidos. En ese sentido, los desarrolladores de este tipo de aplicaciones deben tener un alto grado de conocimiento de las características que su plataforma virtual les permite implementar o configurar. Básicamente se requiere una plataforma que permita simular la fuerza gravitatoria, la detección de colisiones, el ensamblaje de los componentes utilizados en la planta automatizada, las propiedades inerciales de los cuerpos, fuerzas, torques, etcétera. Además, la plataforma debe contemplar la posibilidad de desarrollar código de programación que permita agregar al entorno virtual la representación matemática de todos los sistemas dinámicos involucrados y la configuración con el puerto de comunicación física para implementar el PLC en la etapa de control. Esta etapa de modelado concluye hasta que se obtiene el comportamiento físico esperado en todos los sistemas embebidos en el escenario.

E. Implementación del laboratorio virtual

La implementación consiste en armonizar todas las etapas mencionadas anteriormente para obtener una aplicación virtual que represente, lo más parecido posible, un laboratorio de la planta industrial automatizada. El propósito es que el usuario pueda observar el comportamiento real del funcionamiento de una fábrica virtual, controlada desde el exterior con la implementación del PLC en tiempo real, teniendo a su disposición un conjunto de herramientas, como indicadores y controles, que le permitan interactuar con el sistema y, de esta forma, desarrollar habilidades prácticas en la automatización industrial.