



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de un gemelo digital para la
capacitación en la operación de una
trituradora de residuos orgánicos**

T E S I S

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Iván Zepeda Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL PARA LA CAPACITACION EN LA OPERACION DE UNA TRITURADORA DE RESIDUOS ORGANICOS que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

IVAN ZEPEDA PEREZ
Número de cuenta: 317117635

Jurado asignado

Presidente:	M.I. Gloria Correa Palacios
Secretario:	M.I. Carlos Alberto Pérez Juárez
Vocal:	Dr. Hoover Mujica Ortega
1 ^{er} suplente:	Ing. David Quintanar Villalba
2 ^{do} suplente:	Ing. Luis Arturo Vélez Fajardo

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio de Automatización.

Ciudad de México.

Director de tesis

Dr. Hoover Mujica Ortega

Dedicatoria

A todos los que estuvieron les agradezco su apoyo, a los que están su confianza y a los que estarán su entusiasmo.

Agradecimientos

A mi madre, padre, hermana y hermano por su amor.

A mis amigas y amigos por su invaluable compañía.

A mi director de tesis Hoover Mujica Ortega por su confianza y asesoría en este trabajo.

A la UNAM, a la Facultad de Ingeniería y a las instituciones que aportaron el ecosistema en el que me formé profesionalmente.

A todos aquellos que estuvieron desde el primer día, a quienes me uní a mitad de camino y a los que conocí al término de este periodo. Sin su amistad hubiera sido imposible disfrutar el ascenso escarpado.

Resumen

Actualmente, existe la necesidad de capacitar al personal en la operación de maquinaria peligrosa sin exponerlo a riesgos físicos. Para atender esta demanda, se desarrolló el **gemelo digital (DT, por sus siglas en inglés)** de una trituradora de residuos orgánicos que integra una experiencia de **realidad virtual (VR, por sus siglas en inglés)**, la cual funciona como un manual inmersivo para el entrenamiento en la operación del equipo.

Esta implementación pretende mitigar riesgos inherentes a los entornos industriales que involucran, por ejemplo, altas temperaturas o maquinaria pesada, donde un error operativo puede derivar en lesiones graves. La propuesta utiliza un entorno virtual para garantizar que el personal adquiera las competencias necesarias y practique sus conocimientos de forma segura antes de su primera interacción con el proceso real.

Para su desarrollo, se utilizó un modelo tridimensional diseñado en *Autodesk Inventor*, importado a *Emulate3D* para integrar aspectos cinemáticos y físicos mediante motores virtuales. La lógica de control se configuró en *Studio 5000 Logix Designer* y la interfaz de supervisión en ***FactoryTalk Optix***, vinculadas al modelo a través de un controlador emulado con ***FactoryTalk Logix Echo***. La implementación en visores *Meta Quest 3* permitió lograr una experiencia envolvente.

El resultado es un entorno virtual realista e interactivo que permite al usuario manipular el gabinete de control y la **interfaz humano-máquina (HMI, por sus siglas en inglés)** para controlar la trituradora. El sistema proporciona retroalimentación sobre las acciones realizadas, permitiendo a los trabajadores practicar sus procedimientos operativos, de inspección o mantenimiento sin los peligros inherentes al proceso de trituración.

Gracias a la evaluación en cuatro plataformas de visualización, se concluye que el sistema cumple satisfactoriamente como una herramienta de capacitación segura, particularmente mediante el uso del visor **VR**, ya que este ofrece una experiencia inmersiva e interactiva. Como trabajo futuro, se identifican oportunidades para incorporar, además de cinemática, dinámica al **DT** y la realización de un comisionamiento virtual con el **controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés)** físico que controla la máquina real.

Índice general

Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Acrónimos	xvii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	3
1.3. Formulación del problema	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Contribuciones	5
1.6. Organización de la tesis	6
2. Marco teórico	7
2.1. Gemelos digitales y realidad virtual	7
2.1.1. Definición y evolución de los gemelos digitales	7
2.1.2. Aplicaciones industriales de los gemelos digitales	11
2.1.3. Integración de gemelos digitales con realidad virtual	16
2.2. Trituradoras de residuos orgánicos	17
2.2.1. Principios de funcionamiento de una trituradora de residuos	18
2.2.2. Datos técnicos	18
2.2.3. Operación y seguridad en el uso de trituradoras	20
2.3. <i>Emulate3D</i> y su aplicación en la industria	21
2.3.1. <i>Emulate3D</i> en procesos industriales	21
2.3.2. Comparación con otras plataformas de simulación industrial	22
3. Diseño de un gemelo digital para una trituradora de residuos orgánicos	29
3.1. Modelado y simulación de la trituradora de residuos orgánicos	29
3.1.1. Modelo tridimensional de la trituradora	29
3.1.2. Simulación del comportamiento operativo de la trituradora	30
3.2. Modelado y simulación del proceso	36
3.2.1. Modelado y simulación del proceso	36
3.2.2. Propuestas para mejorar la seguridad	37

3.3. Comisionamiento virtual	37
3.3.1. Desarrollo de la lógica de control	37
3.3.2. Implementación de rutinas de control en el ambiente virtual	38
3.4. Desarrollo de la experiencia de capacitación	43
3.4.1. Elaboración del manual operativo	44
3.4.2. Implementación del manual en realidad virtual	45
3.4.3. Implementación de escenario práctico para la capacitación	46
4. Evaluación	57
4.1. Evaluación en estación de trabajo	57
4.1.1. Implementación	57
4.1.2. Experiencia de usuario	57
4.1.3. Limitaciones	58
4.2. Evaluación en navegador <i>web</i>	58
4.2.1. Implementación	58
4.2.2. Experiencia de usuario	58
4.2.3. Limitaciones	58
4.3. Evaluación en <i>Microsoft HoloLens</i>	58
4.3.1. Implementación	59
4.3.2. Experiencia de usuario	59
4.3.3. Limitaciones	59
4.4. Evaluación en <i>Meta Quest 3</i>	59
4.4.1. Implementación	59
4.4.2. Experiencia de usuario	59
4.4.3. Limitaciones	60
4.5. Evaluación con voluntarios	60
4.6. Discusión	60
5. Conclusiones y trabajo futuro	63
5.1. Conclusiones	63
5.2. Trabajo futuro	63
Referencias	65

Índice de figuras

2.1. Niveles de desarrollo de un gemelo digital.	11
2.2. Arquitectura de un gemelo digital.	14
2.3. Datos de la trituradora horizontal proporcionados por el fabricante	19
3.1. Cuchillas añadidas al modelo proporcionado.	30
3.2. Propiedades que permiten a las piezas colisionar con caras simuladas.	32
3.3. Interacción entre los residuos orgánicos simulados y la trituradora.	33
3.4. Eje asignado y propiedad de cinemática rotativa de las cuchillas.	33
3.5. Propiedades de cinemática directa de las cuchillas y su motor asignado.	34
3.6. Pala del cargador frontal movido por los pistones con cinemática inversa.	34
3.7. Pala del cargador frontal movido por los pistones con cinemática inversa.	35
3.8. Propiedades de motor y controlador genérico del tornillo sin fin.	36
3.9. Primera parte de la rutina <i>Ladder</i> de la trituradora horizontal.	39
3.10. Segunda parte de la rutina <i>Ladder</i> de la trituradora horizontal.	40
3.11. Ventana <i>IO Browser</i> con variables ya comisionadas y lista de protocolos soportados.	41
3.12. Emulador de PLC que se ejecuta dentro de una máquina virtual.	42
3.13. HMI generada en FT Optix y ejecutada dentro de una máquina virtual.	42
3.14. HMI generada en FT Optix y ejecutada en un servidor <i>web</i>	43
3.15. Bloque que activa la rutina de encendido de la trituradora horizontal.	47
3.16. Vista inicial de la rutina de operación de la trituradora horizontal.	48
3.17. Flechas que guían hacia la zona en que se realiza la comprobación de seguridad.	49
3.18. Zona en la que se realizan las comprobaciones de seguridad.	49
3.19. Momento en que se ha comprobado que no hay nadie dentro de la tolva.	50
3.20. Situación en que se han completado las comprobaciones de seguridad.	50
3.21. Momento en que se han completado los preparativos de seguridad.	51
3.22. Indicación de regresar al panel para continuar la rutina.	51
3.23. Instrucción de encender el controlador con el interruptor de llave.	52
3.24. Orden de presionar el botón <i>Reset</i>	52
3.25. Instrucción de encender el interruptor principal.	53
3.26. Momento que se indica operar la trituradora desde la HMI	53
3.27. Paso final en el que se solicita una carga de material.	54
3.28. Cargador frontal que aparece al finalizar la operación de la trituradora.	54
3.29. Indicador de que la operación se realizó correctamente.	55
3.30. Caso en que no se encendió la trituradora antes de introducir la carga de material.	55
3.31. Caso en que no se retiró el objeto extraño de la tolva antes de depositar la carga	56

Índice de tablas

2.1. Definiciones de gemelos digitales según diferentes organizaciones	8
2.2. Comparación entre realidad aumentada y realidad virtual.	16
2.3. Plataformas de gemelos digitales con enfoque general, urbano, académico o visual. . .	23
2.4. Plataformas de gemelos digitales con enfoque industrial.	24
2.5. Ventajas y desventajas del uso de realidad virtual en <i>Emulate3D</i>	26
3.1. Opciones de visualización e interacción de modelos en Emulate3D	46
4.1. Comparativa de plataformas utilizadas para la evaluación del gemelo digital	62

Acrónimos

- DT** Gemelo digital. IX, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 29, 30, 32, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 46, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64
- VR** Realidad virtual. IX, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 16, 17, 25, 26, 27, 29, 31, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63
- FT *Optix*** *FactoryTalk Optix*. IX, XIII, 5, 25, 41, 42, 43
- FT *Echo*** *FactoryTalk Logix Echo*. IX, 5, 21, 25, 31, 37, 38, 41
- HMI** Interfaz humano-máquina. IX, XIII, 4, 5, 21, 22, 25, 37, 41, 42, 43, 47, 48, 53, 59
- PLC** Controlador lógico programable. IX, XIII, 4, 5, 10, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 31, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 48, 63, 64
- AR** Realidad aumentada. 1, 5, 6, 16, 17, 57, 59, 61, 62, 63
- CAD** Diseño asistido por computadora. 4, 5, 11, 21, 24, 29, 30, 35
- WS** Estación de trabajo. 5, 6, 57, 60, 61, 62, 63
- IIoT** Internet industrial de las cosas. 9, 10, 14, 24
- IoT** Internet de las cosas. 10, 23, 24

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El concepto de **DT** y las tecnologías inmersivas como la **VR** y la **realidad aumentada (AR, por sus siglas en inglés)** han ganado relevancia en los últimos años gracias a su capacidad de reproducir de manera verosímil actividades tanto lúdicas como profesionales dentro de entornos controlados y seguros. En este contexto, es pertinente examinar dos líneas de antecedentes que fundamentan el alcance de este trabajo: el uso de **VR** para capacitación en operación y el uso de **DT** para obtener una ventaja competitiva en la industria actual.

Una ventaja significativa del uso de **VR** para entrenamiento radica en su relación costo-beneficio en comparación con las instalaciones que replica. Esta herramienta se puede utilizar para dar acceso a laboratorios o plantas industriales tanto para la inducción de nuevo personal como para la capacitación continua de trabajadores experimentados dado que el entorno virtual, una vez creado, permite un acceso ilimitado y en cualquier momento, lo que facilita experimentar y explorar a voluntad de los interesados ([Pribadi, *et al.*, 2024]).

El uso de **VR** para capacitación se ha implementado en varios sectores con diversos resultados, por ejemplo, en el sector minero la capacitación de los operadores ha sido reconocida como un factor clave para incrementar la seguridad y la productividad, lo que a su vez impacta en la reducción de costos por accidentes y de aquí surge el interés de invertir en ella. Esta aproximación para la formación de los operadores permite orientar el aprendizaje no solo a cumplir con los estándares de calidad definidos por la empresa, sino también con los requerimientos de seguridad, pues su desempeño es un factor determinante en la prevención de accidentes ([Pireddu, *et al.*, 2025]).

El uso de entornos virtuales aporta ventajas prácticas que difícilmente pueden lograrse en el entorno de trabajo real, pues ofrecen escenarios controlados y repetibles sin comprometer la seguridad ni la fidelidad de la experiencia en que se basa. Adicionalmente, la naturaleza activa de la interacción entre el usuario y su entorno, en este caso virtual, fomenta una mayor conciencia de riesgos, ya que el usuario experimenta las consecuencias de sus acciones como puede ser una emergencia, exponiéndolo a situaciones peligrosas simuladas en un espacio libre de amenazas reales, fortaleciendo su aprendizaje y sensibilizándolo sobre el impacto que sus decisiones tienen en su seguridad e integridad personal durante una jornada de trabajo ([Pireddu, *et al.*, 2025]).

En el sector de la construcción, que es uno de los que más altos índices de riesgo presentan, se ha generado interés en el uso de tecnologías inmersivas. En estos trabajos se reporta que los entrenamientos con **VR** ayudan a mejorar los tiempos de respuesta en situaciones de emergencia y a que el personal

ejecute de manera adecuada los protocolos de seguridad. De la misma manera, en investigaciones enfocadas a la capacitación procedimental, se concluye que la posibilidad de equivocarse en un entorno virtual, recibir retroalimentación inmediata y volver a intentar sin consecuencias sobre la producción real es una ventaja muy difícil de lograr en el entrenamiento tradicional que actualmente se imparte (Babalola, *et al.*, 2023).

Gracias a los estudios y propuestas ya mencionadas se ha hecho notar un interés en el diseño de manuales interactivos basados en VR pues permiten replicar la funcionalidad de un equipo, proceso o actividad e incorporar escenarios poco comunes como puede ser una emergencia, exponiendo de forma segura a los trabajadores a estas situaciones de forma que pueda aprender cómo seguir los respectivos protocolos de respuesta ante ese evento. El análisis de un grupo de investigaciones recientes arroja que los entornos de enseñanza inmersivos tienen ventajas en la retención del conocimiento por encima de los no inmersivos como puede ser un manual en papel (Jongbloed, *et al.*, 2024).

Se llama DT a la representación de un objeto, proceso o sistema mediante una réplica virtual del mismo que se construye a partir de un modelo y simulación del objeto en cuestión alimentada a través de datos recopilados en tiempo real por sus sensores o modelos matemáticos con el fin de obtener información valiosa que pueda facilitar la toma de decisiones o significar una ventaja competitiva. (Borole, *et al.*, 2023)

En contraste con las pruebas físicas con modelos a escala, gabinetes de prueba o plantas experimentales, los DT presentan oportunidades como son:

- Desarrollo de variaciones del modelo para probar características nuevas pues el costo del desarrollo es mucho menor.
- Diseño, implementación y realización de propuestas experimentales sin afectar la producción de la planta
- Posibilidad de nuevas formas de operación ya que estos proporcionan una plataforma que puede interactuar con el sistema real desde el entorno virtual
- La creación de manuales de operación en un ambiente virtual y seguro tanto para la persona que va a aprender como para el proceso en cuestión.

En los últimos años diversas empresas han desarrollado plataformas para la creación de DT debido a que esta tecnología ha cobrado fuerza, algunas de las organizaciones que encontraron valor en este concepto son Siemens con Xcelerator, ANSYS con ANSYS twin builder, Rockwell Automation con Emulate3D, Microsoft con Azure Digital Twins, NVIDIA con Omniverse, IBM con Maximo y la Universidad de Málaga con OpenTwin entre muchas otras que se han sumado a este mercado. Es importante remarcar que no solo empresas involucradas en el entorno industrial han gastado recursos en el desarrollo de DT, también otras áreas económicas y académicas han utilizado este concepto para generar propuestas como son ciudades o edificios inteligentes, modelado biomédico de pacientes o una plataforma de propósito general y de código abierto para uso académico.

1.2. Motivación

El desarrollo de esta propuesta surge de la necesidad de la industria actual de centrarse en el bienestar de sus trabajadores, conforme a las tendencias hacia la industria 5.0. Este enfoque requiere capacitar de manera segura a sus trabajadores antes de exponerlos a la maquinaria real que representa un riesgo para su integridad y la del proceso. En este contexto cobra importancia proveer herramientas que faciliten la familiarización del operador con la trituradora y su procedimiento de encendido antes de su primera interacción con el equipo físico.

Para satisfacer esta necesidad se propone replicar el funcionamiento de la máquina en un entorno virtual e implementar dentro de este una experiencia de capacitación inmersiva con el uso de tecnologías disruptivas, en particular con **VR** y visores especializados. Este ambiente virtual proporciona un espacio en el cual los operadores pueden conocer y practicar la operación de una trituradora de residuos orgánicos de forma segura y realista.

El **DT** del proceso por sí mismo constituye ya una herramienta valiosa y versátil que puede ser usada para el aprendizaje a través de la exploración y la experimentación. Para enriquecer dicha herramienta, se integraron instrucciones dentro del entorno virtual que guían al usuario paso a paso en la manera correcta de operar el equipo.

Este trabajo busca agregar valor al trasladar un manual operativo convencional a un entorno digital inmersivo mediante la integración de **VR** en un **DT**. La diferencia clave de esta aproximación radica en que trasciende la simple simulación para constituir un entorno virtual que reproduce de manera verosímil las características mecánicas, de comunicación y control de su contraparte física. Las principales ventajas de este enfoque incluyen:

- Permite a los operarios practicar y familiarizarse con el funcionamiento de la trituradora en un entorno virtual seguro, reduciendo el riesgo de accidentes durante la capacitación.
- Permite usar la maquinaria de forma realista en un entorno de **VR**, ofreciendo una experiencia verosímil que facilita adquirir conocimiento práctico sin exposición a los riesgos del proceso real.
- El **DT** señala los errores durante la operación, lo que ayuda a los usuarios a reconocer y evitar escenarios peligrosos sin comprometer su integridad ni la del equipo.
- Amplía el perfil profesional que puede contratarse y capacitarse para operar maquinaria ya que el conocimiento y la experiencia necesaria está contenida en el manual y este puede consultarse en cualquier momento.
- La experiencia de operación interactiva digitaliza e ilustra el manual operativo, lo que facilita la comprensión de los procedimientos y protocolos ya establecidos.
- La implementación de un **DT** representa un avance significativo en la adopción de tecnologías disruptivas, sentando las bases para futuras aplicaciones en otros equipos de trabajo o procesos tanto dentro como fuera del contexto industrial.

1.3. Formulación del problema

A partir de lo expuesto, se identifican las siguientes problemáticas susceptibles de ser abordadas en el desarrollo de este proyecto. Dichas problemáticas se caracterizan por los siguientes aspectos relevantes:

- Las trituradoras de residuos orgánicos son esenciales en procesos industriales que requieren reducir de tamaño alguna materia prima, esta naturaleza operativa representa un riesgo significativo para la integridad del personal que interactúa con ella.
- Se necesitan métodos de capacitación para los operadores que puedan ser aplicados sin necesidad de usar el equipo real, esto es especialmente importante para el personal de nuevo ingreso. Por consiguiente, se identifica la necesidad de desarrollar un entorno virtual en el que se lleve a cabo la capacitación y que permita interactuar con la máquina de forma verosímil antes de hacerlo con la trituradora real.
- Para realizar una capacitación realista se necesita un entorno virtual que replique no solo la apariencia visual, sino también las interacciones de manera verosímil. Para lograr una experiencia envolvente es importante integrar eficazmente tecnologías inmersivas, como la **VR**, dentro del **DT**. Esto conlleva asegurar que la interacción entre el usuario y el entorno virtual sea en tiempo real, la correcta comunicación con el **PLC**, la **HMI**, y la representación clara de las respuestas del sistema ante las acciones del operador dentro del entorno virtual.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un **DT** de una trituradora horizontal de residuos orgánicos utilizando tecnologías disruptivas, empleando la plataforma *Emulate3D*, y a partir de este generar una experiencia de **VR** para la capacitación en la operación del equipo industrial. Dicho sistema integrará un modelo tridimensional que replique visual y funcionalmente la maquinaria. La experiencia en **VR** busca ser un manual de operación inmersivo con el fin de ofrecer a los operarios una experiencia de capacitación verosímil y segura.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar el modelado tridimensional de la trituradora de residuos orgánicos en software de **diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés)**, considerando todas las partes visibles y funcionales relevantes para garantizar que el equipo tenga una representación precisa de su funcionamiento en el entorno virtual.
- Simular el funcionamiento de la trituradora y los sistemas de tornillo sin fin acoplados al proceso en un entorno virtual, replicando sus movimientos cinemáticos.
- Ejecutar el comisionamiento virtual de la trituradora con un **PLC** emulado, permitiendo a los operarios realizar pruebas de puesta en marcha y detenerlas en un entorno controlado, sin afectar la producción ni exponerse a riesgos reales.

- Diseñar y desarrollar un manual de operación interactivo que guíe a los operarios en el uso correcto de la trituradora, con protocolos de operación reales para la puesta en marcha de forma que se proporcione una experiencia de capacitación práctica y segura.
- Implementación de una **HMI** que replique a la real tanto en el aspecto visual como en el funcional, permitiendo operar la maquinaria desde esta misma.
- Implementar tecnologías de **VR** en el **DT** para mejorar la inmersión y la experiencia de los operarios durante la capacitación, habilitando a obtener conocimiento empírico sobre la máquina, el entorno y sus procedimientos operativos.
- Evaluar las capacidades de inmersión e interactividad de las plataformas que ofrece *Emulate3D* para desplegar el **DT** que son las siguientes: estación de trabajo (*WS*, por sus siglas en inglés), navegador *web* y visores de **AR** o **VR**.

1.5. Contribuciones

- Enriquecimiento del modelo tridimensional del proceso de pretratamiento de la planta de carbonización hidrotermal, incluyendo paneles de control y partes móviles de la maquinaria como tornillos o cuchillas utilizando software de **CAD** que posteriormente se usaría como base para la creación del **DT**.
- Asignación de propiedades físicas y cinemáticas a los componentes clave del modelo, como los tornillos sin fin, el cargador frontal y las cuchillas de la trituradora dentro de la plataforma *Emulate3D*, lo que permitió generar una simulación fiel del movimiento y la interacción de los residuos orgánicos con la maquinaria.
- Integración de motores virtuales y sistemas de control para animar los elementos móviles mediante articulaciones rotativas y prismáticas, logrando una representación realista del comportamiento mecánico de los sistemas. Para habilitar el comisionamiento virtual, se configuró un emulador de **PLC** mediante **FT Echo** y el entorno de programación *Studio5000*.
- Conexión del modelo virtual al controlador a través del protocolo *EtherNet/IP* usando la herramienta *IO Browser*, estableciendo así una comunicación bidireccional entre los elementos animados y la lógica del **PLC**. Además se diseñó la **HMI** desde la cual se opera la trituradora horizontal utilizando la plataforma de desarrollo **FT Optix**.
- Diseño y desarrollo de un manual operativo que reproduce las condiciones reales de la trituradora horizontal Bomatic, incluyendo instrucciones para arrancar y operar el sistema en modo automático. Se creó un manual inmersivo e interactivo que guía al operador dentro del entorno virtual, proporcionando instrucciones visuales que responden a sus acciones en tiempo real. Esta funcionalidad permitió practicar el arranque del proceso, identificar errores y aprender sin riesgo alguno para el personal.
- Implementación del sistema en visores de **VR** para mejorar la experiencia formativa, permitiendo la interacción a escala real con los controles del sistema y facilitando la familiarización del operador con el gabinete y la **HMI** que controla la trituradora.

1.6. Organización de la tesis

La estructura de esta tesis comprende cinco capítulos, además de las referencias y apéndices, comenzando por el capítulo actual, en el que se presenta una vista general del proyecto realizado, el contexto por el cual se justifica este trabajo y la problemática abordada. A continuación, se describe el contenido de los demás capítulos:

- En el Capítulo 2 se describe el marco teórico necesario para comprender de mejor forma este trabajo. Se fundamentan los conceptos clave sobre DT, su implementación en VR y simulación de procesos mediante herramientas digitales como *Emulate3D*. Además se da un contexto histórico para entender las necesidades actuales de la industria.
- En el Capítulo 3 se aborda el desarrollo técnico del DT, comenzando por el modelado tridimensional del sistema, posteriormente la animación cinemática, el comisionamiento virtual y la integración con un entorno de control emulado. Se detalla la metodología para la creación del manual operativo interactivo, incluyendo el manual operativo actual y la construcción de la experiencia inmersiva que guía al usuario dentro del entorno virtual.
- En el Capítulo 4 se lleva a cabo la evaluación del DT en diferentes dispositivos. Se compara su desempeño, nivel de realismo, estabilidad e interacción en plataformas como WS, entornos web y dispositivos de AR y VR. Aquí se comparan sus ventajas, limitaciones y áreas de aplicación, determinando el caso de uso de cada entorno.
- En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del presente proyecto, se proponen distintas líneas de trabajo futuro y posibilidades para escalar el uso de tecnologías disruptivas a áreas distintas a la educación.
- Al final del documento se incluye un apéndice con información complementaria y las referencias bibliográficas utilizadas durante la tesis.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Gemelos digitales y realidad virtual

2.1.1. Definición y evolución de los gemelos digitales

Definición

El concepto de **DT** se define de forma diferente dependiendo del área en que se utilice pues sus funciones y aplicaciones específicas varían en gran medida según las necesidades que habrá de satisfacer. Incluso dentro de un mismo ámbito como es el industrial, ninguna empresa tiene el mismo concepto pues lo aplican y utilizan cada una en diferentes procesos con naturalezas tan dispares como es el manejo de producción discreta como puede ser embotellado o continua por ejemplo intercambiadores de calor, estas diferencias se pueden notar de mejor manera al recopilarlas como se puede apreciar en la tabla **2.1**.

Entre una simulación y un **DT** se puede notar la existencia de una diferencia fundamental. La primera busca replicar un fenómeno específico, mientras que el segundo construye un entorno virtual capaz de imitar su comportamiento, su interacción con el entorno, así como los procesos previos y posteriores que lo afectan.

Una simulación se centra únicamente en el fenómeno de estudio y en las variables que lo describen. En contraste, un **DT** ofrece un ambiente realista y controlado que permite realizar múltiples experimentos, obteniendo nueva información y más importante, perspectivas valiosas para la toma de decisiones sobre la contraparte real. Estas pueden ir desde la implementación de mejoras, hasta la detección temprana de la inviabilidad de un proceso (**Borole, et al., 2023**).

Tabla 2.1 Definiciones de gemelos digitales según diferentes organizaciones

Organización	Definición
IBM	<i>"A Digital twin is a virtual representation of an object or system that spans its lifecycle, is updated from real-time data, and uses simulation, machine learning, and reasoning to help decision making."</i> [IBM, 2025]
Siemens	<i>"Based on the consistent data model across all aspects of the product life cycle, some of the actual operations are accurately and veritabily simulated."</i> [Siemens, 2024]
General Electric	<i>"Through the virtual models of devices and products, the actual complexities of physical entities are simulated, and insights are projected into applications."</i> [GE Digital, 2024]
NASA	<i>"The application of interdisciplinary modeling and simulation across the product lifecycle."</i> [NASA, 2024]
ANSYS	<i>"Combined outstanding simulation capabilities with powerful data analysis capabilities, it is to help enterprises gain strategic insights."</i> [Ansys, 2024]
PTC	<i>"PLM process is extended into the next design cycle to create a closed-loop product design process and help achieve predictive maintenance of the product."</i> [PTC, 2024]
FANUC	<i>"A digital twin is the concept of creating a digital replica of the physical machines, production processes or shop floor layouts in order to generate a number of competitive advantages."</i> [FANUC, 2020]

Historia y evolución de los gemelos digitales

El concepto de **DT** es relativamente reciente, pero sus fundamentos se remontan a ideas desarrolladas desde hace varias décadas en el campo de la simulación y el análisis numérico.

Inicialmente, las representaciones virtuales de sistemas físicos surgieron como herramientas para predecir comportamientos, validar ideas o analizar procesos antes de ser construidos o puestos en marcha. Sin embargo, estos modelos solo se enfocan en una hipótesis a la vez y no interactuaban con sus contrapartes físicas, por lo que su alcance es limitado.

De las primeras organizaciones que necesitaron desarrollar un **DT** primitivo a través de métodos numéricos fue la *NASA* para sus misiones de exploración espacial durante la década de 1960 para entrenar tanto a los trabajadores en tierra como a los tripulantes de las naves ([Borole, et al., 2023]).

El concepto de un **DT** fue presentado formalmente por David Gelenter en 1991 con la publicación de su libro *"Mirror Worlds or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox. How It Will Happen and What It Will Mean"*. En este libro, por primera vez, se aborda de forma madura la creación de un entorno virtual que refleje la realidad en el cual experimentar y la implementación de este a través de un programa computacional que posteriormente tomaría el nombre de *"Digital Twin"*, el cual se le atribuye a John Vickers en 2010, trabajador de la *NASA*. [Borole, et al., 2023]

A pesar de la propuesta teórica e implementaciones prácticas tienen varias décadas, la adopción de esta tecnología fue limitada debido al lento avance en ciencia de datos. No fue sino hasta la

madurez de esta y el aumento de capacidad computacional tanto para procesamiento, presentación de imágenes tridimensionales y en redes de comunicación entre computadoras que los **DT** comenzaron a considerarse una herramienta viable para obtener descubrimientos relacionados a predicción y diagnóstico de fallas, gracias a esto comenzó a implementarse con mayor éxito en diversos campos, incluido el sector industrial ([Borole, et al., 2023]).

En los últimos años empresas como *Siemens*, *General Electric*, *IBM* y *Microsoft* comenzaron a desarrollar plataformas dedicadas para el desarrollo y visualización de **DT**. Con el impulso de la Industria 4.0 y sus pilar más importante: El **internet industrial de las cosas (IIoT, por sus siglas en inglés)**, los **DT** pasaron de ser una simulación a convertirse en entornos, que son una herramienta visual y tangible para facilitar la toma de decisiones de diseño, mantenimiento predictivo, identificación de fallas y capacitación técnica.

Los **DT** se han posicionado como una de las tecnologías más representativas actualmente dentro de la transformación digital industrial. No sólo permiten visualizar o controlar sistemas físicos, sino que los replican con un grado de precisión suficiente para evaluar estrategias de producción, mejorar la eficiencia energética, optimizar la logística o, como en el caso de uso presente, facilitar la capacitación segura y efectiva del personal operativo.

El desarrollo de plataformas especializadas en **DT** por empresas de nivel internacional como *Rockwell automation* con *Emulate3D*, *NVIDIA* con *Omniverse*, *Microsoft* con *Azure Digital Twins* y *ANSYS* con *Twin Builder* indica que esta tecnología ha madurado lo suficiente para ser aplicada en varios casos de uso como son líneas de producción discretas, sistemas de manufactura a mediana escala y proyectos de automatización experimental.

Evolución de la industria

Para comprender la relevancia de los **DT** es importante conocer su historia, esta puede ser dividida en cinco grandes etapas con un avance tecnológico en cada una que transformó de forma importante el proceso para la fabricación de bienes.

■ Industria 1.0: Mecanización a través de la energía de vapor

- Surge a finales del siglo XVIII con la invención de la máquina de vapor.
- Esta nace con el inicio de la mecanización en los procesos productivos, reemplazando el trabajo humano y animal.
- Industrias como la textil y la siderúrgica fueron las primeras en adoptar maquinaria en sus proceso.
- Se crean los primeros talleres mecanizados, lo que permite la producción en gran cantidad y abre camino a la fábrica moderna.

■ Industria 2.0: Producción en masa y energía eléctrica

- A finales del siglo XIX, con la llegada de la electricidad se transforma la forma en que se supe, distribuye y utiliza la energía en fábricas.
- Se desarrollan motores eléctricos, aumentando la cantidad de opciones de las que se disponen para diseñar un proceso industrial.
- Comienza la producción en masa gracias a las líneas de ensamblaje que permiten fabricar grandes volúmenes con mayor estandarización y en menor tiempo.

■ Industria 3.0: Automatización mediante electrónica y control

- A partir de 1970 con la introducción de electrónica y computación a los procesos se transforma la industria una vez más.
- Se implementan en las industria herramientas como son **PLC**, sensores, actuadores y redes de comunicación para automatizar trabajos.
- Mejora la precisión, la estandarización del producto y el control en los procesos industriales.

■ Industria 4.0: Digitalización, conectividad y sistemas inteligentes

- Se consolida con el uso del **internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés)** inteligencia artificial, *big data* y robots autónomos, aquí toman fuerza las tecnologías disruptivas.
- El objetivo pasa a ser construir fábricas inteligentes que tengan sistemas en comunicación constante y sean capaces tomar decisiones en tiempo real.
- Se utilizan herramientas como los **DT** que permiten simular, analizar y optimizar procesos antes de su implementación física.

■ Industria 5.0: Colaboración humano-máquina y sostenibilidad

- Introduce una visión centrada en la seguridad del operador y la sostenibilidad de las actividades en cuestión.
- Se apuesta por la personalización en masa y el bienestar laboral.
- Busca implementar mecanismos para aplicar principios de responsabilidad social al proceso.
- Es importante señalar que no reemplaza a la Industria 4.0, la complementa desde una perspectiva más humana.

Cabe destacar que gran parte de la industria actual se encuentra aún en la tercera revolución industrial, la cuarta aún no está totalmente adoptada, son pocas las empresas que se encuentran en esta etapa, aquí es donde se encuentra el auge de los **DT** pues ayudan a las empresas a tomar decisiones sobre como migrar hacia las nuevas tecnologías como robots autónomos o colaborativos, **IIoT** e inteligencia artificial entre otras tecnologías, mismas que varias industrias han hecho el esfuerzo de implementar últimamente en sus respectivos procesos de producción (**Borole, et al., 2023**).

De la misma forma hay que remarcar que la quinta revolución industrial no es una realidad, es una proyección de la industria actual y una referencia para que en las próximas decisiones sobre la industria sean tomadas desde la responsabilidad social y el conocimiento tanto de derechos humanos como de sostenibilidad, buscando en todo momento llegar a esta industria 5.0 centrada en las personas.

Es desde este contexto, la industria 4.0 a la que se esta migrando actualmente y con el objetivo de llegar a la industria 5.0 es que se posicionan las tecnologías disruptivas que pueden ser **DT** **VR** y sobre todo la combinación de ambos como una solución capaz de representar de forma fidedigna un objeto real con el que se puede interactuar, se puede modificar, observar, se le pueden proponer mejoras y experimentos que posteriormente arrojaran información de interés para obtener revelaciones y generar propuestas que facilitan el proceso de desarrollo técnico, dando espacio para la intervención de profesionales de otras disciplinas que puedan apoyar para que el proceso cumpla con ser sostenible y respetuoso con los trabajadores involucrados.

2.1.2. Aplicaciones industriales de los gemelos digitales

Tipos de gemelos digitales

Se pueden clasificar los **DT** basados en el nivel de complejidad que este tiene, esta clasificación se puede tomar desde dos perspectivas, ya sea como **DT** dentro de **DT** de la misma forma que se apilan las muñecas *matrioshka* o como un solo **DT**, este se construye por fases en que se le añaden características y se clasifica dependiendo de en cual etapa se encuentra, esto se aprecia mejor en la Figura 2.1 y se describe mejor a continuación ([Borole, *et al.*, 2023]).

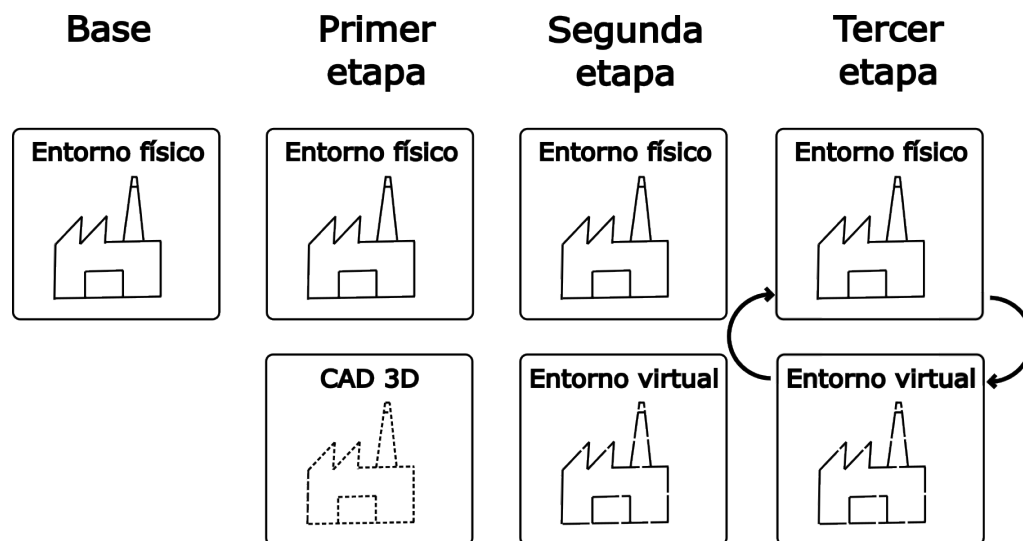


Figura 2.1 Niveles de desarrollo de un gemelo digital.¹

- **Primer fase: Modelo**
Es un **CAD**, lo más usual es que sea un modelo tridimensional que represente detalladamente al objeto real en cuestión.
- **Segunda fase:**
Es añadir lógica al modelo de la primer fase, tanto física como son las interacciones entre las partes que lo compone para que replique el comportamiento del original así como la programación del control en el caso específico de las aplicaciones industriales.
- **Comisionamiento virtual**
Esta etapa consiste en comunicar el **DT** dentro de su entorno con el objeto que está replicando en el mundo real.

De la misma forma, la segunda perspectiva se puede describe mejor a continuación:

- **Gemelo de parte**
Consiste en cada parte individual con sus propiedades añadidas completamente desde esta etapa
- **Gemelo de sistema**
Esta se puede identificar fácilmente pues las partes mencionadas anteriormente aquí se hacen interactuar para generar el comportamiento de un sistema completo

¹Fuente: elaboración propia

- **Gemelo de proceso**

En este punto los sistemas generados se comunican para completar un ciclo de producción completo

Áreas de aplicación

A pesar de ser una tecnología emergente, los **DT** han sido capaces de tener una gran cantidad de aplicaciones prácticas en distintos sectores, tanto fuera como dentro del contexto industrial, aún con esta buena aceptación, es innegable que los **DT** no se pueden aplicar a todas las áreas económicas de forma viable pues estos requieren esfuerzo y recursos para ser creados añadido a que no son capaces por si mismos de regresar a un beneficio a la empresa que los emplea.

Su utilidad radica en si la organización que lo emplee está desarrollando una propuesta experimental, con riesgos significativos o compleja pues al contar con estas características se justifica totalmente la producción de un **DT** para tomar decisiones antes de la fabricación del producto o incluso de un prototipo del mismo. Su versatilidad reside en su capacidad para representar de forma precisa y visual un sistema físico, al tiempo que permite la simulación, análisis y optimización de su comportamiento sin necesidad de intervenir directamente sobre el entorno real ni de gastar materias primas en la creación de una nueva variación del objeto original.

Esta tecnología es ventajosa, dentro de su correspondiente ámbito, en diversas tareas en las que se puede aprovechar el ambiente virtual y la capacidad de hacer modificaciones rápidamente como por ejemplo en el análisis de riesgo para proyectos relacionados a la manufactura, mantenimiento predictivo, pruebas de diseño antes de producción u obtención de revelaciones y nuevos puntos de vista a través del análisis de los datos para mejorar un servicio. [\[Borole, et al., 2023\]](#)

Debido a lo anterior es que los **DT** se utilizan sobre todo en las actividades económicas relacionadas a ingeniería como es diseño, manufactura, construcción de edificios, generación y distribución de energía eléctrica. El valor que representa esta tecnología para las empresas, sobre todo las más grandes y con procesos más complejos, han hecho crecer rápidamente su mercado de nicho el cual sigue en desarrollo, mismo que se proyecta seguirá creciendo rápidamente por lo menos hasta 2026 pues la adopción y definición del caso de uso para esta tecnología aún está en etapa temprana. [\[Borole, et al., 2023\]](#)

- **Industria manufacturera**

- Simular todo el ciclo de vida del producto:
 - Desde implementar y evaluar diseños hasta simular su fabricación.
- Entrenar operadores en entornos seguros.
- Implementar y evaluar lógica de control e interfaces sin afectar la producción real.

- **Sector energético**

- Emular turbinas u otros objetos complejos para determinar el momento ideal de mantenimiento.
- Controlar remotamente redes eléctricas con decisiones basadas simulaciones hechas con datos en tiempo real.
- Implementar y evaluar diseños de transmisión eléctrica.

- **Industria automotriz**

- Evaluar propuestas de diseño sin fabricar prototipos físicos.
- Simular la interacción entre sistemas del automóvil.
- **Industria aeroespacial**
 - Simular vuelos en condiciones atmosféricas variables.
 - Validar diseños antes de fabricar prototipos físicos.
- **Transporte y logística**
 - Modelar almacenes inteligentes y flujo de materiales.
 - Evaluar respuesta ante diversos eventos imprevistos en la cadena de suministro u otras etapas y evaluar como lidiar con las consecuencias.
- **Salud y biomedicina**
 - Reemplazar modelos animales con simulaciones celulares humanas.
 - Modelar órganos humanos para ensayos médicos o quirúrgicos.
 - Personalizar tratamientos con modelos digitales del paciente.
- **Planeación urbana**
 - Proponer y evaluar configuraciones de redes de servicios urbanos como agua, energía y transporte.
 - Someter a prueba propuestas para optimizar el uso de recursos en ciudades inteligentes.
- **Construcción de estructuras**
 - Anticipar efectos e interferencias entre instalaciones de servicios o estructuras vecinas.
 - Controlar y visualizar el progreso y tiempos de ejecución en tiempo real con respecto a la planeación.
- **Plataformas de perforación petrolera**
 - Simular condiciones extremas y perturbaciones para evaluar fallos potenciales.
 - Entrenar personal en situaciones imprevistas y de emergencia.
- **Educación técnica y capacitación industrial**
 - Reducir riesgos durante el entrenamiento práctico al hacerlo en un entorno virtual controlado.
 - Repetir escenarios todas las veces necesarias sin consecuencias sobre la producción real.
 - Aproximar a un conocimiento empírico mediante simulación inmersiva.

Cualquier sistema que pueda ser modelado, sentido y monitoreado es candidato para tener una contraparte digital. Su aplicación no se limita a la industria o a los objetos complejos, sino que cada vez más sectores ven en esta tecnología una forma efectiva de reducir riesgos, mejorar la eficiencia operativa y tomar decisiones pues el objetivo de un **DT** es plasmar tanto el presente como el futuro del objeto que refleja de forma apegada a la realidad pues constantemente se retroalimentan de esta.

Esta aproximación de obtener una representación en tiempo real de un objeto que esta involucrado en alguna actividad productiva permite aportar valor al proceso o producto en diferentes etapas de la vida del mismo como es la preproducción a través de aprovecharlo como herramienta de apoyo a la investigación y el desarrollo, gracias a su capacidad de monitorear, ver reflejado de manera explícitamente visual el proceso y su desempeño en el entorno virtual de la misma forma que los datos arrojados por este son de gran utilidad a la hora de analizar la eficiencia que se ha estado presentando y por último también facilitan decidir que hacer con maquinaria y productos que han alcanzado el final de su vida útil, evaluar si hay posibilidad de reciclarlos, reusarlos o comparar métodos para desechar el mismo. [Borole, *et al.*, 2023]

Arquitectura de los gemelos digitales

Parte fundamental de las diferencias entre un DT y una simulación es que el primero tiene un vínculo con el mundo real, conexión que permite la comunicación bidireccional pues la contraparte digital se alimenta de los datos del objeto real para mejorar su fidelidad a este último y de la misma manera, la parte real obtiene mejoras en su funcionamiento a través del conocimiento generado de haber evaluado diversas propuestas en el DT.

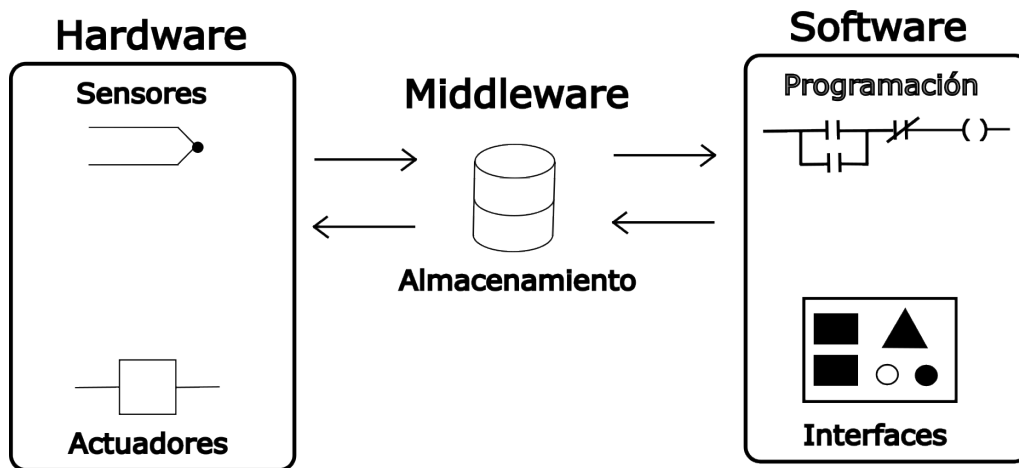


Figura 2.2 Arquitectura de un gemelo digital.²

³ La forma en que se estructuran los DT puede constar de tres partes como se observa en la Figura 2.2, el hardware, el *middleware* y el software que corresponden al campo real, el puente de comunicación y el ambiente digital respectivamente, a continuación ahondaré a profundidad en cada uno para comprender sus funciones en la conformación de un DT.

El primer y más tangible de los componentes de un DT son todos aquellos dispositivos físicos que encontramos relacionados al objeto que se desea digitalizar como son los sensores o los actuadores del mismo, los primeros ayudan a sincronizar y agregar fidelidad al DT mientras que los últimos además de igualmente aportar en este sentido añaden la capacidad de interacción directa desde la plataforma virtual. De esta forma es que se establece un vínculo bidireccional entre la parte física y digital. De la misma manera las redes *IIoT* igualmente forman parte del hardware de un DT de la misma forma que todo lo relacionado a la comunicación entre el objeto en si y la computadora en que se alberga el gemelo, esto implica piezas como los enrutadores e interruptores de red. [Borole, *et al.*, 2023]

³Fuente: elaboración propia

El paso intermedio entre el mundo real y virtual no se encuentra en todos los tipos de **DT**, sólo en aquellos que lo necesiten para sus funciones, en caso de estar ausente la comunicación es directa entre el software y el hardware a través de algún protocolo de comunicación.

El *middleware* es todo aquel software que se encarga de recopilar datos, almacenarlos, organizarlos y si es necesario depurarlos o aplicarles un preprocesamiento para que el **DT** pueda obtener de ellos el mejor provecho posible. Por ultimo se encuentra el **DT** que reside en un entorno completamente virtual, con sus funciones y actividades internas que pueden o no utilizar información proporcionada desde su contraparte física y de la misma manera puede a voluntad del operador virtual, interactuar con el proceso real a través de los actuadores dados de alta para ese propósito. [Borole, *et al.*, 2023]

Limitaciones de los gemelos digitales

Los **DT** representan una herramienta relevante e innovadora para la industria moderna, aún con estas características es importante reconocer sus limitaciones, tanto en el ámbito técnico como operativo. Trabajar en un entorno virtual no elimina los desafíos propios de la ingeniería, la simulación y el modelado con respecto al comportamiento real de los sistemas pues este habrá de ser construido por personas especializadas en ello.

Una de las principales limitantes es que el modelo simulado sólo puede representar aquello que fue definido por el ingeniero, esto lo vuelve estático, para cambiar a lo largo del tiempo se tienen que añadir y actualizar características constantemente. Si el comportamiento del sistema real cambia debido al desgaste, a condiciones ambientales o a variables no contempladas, el gemelo no podrá reflejar estos cambios, para ello se habrá de actualizar el **DT** manualmente, lo que añade un factor de mantenimiento al mismo para que continúe apegado a la realidad.

Entre las principales limitaciones técnicas destacan:

- **Fidelidad del modelo dinámico:** En la mayoría de los casos, el comportamiento dinámico completo de la máquina es complejo y difícil de replicar de manera precisa y profunda. Se puede optar por añadir dinámica y cambio a través del tiempo de la misma forma que mantenerlo puramente cinemático y que se comporte de la misma manera siempre, cada una tiene sus ventajas, en general con la segunda opción es suficiente para los fines de visualización o interacción, pero limitada en cuanto a fenómenos físicos como fricción, inercia o deformaciones, si estas son necesarias para los experimentos que se planean ejecutar habrán de integrarse al gemelo en forma de dinámica.
- **Capacidad de cómputo:** Modelar componentes con gran fidelidad a través de aumentar la cantidad de polígonos es muy costoso computacionalmente, especialmente si se usan físicas complejas o interacción entre múltiples cuerpos, requiere mayor capacidad de procesamiento, lo cual puede afectar el rendimiento del sistema o entorpecer su ejecución en tiempo real.
- **Dependencia de herramientas especializadas:** El desarrollo de un **DT** requiere software especializado y experiencia técnica para modelar, configurar aspectos físicos y vincular el sistema a un entorno de control real o emulado. Esto puede limitar su adopción en empresas que no cuenten con recursos o personal capacitado para estos fines.
- **Sincronización con el sistema real:** Para lograr una representación fiel y que proporcione ventaja competitiva en entornos industriales, el **DT** debe sincronizarse en tiempo real con el sistema físico para obtener datos de sus sensores. Para esto se necesita implementar comunicación

entre el entorno real y virtual lo que implica protocolos robustos, establecer una red cibersegura, almacenar y administrar correctamente la información obtenida, algo que puede representar un gasto en equipo y personal considerable.

- **Interacción limitada con señales analógicas:** Simular entradas y salidas digitales es algo que se realiza en un **DT** con facilidad, por otro lado replicar condiciones analógicas como vibraciones, temperatura variable o flujo sigue siendo una tarea compleja que se puede optar por omitir y aplicar una simulación más sencilla del fenómeno.

Reconocer estas limitaciones es importante para definir el valor de los **DT** y sus casos de uso, pues es natural que estos no se puedan utilizar en todos los proyectos pues empresas emergentes o procesos sencillos no pueden costear o no necesitan un entorno virtual para sus procesos. Para ambos casos es importante esta información pues permite tomar decisiones de diseño más realistas y dirigir los esfuerzos hacia los aspectos que verdaderamente aportan al proceso y a la actividad económica para la que se decidió crear un **DT**.

2.1.3. Integración de gemelos digitales con realidad virtual

Realidad aumentada y realidad virtual

En los últimos años tanto la **AR** y como la **VR** han pasado de ser tecnologías asociadas al entretenimiento para volverse herramientas con un papel relevante en la industria, específicamente en la formación técnica. La principal característica que las vuelve atractivas para este propósito es la capacidad que tienen de controlar la percepción del usuario que porta un visor diseñado para ello. Existen ciertas diferencias entre ambas tecnologías pues la **AR** añade información digital sobre el entorno físico mientras que la **VR** sustituye por completo dicho ambiente con uno generado digitalmente, estas diferencias se aprecian con mayor claridad en la tabla 2.2.

Ambas aproximaciones permiten al usuario interactuar con elementos virtuales en tiempo real y en condiciones controladas a través de dispositivos como *Microsoft HoloLens* en el caso de la **AR**, o *Meta Quest 3* para la **VR**. Esta variedad de hardware con su respectivo software de desarrollo permite la diversificación de aplicaciones pues en el ámbito industrial se han adoptado para actividades como la visualización procesos o instalaciones y la capacitación de personal.

Tabla 2.2 Comparación entre realidad aumentada y realidad virtual.

Aspecto	Realidad Aumentada	Realidad Virtual
Entorno	Mezcla elementos digitales con el entorno físico.	Reemplaza completamente el entorno real por uno virtual.
Nivel de inmersión	Parcial: el usuario percibe el mundo real pero con elementos digitales añadidos.	Total: el usuario percibe únicamente el entorno virtual.
Dispositivos	Visores semitransparentes (<i>Microsoft HoloLens</i>).	Visores con pantallas de alta resolución (<i>Meta Quest 3</i>).
Uso con gemelos digitales	Superpone información sobre la máquina física, es útil para operación y mantenimiento.	Permite interactuar con el DT en un entorno virtual, es ideal para entrenamientos riesgosos.

Para el caso específico de la aplicación en entrenamiento de personal se optó por el uso de **VR** pues ofrece ventajas para este propósito como son la capacidad de realizar la rutina de capacitación definida sin necesidad de moverse físicamente.

Ventajas de la integración de gemelos digitales en realidad virtual

La **VR** ofrece un entorno completamente controlado en el que se puede recrear con fidelidad la máquina y el proceso al que pertenece. Se puede remarcar como diferencia que mientras la **AR** actúa como complemento del mundo real, la **VR** permite aislar al usuario en un ambiente virtual y controlar totalmente la experiencia. Esto facilita el desarrollo de entrenamientos en los que se pueden simular condiciones normales de operación o escenarios de emergencia sin peligro real para el que los experimenta además de poder generar métricas de su desempeño.

La **VR** no se limita a ser una simple representación visual, su comunicación continua con el entorno virtual que provee un **DT** permite al usuario estar en un entorno muy semejante al real que se comporta de manera verosímil, lo que permite una preparación sólida del personal en la operación de la trituradora en condiciones seguras y controladas. El uso de **VR** ofrece la ventaja de validar configuraciones nuevas y analizar la disposición de equipos antes de su instalación, lo que facilita la detección temprana de problemas ergonómicos o de seguridad y por lo tanto evitar errores que podrían incrementar los costos de implementación del proceso.

En este trabajo, se emplea la **VR** como una herramienta para la formación de operadores, con el objetivo de que la capacitación trascienda el conocimiento teórico y brinde la posibilidad de interactuar en un entorno simulado, observando de manera clara el funcionamiento de la máquina y practicando procedimientos sin exponerse a riesgos, convirtiéndose en una fase previa al contacto con la planta real. Gracias a esta integración es posible visualizar el comportamiento del sistema e interactuar con él, reproducir rutinas de trabajo, entrenar maniobras de encendido o resolver fallos en un espacio sin riesgos físicos ni necesidad de afectar la operación real.

Entre las ventajas principales de este enfoque destacan:

- Realizar entrenamientos seguros para el usuario y la producción.
- Repetir prácticas de manera ilimitada sin desgaste ni afectación a equipos.
- Recibir retroalimentación inmediata mediante avisos visuales o métricas de desempeño.
- Realizar operaciones en condiciones normales y de emergencia.
- Exploración del proceso de formas que es imposible en la realidad como puede ser por dentro de la maquinaria.

2.2. Trituradoras de residuos orgánicos

El presente trabajo se centra en el proceso de pretratamiento de residuos orgánicos desarrollado en un proyecto de carbonización hidrotermal. Dentro de este proceso, la primer etapa comienza con una trituradora horizontal de la marca Bomatic, la cual constituye el punto de partida para el desarrollo del **DT** implementado en este estudio. El objetivo de esta trituradora es reducir el tamaño de los residuos sólidos orgánicos urbanos, que llegan en condiciones y dimensiones muy variadas debido a la ausencia de un tratamiento previo. Al homogenizar y entregar una masa más uniforme, se facilita la alimentación a las etapas posteriores.

2.2.1. Principios de funcionamiento de una trituradora de residuos

El principio de operación se basa en un sistema de doble eje equipado con cuchillas o discos dentados que giran en sentidos opuestos. Este movimiento genera un efecto combinado de arrastre y corte, reduciendo progresivamente el tamaño del material a medida que atraviesa la tolva de alimentación. El suministro de residuos se realiza mediante un cargador frontal que transporta la materia desde el exterior hasta la trituradora, de modo que la máquina opera únicamente durante el tiempo en que cumple su función, apagándose al finalizar. Esta trituradora se opera con un sistema basados en un **PLC**. A través del mismo y su respectivo gabinete se gestionan rutinas de arranque y paro.

El diseño de este modelo de trituradoras de la serie extra fuerte permite procesar hasta 75 toneladas por hora, aunque en la práctica del proyecto se alimenta con cerca de una tonelada por hora. Este sobredimensionamiento se realizó con la intención de que el equipo nunca trabaja en condiciones de sobrecarga, lo cual prolonga su vida útil y asegura estabilidad operativa. Su robustez y capacidad de procesamiento las hacen ideales para plantas que requieren altos volúmenes de trabajo, aunque en este caso la máquina opera con una fracción de su potencial. **[UnoReciclaje/Bomatic, 2025]**

La respuesta a condiciones críticas como atascamientos o sobrecargas está integrada en la trituradora misma pues el fabricante las ofrece con esta funcionalidad ya implementada (**[UnoReciclaje/Bomatic, 2025]**). Las señales de control operan en bajo voltaje y pueden comunicarse fácilmente con el **DT** mediante el protocolo *Ethernet/IP*, lo que permite vincular la operación física con su representación virtual.

2.2.2. Datos técnicos

La primer máquina que nos encontramos en el proceso que deseamos replicar en un entorno virtual es la trituradora que figura en el título de este trabajo, esta es de marca Bomatic, perteneciente a su serie extra fuerte modelo B1700DD como puede observarse en la Figura **2.3** que opera a 440 volts de corriente alterna y está diseñada con dos rotores de cuchillas en paralelo que giran a bajas revoluciones por minuto para empujar el material hacia el centro, entre ambos ejes, para cortarlo. Incluye protección contra sobrecarga pues por defecto tienen un sistema de reversa automático cuando se presenta un objeto demasiado capaz de detener el movimiento.

El propósito de esta serie de equipos es el pretriturado de diversos materiales como son caucho de neumáticos, perfiles metálicos como aluminio e incluso acero además de máquinas enteras como fotocopadoras. Este proceso corta los objetos en tiras para que posteriormente sean más fáciles de procesar, en el caso del pretratamiento que nos ocupa (**[UnoReciclaje/Bomatic, 2025]**).

Los elementos principales de una trituradora horizontal son los tres siguientes sistemas:

- **Sistema de trituración:** formado por los ejes y cuchillas, responsables de cortar mecánicamente el residuo.
- **Sistema de alimentación:** compuesto por una tolva encargada de almacenar y conducir el material hacia las cuchillas antes mencionadas.
- **Sistema de motores:** cada eje con sus respectivas cuchillas tiene acoplado un motor eléctrico trifásico de 55 kW que transmite torque a través de su respectivo eje.

El **DT** permite representar con precisión estos componentes, simulando tanto la operación normal como posibles fallas. Esto es clave para la validación de rutinas de control, evaluación de modificaciones

⁴Tomada de **[UnoReciclaje/Bomatic, 2025]**



Figura 2.3 Datos de la trituradora horizontal proporcionados por el fabricante ⁴

estructurales sin exponer el equipo físico y la capacitación de personal, esta última siendo la aplicación que se le pretende dar en este trabajo.

2.2.3. Operación y seguridad en el uso de trituradoras

El uso de una trituradora implica riesgos asociados tanto a la potencia mecánica de la máquina como al voltaje que se le suministra. Por ello, la operación deben regirse por instrucciones claras que aseguren la seguridad del operador.

El mayor peligro proviene de la exposición a los ejes y cuchillas en movimiento. Toda intervención en la tolva de trituración debe realizarse únicamente con el equipo completamente apagado, lo que se puede comprobar al asegurarse que el interruptor principal esté en posición OFF. Una capacitación adecuada del personal en el uso del equipo es indispensable, en este aspecto, el DT desarrollado en este proyecto representa una herramienta clave para entrenar en la correcta ejecución del procedimiento de encendido seguro en un entorno libre de riesgos.

Riesgos operativos en el tratamiento de residuos orgánicos

El uso de una máquina cuyo propósito es triturar implica una serie de riesgos operativos que deben ser considerados con especial cuidado para asegurar la seguridad del operador. La trituradora horizontal empleada en este proyecto es un equipo de gran tamaño y potencia, diseñado para procesar grandes volúmenes de residuos. Si bien su robustez garantiza una operación continua, también representa un alto riesgo para los empleados que interactúan con ella.

Los riesgos más críticos se asocian al contacto con los ejes y cuchillas en movimiento, estos son elementos con gran torque y capacidad de destruir materiales duros por lo que una accidente que la involucre puede ocasionar daños severos en el afectado. A esto se suma la naturaleza eléctrica de los motores que hacen posible el movimiento de las cuchillas por lo que equipo de seguridad es necesario para la interacción con los elementos energizados como es la trituradora misma y su gabinete de control.

Otros riesgos comunes en este tipo de maquinaria tanto para el proceso como para el operador son por ejemplo sobrecargas mecánicas en los ejes, que pueden provocar sobrecalentamiento de los motores y fallas en la transmisión debidas a una mala operación como puede ser encender la trituradora con la tolva llena o un atascamiento debido a un objeto demasiado duro.

Si bien la seguridad del operador es la mayor prioridad también son relevantes los impactos materiales: daños a la maquinaria, detenciones no programadas en la producción y pérdidas económicas debidas a cualquiera de las dos situaciones antes mencionadas. Esto remarca la importancia de una capacitación correcta del operador para asegurar tanto su seguridad como la del proceso y el producto final.

En este contexto, el uso de un DT representa una herramienta relevante. Al trasladar la capacitación a un entorno virtual, se pueden exponer a trabajadores a escenarios de riesgo como atascamientos, sobrecargas o paros de emergencia sin comprometer la seguridad del personal ni de la planta real. De esta forma, el operador puede aprender a operar en condiciones correctas y responder de manera adecuada a emergencias. La característica más valiosa de esta aproximación es la posibilidad de repetir los procedimientos cuantas veces sea necesario para que el operador desarrolle conciencia de seguridad y comprenda su labor a desempeñar [Borole, et al., 2023].

Operación correcta de la trituradora de residuos orgánicos

Para la operación correcta de la trituradora basta con seguir los siguientes pasos:

1. Comprobar que nadie esté trabajando dentro de la máquina y que la tolva esté despejada de objetos como pueden ser garrochas, cubetas, mangueras u otros objetos que pueden haber sido usados para eliminar un atascamiento.
2. Girar la llave para energizar el controlador y la **HMI**, esperar a que esta última encienda.
3. Presionar el botón etiquetado *Reset*.
4. Colocar el interruptor principal en posición *ON*
5. Seleccionar el modo de operación automático, dentro de este el arranque automático y esperar a que se termine de ejecutar la secuencia de arranque.
6. Por último indicar al operador del cargador frontal que deposite una carga de material en la tolva de la trituradora.

Con la realización de los pasos anteriormente mencionados en el orden que se aprecia se asegura que la trituradora ha sido operada correctamente. Para facilitar al operador recién ingresado a la empresa la memorización y comprensión de estos pasos en un entorno seguro es que se propone el uso de un **DT** como entorno para generar la capacitación en la operación de la máquina ya mencionada.

2.3. *Emulate3D* y su aplicación en la industria

El **DT** de un proceso industrial puede ser tanto una herramienta de visualización como un recurso estratégico para el diseño y validación del mismo. Entre las plataformas disponibles de desarrollo se eligió *Emulate3D* pues destaca por su capacidad de integrar la representación tridimensional de los equipos con su comportamiento dinámico y con la lógica de control implementada en un **PLC** físico o virtual.

2.3.1. *Emulate3D* en procesos industriales

A diferencia de otros programas de modelado especializado en **DT**, que se centran en aspectos estructurales o en la animación visual, *Emulate3D* permite que cada componente del modelo virtual responda en tiempo real a señales de control, sensores y actuadores. Esta característica lo convierte en una herramienta idónea para proyectos complejos donde se busca tener una versión digital de la planta real ya sea para evaluar modificaciones, generar capacitaciones, operación remota o promocionarla con recorridos virtuales.

Mientras que los modelos **CAD** tradicionales se limitan a una representación bidimensional o tridimensional estática de la máquina, *Emulate3D* permite dotar a cada componente de movimiento y comportamiento lógico. Motores, pistones y bandas transportadoras pueden ser animados y vinculados a entradas y salidas reales o emuladas, generando un entorno interactivo que responde en tiempo real a las acciones del operador.

La integración con software de *Rockwell Automation* amplifica estas capacidades, ya que el software **FT Echo** emula un **PLC** físico y permite ejecutar la lógica de control como si se tratara del sistema real. Esto evita la necesidad de contar con hardware durante las fases iniciales del proyecto y permite detectar errores de programación en etapas tempranas.

Comisionamiento virtual

El comisionamiento virtual permite la interacción del **DT** con el mundo real o con un emulador del mismo para realizar pruebas sin riesgo de pérdidas económicas. En este ámbito, *Emulate3D* es una herramienta que permite representar no solo visualmente con una representación tridimensional de los equipos, sino también su lógica de control e interfaces. Esta conectividad permite enlazar directamente los objetos virtuales con rutinas de control, reproduciendo con fidelidad la interacción entre sensores, actuadores, tableros de control y las **HMI**.

Una característica central de *Emulate3D* es su capacidad de comunicarse con controladores físicos o virtuales mediante protocolos industriales, su mayor aporte es la facilidad que ofrece para hacer esta conexión pues soporta más de 15 protocolos de comunicación como son *Ethernet/IP*, *Modbus* o *Profinet* por mencionar algunos. Este enfoque es particularmente valioso en equipos pesados o procesos que no pueden detenerse, donde los costos de operación o de un error durante las pruebas de una nueva lógica de control son elevados. Entre sus principales ventajas se destacan:

- Independencia del **PLC** físico durante las pruebas preliminares.
- Reducción de riesgos al realizar ensayos sin exponer ni al personal ni a los equipos reales.
- Depuración acelerada de la programación gracias a la retroalimentación inmediata del entorno virtual.
- Entrenamiento inmersivo de operadores en condiciones simuladas de operación normal y de emergencia.

2.3.2. Comparación con otras plataformas de simulación industrial

Diferencias clave con otras plataformas

El mercado actual de los **DT** y la simulación industrial ha crecido de manera significativa, ofreciendo soluciones con alcances muy distintos dependiendo del propósito para el que fueron desarrolladas. Como se muestra en la tabla **2.3**, algunas plataformas se centran en la gestión de datos o en la representación visual, mientras que otras, como las de la tabla **2.4**, se orientan hacia aplicaciones industriales donde la comunicación con controladores y procesos reales es fundamental.

Plataforma	Puntos fuertes	Puntos débiles	Mercado objetivo
Azure Digital Twins (Microsoft)	Gemelos como grafos, integración con <i>IoT</i> y servicios <i>Azure</i> .	No incluye simulación física detallada ni visualización 3D nativo; depende de integraciones.	Edificios inteligentes, plantas, ciudades, soluciones <i>IoT</i> a escala.
NVIDIA Omniverse	Visualización fotorrealista, simulación física en tiempo real y colaboración multi-usuario.	Requiere inversión en tarjetas gráficas aptas; orientado a visualización.	Automotriz, robótica, diseño industrial, electrónica.
Hexagon (HxGN Smart Digital Twin)	Fuerte en geomática, modelado espacial para construcción.	Menos centrado en control o maquinaria discreta.	Infraestructuras, minería, construcción.
OpenTwin (código abierto)	Plataforma libre para investigación y desarrollo fácil de integrar con otras plataformas.	Soporte industrial limitado; requiere mayor esfuerzo para escalar.	Academia, centros de investigación, empresas emergentes.

Tabla 2.3 Plataformas de gemelos digitales con enfoque general, urbano, académico o visual.

Plataforma	Puntos fuertes	Puntos débiles	Mercado objetivo
<i>Emulate3D (Rockwell Automation)</i>	Foco en comisionamiento virtual, emulación de lógica en PLC y modelado de líneas de producción. Integración con entornos de automatización industrial.	Limitado en visualización fotorrealista; no es apto para IIoT masivo.	Integradores de automatización, equipos de comisionado y validación de control.
Siemens Xcelerator	Suite integral ciclo de vida del producto, CAD y simulación.	Curva de aprendizaje y coste altos; requiere alineación con el ecosistema Siemens.	Grandes fabricantes (automotriz, aeroespacial).
ANSYS Twin Builder	Simulación física avanzada y modelos predictivos robustos.	Requiere experiencia previa en software de ANSYS.	Investigación y desarrollo, centros de ingeniería.
IBM Maximo Application Suite	Mantenimiento, flujo de trabajo, inspección y analítica de activos.	No es una plataforma 3D nativa; foco en gestión de activos.	Energía, transporte, industrias con activos críticos.
PTC ThingWorx	Plataforma IIoT para telemetría y desarrollo ágil de aplicaciones.	Simulación física avanzada y 3D dependen de integraciones con otros de sus productos (Creo/Vuforia).	Integradores IIoT , empresas de manufactura conectada.
Dassault 3DEXPERIENCE	Fuerte en diseño 3D y colaboración, manejo del ciclo de vida del producto.	Coste y complejidad altos; orientado a grandes fabricantes.	Aeroespacial, automotriz.
AVEVA (InTouch/-PI/Digital Twin)	Integración con supervisión y adquisición de datos, operación en tiempo real.	Visualización 3D limitada; suite amplia y compleja.	Procesos industriales, derivados del petróleo.
GE Predix / Digital Ghosts	Histórico en IIoT ; analítica industrial y modelos de activos.	Ecosistema fragmentado; menor adopción reciente comparado con Azure.	Industria pesada, energía.
Bosch IoT Suite	Servicios IIoT para gestión de dispositivos, telemetría e integración.	Requiere integraciones para 3D o simulación avanzada.	IIoT movilidad, manufactura.

Tabla 2.4 Plataformas de gemelos digitales con enfoque industrial.

Entre las primeras se encuentra *Azure Digital Twins*, software de *Microsoft* que opera como servicio y destaca por su capacidad para manejar relaciones entre objetos a gran escala. Resulta muy útil en la supervisión de edificios inteligentes o entornos urbanos conectados, aunque no incluye simulación física ni representación tridimensional nativa. En un enfoque distinto, *NVIDIA Omniverse* ofrece un entorno visual de gran realismo, con colaboración en tiempo real, pero está totalmente orientado al diseño y la visualización fotorrealista.

Por otro lado, plataformas industriales como *Emulate3D*, *Siemens Xcelerator* o *ANSYS Twin Builder* se enfocan en tareas directamente relacionadas con la automatización, la simulación de procesos y la validación de lógica de control. *Emulate3D*, desarrollada por *Rockwell Automation*, ocupa un punto intermedio muy interesante: combina animación tridimensional, modelado físico y conexión directa con *PLC*. Esta característica permite validar el comportamiento de un sistema automatizado completo antes de que exista físicamente, lo cual la diferencia de *Xcelerator*, que tiene un enfoque más amplio dentro del ciclo de vida del producto, o de *Twin Builder*, la cual se centra en la simulación física con un grado de detalle superior.

El valor de *Emulate3D* está precisamente en el punto medio. No requiere la infraestructura ni el nivel de especialización de las suites completas de ingeniería, pero conserva la fidelidad suficiente para representar procesos industriales reales. Esto la convierte en una herramienta accesible y potente tanto para validar secuencias de control como para los fines de capacitación y formación técnica en ambientes controlados que nos interesan.

Alcances industriales y educativos

La flexibilidad de *Emulate3D* ha permitido que sea adoptada tanto por la industria como por instituciones educativas, aunque cada uno con finalidades distintas. En entornos industriales, su uso se ha consolidado en tareas de comisionamiento virtual, donde se prueban y validan rutinas de control antes de su implementación real, reduciendo con ello tiempos de arranque y evitando riesgos durante las pruebas. Su integración con herramientas como *Studio 5000 Logix Designer* y *FT Echo* hace posible conectar modelos virtuales con controladores reales o emulados, creando un entorno donde el comportamiento del sistema puede observarse y corregirse sin detener la producción.

En el ámbito educativo, la misma herramienta adquiere otro valor: el de acercar a los estudiantes al funcionamiento de los sistemas de automatización sin necesidad de disponer de la infraestructura física. Desde la perspectiva didáctica, ofrece una forma de comprender la interacción entre sensores, actuadores y rutinas de control dentro de un espacio tridimensional que responde a las acciones del usuario. La posibilidad de integrar visores de *VR* y entornos *HMI* como *FT Optix* añade un componente inmersivo que transforma la capacitación tradicional en una experiencia práctica.

En este proyecto, *Emulate3D* se utilizó para representar fielmente el comportamiento de la trituradora horizontal y los sistemas que la acompañan. Gracias a esto, se diseñó una experiencia de capacitación inmersiva que reproduce de forma realista cada paso del encendido de la máquina. A diferencia de otros entornos que tienen enfoques visuales o conceptuales, como los de la tabla 2.3, esta aproximación usa la lógica de control industrial auténtica, permitiendo al usuario comprender las consecuencias reales de sus acciones dentro del entorno simulado.

Limitaciones y consideraciones en su uso

A pesar de las ventajas que ofrece, es necesario reconocer que *Emulate3D* también presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al implementarse en un proyecto. Una de las más evidentes es la curva de aprendizaje que implica dominar tanto el modelado físico como la animación dinámica o cinemática. Configurar modelos con comportamientos realistas demanda tiempo, planeación y recursos computacionales adecuados, sobre todo cuando se requiere un alto nivel de detalle en las animaciones o una conexión en tiempo real con controladores externos.

La naturaleza de la tecnologías mencionada es puramente digital por lo que necesita de herramientas de cómputo que compartan esta característica y estos dos aspectos ha demostrado con el tiempo

una serie de ventajas y desventajas que se pueden observar en la tabla 2.5 y que son inherentes a su naturaleza binaria.

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas del uso de realidad virtual en *Emulate3D*

Ventajas	Desventajas
Es una alternativa de menor costo en comparación con prototipos físicos o pruebas directas en planta.	La fidelidad de la dinámica depende completamente de los modelos matemáticos y datos utilizados.
Permite a los operarios practicar en un entorno virtual seguro, reduciendo riesgos de accidentes durante la capacitación.	Requiere constante actualización para reflejar condiciones reales (desgaste, variaciones ambientales, fallas imprevistas).
Posibilita simular escenarios críticos o de emergencia sin comprometer personas, equipos ni producción.	La simulación de fenómenos físicos complejos (fricción, vibraciones, deformaciones) suele simplificarse, afectando la precisión.
Facilita la comprensión de procedimientos y protocolos mediante visualización e interactividad inmersiva.	Modelos de alta precisión demandan gran capacidad de cómputo, lo que puede afectar el desempeño en tiempo real.
Reduce tiempos de desarrollo y puesta en marcha al evitar detenciones de planta o pruebas físicas costosas.	El desarrollo requiere software especializado y personal con competencias avanzadas en simulación, control y VR.
Permite crear, validar y optimizar variaciones de diseño sin afectar la operación real.	Mantener sincronización en tiempo real con el sistema físico implica retos en comunicación, latencia y ciberseguridad.
Habilita el comisionamiento virtual al enlazar el gemelo con un PLC real o emulado, validando lógica de control antes de implementarla.	La integración con señales analógicas ruidosas, entornos no controlados o datos incompletos puede limitar su efectividad.
Posibilita repetir la capacitación ilimitadamente sin generar desgaste de equipos ni gastos adicionales.	La adopción inicial puede ser costosa para pequeñas empresas, tanto en infraestructura tecnológica como en licencias de software.
Se integra con tecnologías inmersivas (RV/-RA), incrementando motivación, retención del conocimiento y transferencia a la práctica real.	Existen riesgos de sobredependencia tecnológica: el entrenamiento virtual no sustituye completamente la experiencia en campo.
Contribuye a la seguridad laboral al reforzar la conciencia de riesgos y protocolos de emergencia.	Los resultados dependen de la aceptación cultural de la tecnología en los operarios y del diseño didáctico del entorno virtual.

Estas características lo vuelven bastante atractivo para los sistemas industriales pues es una forma muy visual y explícita de generar propuestas y presentarlas lo cual facilita mucho la toma de decisiones ya que estas se pueden visualizar y son virtualmente tangibles, aportando mucha certeza tanto a las personas involucradas en el contexto técnico como en el administrativo o ejecutivo.

Otra consideración importante es que, aunque la plataforma permite la conexión directa con **PLC** reales o virtuales mediante protocolos como *EtherNet/IP*, su desempeño óptimo depende de una configuración correcta de los dispositivos y de la infraestructura de red. Además, las simulaciones muy complejas pueden requerir equipos con tarjetas gráficas y procesadores de alto desempeño para mantener un buen rendimiento, especialmente si se utiliza en conjunto con visores de **VR**.

Estos retos quedan compensados por las ventajas que ofrece en términos de seguridad, eficiencia y formación técnica. El hecho de poder recrear el comportamiento completo de una máquina sin riesgo para el personal o el equipo real brinda un espacio de aprendizaje seguro, donde es posible equivocarse, corregir y volver a intentar. En contextos educativos, este tipo de entorno fomenta la comprensión práctica del usuario, mientras que en la industria se traduce en menos errores, menos tiempos muertos y una mejor preparación del personal antes de operar maquinaria real.

Al comparar las tablas **2.3** y **2.4** podemos notar cómo *Emulate3D* logra un equilibrio entre complejidad técnica y aplicabilidad práctica. Su capacidad de integrar simulación tridimensional, lógica de control y operación segura la convierte en una herramienta idónea para proyectos donde se busca unir el aprendizaje a través de **VR** con procesos industriales reales. De la misma manera podemos observar que este tiene capacidades limitadas en el área de la visualización realista, manejo del ciclo de vida de un producto y simulación física precisa por lo que si alguno de estos aspectos crucial para el proyecto, se habrá de optar por otro producto.

Capítulo 3

Diseño de un gemelo digital para una trituradora de residuos orgánicos

3.1. Modelado y simulación de la trituradora de residuos orgánicos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la plataforma *Emulate3D*, este software se centra en tres áreas principales. La primera es el desarrollo de la animación cinemática o dinámica del **DT**, la segunda consiste en el comisionamiento virtual de las máquinas e instrumentos ya sean sensores o actuadores y la tercera nos da la capacidad de generar una presentación tanto en video como en formato de **VR** para presentaciones o exposiciones pues ambas opciones son muy impresionantes visualmente, característica que se busca aprovechar.

3.1.1. Modelo tridimensional de la trituradora

El primer paso para la creación del **DT** es contar con una representación gráfica del sistema en software **CAD** como puede ser *Inventor* o *Solidworks*. El modelado tridimensional de la planta debe ser realizado con detalle tanto exterior como interior para su correcta implementación como **DT**, en este caso, el modelo fue proporcionado por Cecilia Zaldivar Velázquez, empleada de la empresa *Green 2 energy*¹ que opera la planta en cuestión. El diseño se generó en el software *Inventor*, donde es posible representar la disposición completa del espacio físico que ocupa la planta, incluyendo equipos, tolvas, tubería y áreas de acceso.

Una vez recibido el modelo, fue necesario realizar modificaciones para adaptarlo a los requerimientos del **DT**. En particular, se deben identificar y añadir los elementos ausentes en el archivo original, como las cuchillas de la trituradora que se pueden observar en la Figura 3.1 y uno de los dos tornillos sin fin, en específico el que se observa en la Figura 3.2. Incorporar estos componentes permite simular con precisión el comportamiento mecánico del sistema, especialmente en lo que respecta a la visualización e interacción con los residuos orgánicos durante el proceso de trituración y el transporte de estos a la siguiente etapa. Esta representación tridimensional constituye el nivel más básico del **DT** como se observa en la Figura 2.1, ya que, si bien refleja la geometría del sistema real, no incorpora aún movimiento ni interacción física.

¹Empresa con la que se colaboró para la realización de este proyecto

²Fuente: elaboración propia

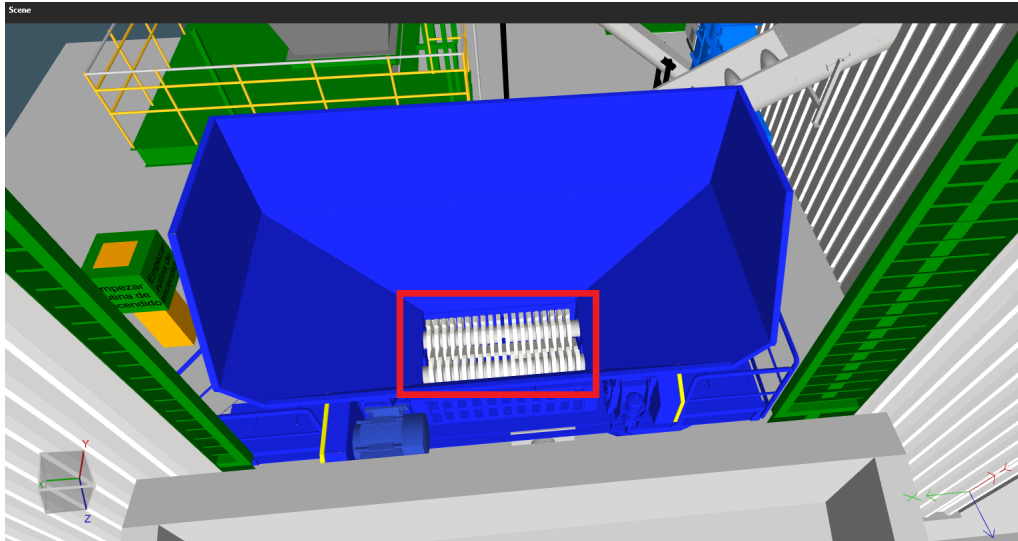


Figura 3.1 Cuchillas añadidas al modelo proporcionado.²

Emulate3D permite trabajar con diferentes tipos de archivos CAD (.ipt, .sldprt, .step, .igs, entre otros), se optó por utilizar el archivo original de tipo .iam, correspondiente al ensamblaje completo de la planta. Este tipo de archivo permite importar la jerarquía de componentes y conservar los materiales correspondientes a cada una de las piezas, lo cual facilita el trabajo posterior de animación e integración.

Una vez completado el modelo en *Inventor*, el siguiente paso es importarlo a la plataforma *Emulate3D* para comenzar a trabajar con él como base del DT. Este paso, aunque parece sencillo, implica considerar algunos aspectos técnicos. Por ejemplo, para lograr una importación exitosa desde *Inventor*, se requiere que dicho software esté instalado en el mismo equipo donde se ejecuta *Emulate3D*, ya que la conversión de formatos y estructuras depende de bibliotecas compartidas entre ambas plataformas a través de un *Ad-In* que se nos proporciona junto con el software de *Emulate3D*. Importarlo de esta manera nos asegura conservar los materiales que fueron asignados durante el diseño en *Inventor*.

3.1.2. Simulación del comportamiento operativo de la trituradora

Una vez que se importa el modelo CAD del objeto o proceso real al que se le quiere crear un DT en *Emulate3D* se puede trabajar con las diferentes herramientas que permiten emular el funcionamiento del mismo en este entorno virtual que nos proporciona el software. La primera fase consiste en dotar de movimiento a las piezas mecánicas, aplicando juntas de varios tipos como pueden ser cinemáticas o dinámicas de rotación, traslación o una mezcla de las dos. Con esto es posible animar las partes del modelo como pueden ser motores o pistones.

Cuando ya ha sido importado el modelo, aún no es capaz de interactuar con elementos como residuos u objetos simulados. Para que esto sea posible, es necesario asignar propiedades físicas a los componentes que tendrán contacto con la carga. Esta etapa es fundamental para simular comportamientos realistas, como el arrastre, la colisión o la caída de materiales a lo largo del sistema.

Para esto se usa la herramienta llamada *Kinematic Joint*, que puede ser de tipo **Revolute** (cuando gira, que deberá tener asociado un motor) o **Prismatic** (cuando se desplaza en línea recta, por ejemplo

un pistón). A partir de este punto se definen aspectos como el eje de rotación o traslación en el que se moverá, los puntos de anclaje que tomara como referencia y si el movimiento será controlado directamente por el usuario dentro del entorno virtual (con *Forward Kinematic*) o si reaccionará a fuerzas externas como son los motores que proporciona el software (usando *Inverse Kinematic*). Se deben asignar motores virtuales a las primeras uniones mencionadas, con los que se controla la velocidad, aceleración y dirección del movimiento, dando como resultado un comportamiento que imita al de la maquinaria real.

Después de animar partes mecánicas, se le asignan propiedades físicas a cada componente para que reaccione ante colisiones, peso o movimientos. *Emulate3D* permite aplicar varios tipos de geometrías físicas, desde formas simples como un cubo o esfera llamados *Box* o *Sphere*, hasta más complejas como la propiedad *Mesh Physics*, que envuelven la forma exacta del modelo. Esta parte es clave cuando se quiere, por ejemplo, simular la caída de un objeto o cómo este se comporta al ser arrastrado en una banda transportadora.

Con la animación y la física completadas, se pasa a la siguiente fase: el **comisionamiento virtual**. Mismo que será abordado de manera detallada más adelante, descrito de forma sencilla, este consiste en conectar el modelo tridimensional con un entorno de control, ya sea real o simulado, como el software *FT Echo*. La conexión se hace a través de diversos protocolos, en este caso *Ethernet/IP*, se configuran las entradas y salidas (tanto digitales como analógicas) que permiten controlar desde el *PLC* los distintos elementos del modelo. Usando la herramienta *IO Browser* de *Emulate3D*, se asignan direcciones específicas a variables del sistema, como encender un motor o leer un sensor. Así, se puede probar y validar toda la lógica del *PLC* en un entorno seguro y controlado, sin correr riesgos innecesarios en la planta tanto para la producción como para, más importante aún, los trabajadores.

Por último, la presentación en *VR* que nos proporciona *Emulate3D* permite exportar el modelo para verlo con visores de *VR* como los *Meta Quest 3*. Gracias a esto, los operadores o ingenieros pueden explorar el modelo a escala real, activar controles, observar el comportamiento de los sistemas y experimentar de manera interactiva cómo funcionará la planta, todo sin correr los riesgos que las máquinas y su funcionamiento representan.

Esta última parte es especialmente útil para dar capacitaciones, hacer demostraciones comerciales o validar si los espacios de trabajo son seguros y ergonómicos. Además, permite detectar errores de diseño antes de ser implementado el proceso real, lo cual ahorra mucho tiempo y dinero.

Aplicación de colisiones

El punto de partida fue la tolva de alimentación, ya que es el primer contacto de la carga con la máquina. En lugar de aplicar física solamente a la superficie visual de la canaleta, se optó por asignar propiedades físicas al conjunto completo que la compone, permitiendo una respuesta verosímil ante la interacción con las cargas simuladas.

Emulate3D ofrece distintas formas de generar superficies de colisión alrededor de las piezas, cada una con diferentes niveles de complejidad y precisión. Las opciones más relevantes y que se utilizaron son:

- *Box Physics*: genera una envoltura en forma de cubo.
- *MultiConvex Physics*: añade una geometría convexa que envuelve el modelo.
- *Mesh Physics*: crea una envoltura que sigue con gran fidelidad la forma real de la geometría.

En este caso, se eligió *Mesh Physics* como método principal misma que se puede apreciar en la Figura 3.2, ya que proporciona una representación más precisa del contorno real de la pieza. Si bien esta opción implica una mayor carga computacional, fue la que permitió un comportamiento más realista del material durante las pruebas. Al trabajar con procesos que implican movimiento continuo y contacto prolongado entre los residuos y componentes mecánicos, contar con una simulación detallada y fiel a la geometría real mejora significativamente la calidad de la simulación.

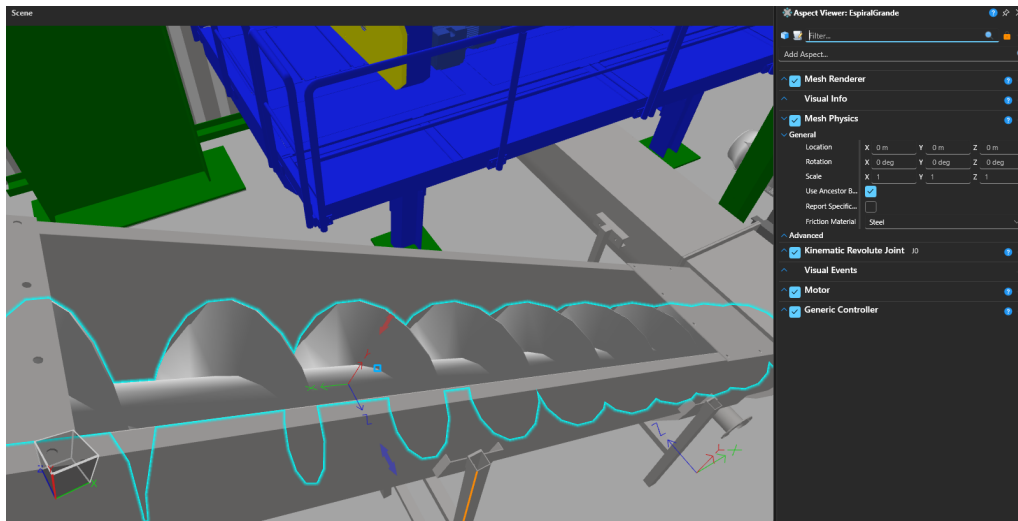


Figura 3.2 Propiedades que permiten a las piezas colisionar con caras simuladas³

Además de la canaleta, se asignaron propiedades físicas similares al tornillo sin fin y a la salida de la bomba de alta presión, ya que también están involucrados directamente en el transporte y transformación del material. Todos los elementos con propiedades físicas activas fueron gestionados mediante el panel de aspectos (*Aspect Viewer*) que se puede observar en la Figura 3.2, donde es posible verificar, modificar o eliminar las propiedades asignadas según sea necesario. Una de las características más importantes es el material que se le asume a la superficie de contacto pues este determina la fricción que experimentarán los objetos al colisionar, en este caso se seleccionó siempre **metal** como se observa en la Figura 3.2 pues es el material del que están fabricadas las piezas originales.

Con esta etapa, el modelo dejó de ser una representación puramente visual y pasó a convertirse en una estructura capaz de reaccionar ante las condiciones del entorno virtual, esto puede apreciarse en la Figura 3.3 en la que ya hay una interacción entre la trituradora y las cargas simuladas lo que aporta una gran fidelidad al comportamiento real de los residuos orgánicos que procesa esta máquina.

Aplicación de cinemática rotativa

El siguiente paso en la creación del DT⁴ es dotar al modelo de movimiento, permitiendo representar de manera más realista la operación de cada componente involucrado en el sistema. Para ello, se trabajó con animaciones cinemáticas aplicadas a los ejes rotativos, pistones y motores, y se utilizaron aspectos que permiten controlar su comportamiento dinámico. Esta sección detalla el proceso de simulación mediante cinemática y la incorporación de aspectos motrices.

³Fuente: elaboración propia

⁴Fuente: elaboración propia

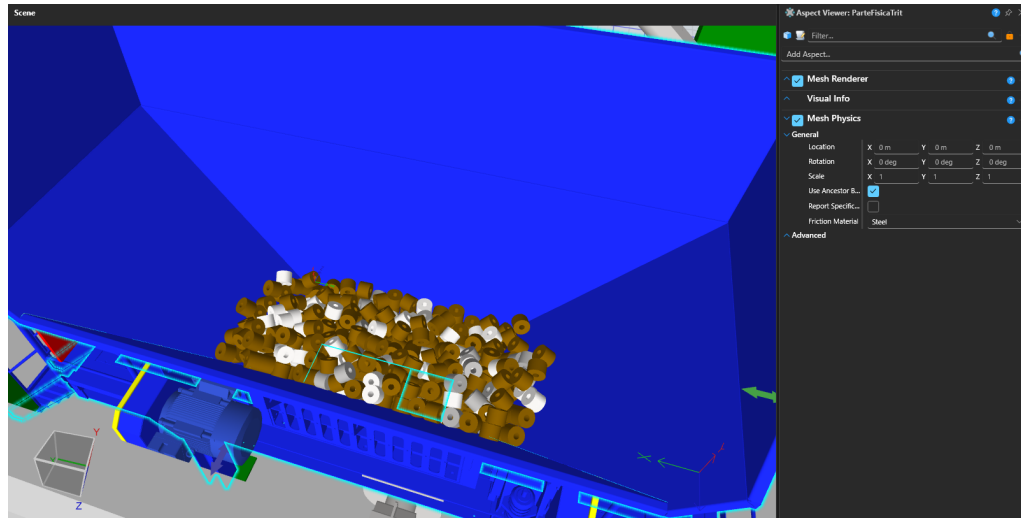


Figura 3.3 Interacción entre los residuos orgánicos simulados y la trituradora.⁴

La configuración del eje de rotación (*Axis*) y del punto de anclaje (*Anchor*) depende directamente de la geometría del modelo, el caso más sencillo es el de un cilindro en el cual el ancla está en el centro de una de sus caras circulares y el eje es normal al mismo como se ejemplifica en la Figura 3.4. En algunos casos, como el tornillo sin fin de la trituradora secundaria, se recurrió a usar otras superficies planas cercanas, como la canaleta, para definir correctamente la directriz y puntos de referencia, ya que los propios modelos presentaban inclinaciones que dificultaban la selección correcta de los mismos.

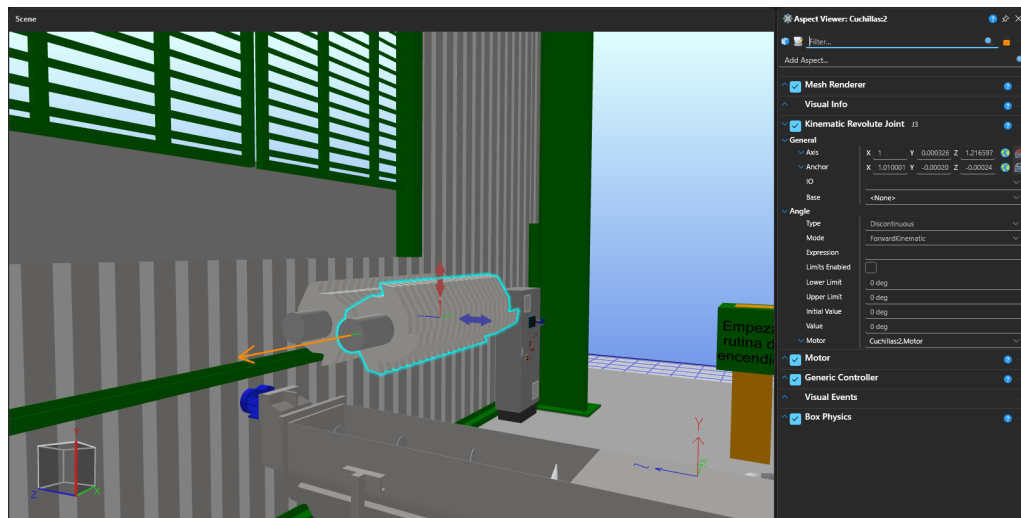


Figura 3.4 Eje asignado y propiedad de cinemática rotativa de las cuchillas.⁵

Para simular el movimiento de componentes como tornillos sin fin y ejes de la bomba, se utilizaron las propiedades de cinemática rotativa disponibles en *Emulate3D*. Estas se aplican mediante la herramienta *Kinematic Revolute Joint*, la cual permite que un objeto gire en torno a un eje con un único grado de libertad como puede observarse en la figura 3.5.

⁵Fuente: elaboración propia

⁶Fuente: elaboración propia

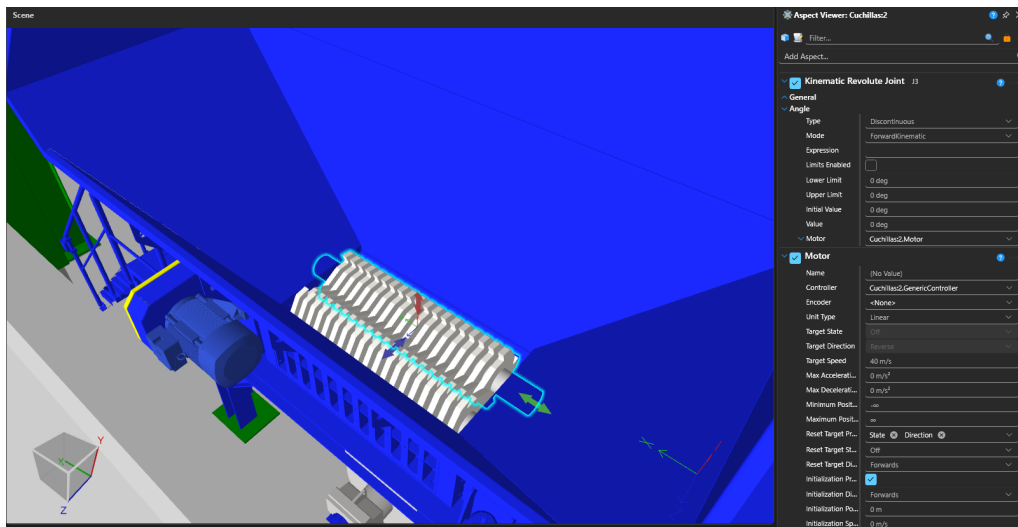


Figura 3.5 Propiedades de cinemática directa de las cuchillas y su motor asignado.⁶

Otro aspecto importante es el tipo de comportamiento cinemático que se desea representar. Se emplearon dos modos disponibles: **Inverse Kinematic** para las partes que no tuvieran un motor que las impulsara directamente y su movimiento fuera el resultado de la fuerza ejercida por alguna otra pieza por ejemplo la pala del cargador frontal cuya posición depende de la de los pistones (ver figura 3.7) y del brazo inferior como puede apreciarse en la figura 3.6 que carece de motor pero a través de la propiedad "Base" que lo fija a dos piezas motorizadas se efectúa su movimiento. De la misma manera, se puede utilizar **Forward Kinematic** para aquellos elementos que tuvieran algún dispositivo que las impulsara como es el caso de las cuchillas de la trituradora y los tornillos sin fin que tienen un motor asignado para su movimiento como se observa en las figuras 3.5 y 3.2.

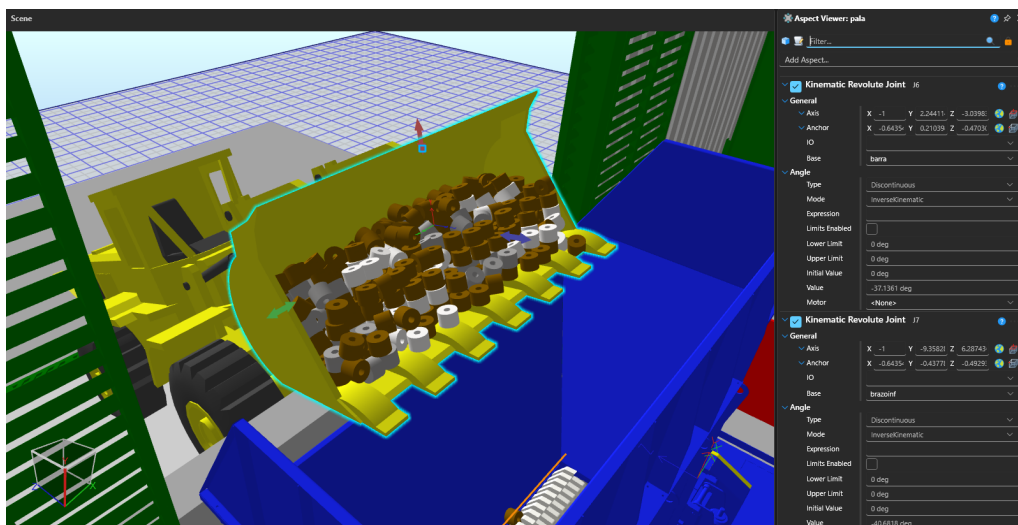


Figura 3.6 Pala del cargador frontal movido por los pistones con cinemática inversa.⁷

⁷Fuente: elaboración propia

Aplicación de cinemática prismática

En los elementos que requieren un movimiento lineal, como los pistones, se implementó *Kinematic Prismatic Joint*. Este tipo de unión permite simular la expansión o contracción del cilindro interior simulando una fuerza hidráulica. Para lograr un comportamiento correcto, fue necesario separar el vástago del cuerpo del pistón en el modelo **CAD** y establecer relaciones de base entre los elementos móviles y fijos como puede observarse en la Figura 3.7.

La dirección del movimiento se definió tomando como referencia un vector normal al centro de la cara circular del vástago que se observa en la figura 3.7 de la misma forma que se hizo con las cuchillas de la trituradora en la Figura 3.4.

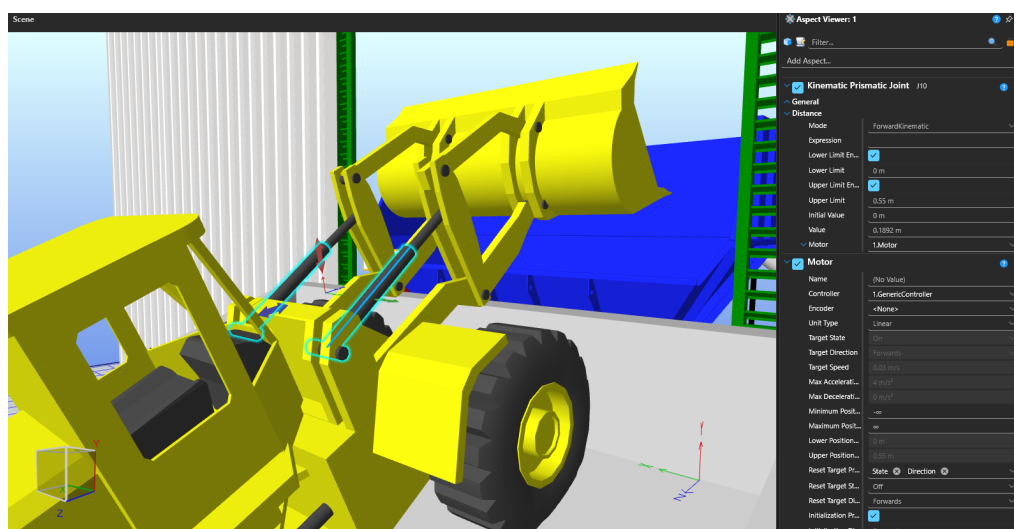


Figura 3.7 Pala del cargador frontal movido por los pistones con cinemática inversa.⁸

Esta configuración garantiza que, incluso si el cilindro es rotado o desplazado, el vástago mantenga un comportamiento consistente respecto a su trayectoria de expulsión o contracción. Esto es muy importante pues esta pieza durante su utilización se traslada por lo que un error en la asignación de esta propiedad resultaría en un comportamiento completamente irreal.

Integración de motores en las articulaciones cinemáticas

Una vez definidas las uniones cinemáticas, es necesario asignar motores que les den movimiento. Para ello, se utilizó el aspecto *Motor*, disponible dentro de la pestaña *CAD Is The Model*. Este motor es genérico y está diseñado para ser acoplado tanto a uniones cinemáticas como a dinámicas, esto lo hace adecuado para los requerimientos de este proyecto.

Si bien en la Figura 3.8 se puede observar en color azul el motor en cuestión que aporta el torque, este sólo cumple una función visual ya que donde realmente se encuentra el motor es en las propiedades del tornillo mismo como puede observarse en la misma Figura 3.8 junto con su respectivo controlador. Un detalle importante es que los motores en *Emulate3D* no funcionan sin un controlador asociado que determine a través de la propiedad *State* si el motor está energizado y rotando o no, esta propiedad será crucial a la hora de realizar el comisionamiento virtual.

⁸Fuente: elaboración propia

⁹Fuente: elaboración propia

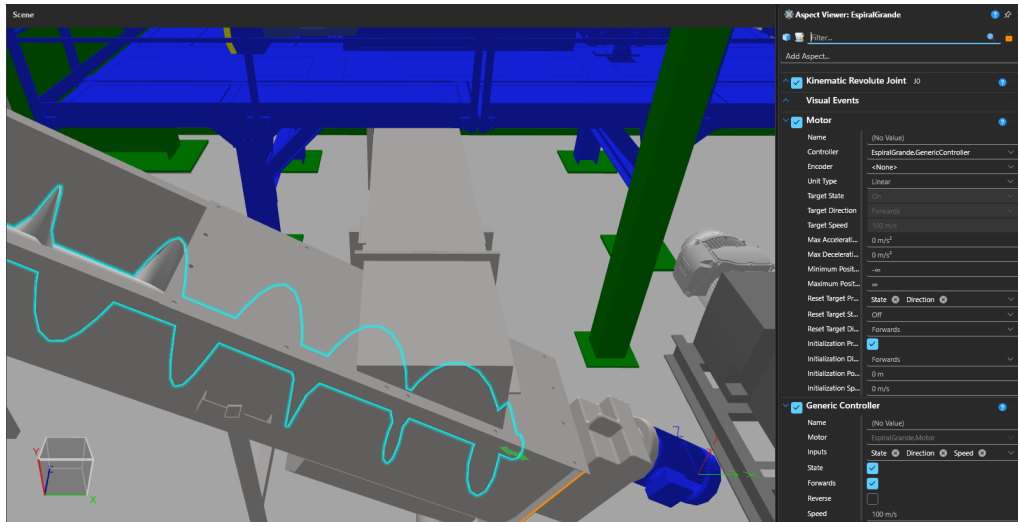


Figura 3.8 Propiedades de motor y controlador genérico del tornillo sin fin.⁹

Consideraciones generales sobre la cinemática aplicada

El enfoque utilizado en esta simulación se mantuvo dentro del dominio de la cinemática. Esto significa que los movimientos se definen de manera fija mediante ángulos, velocidades y vectores, sin calcular fuerzas o respuestas físicas en tiempo real, esto implica que no se pueden detener o moverse a menos que se les ordene de manera externa a la simulación. Esta decisión surge de la necesidad de obtener un modelo verosímil para los fines de visualización y capacitación en la operación de la trituradora horizontal por lo que las consideraciones dinámicas de los motores fueron despreciadas.

3.2. Modelado y simulación del proceso

3.2.1. Modelado y simulación del proceso

El proceso simulado inicia con el cargador frontal depositando una carga de residuos orgánicos en la tolva de la trituradora y concluye cuando el material ya triturado es transportado mediante los tornillos sin fin hasta el tanque de almacenamiento, llamado *buffer*.

Una vez generado el **DT** de cada máquina, tal como se explicó en la sección anterior, la construcción del proceso completo resulta relativamente sencilla, siempre y cuando las propiedades de cada elemento estén correctamente asignadas. Desde el diseño tridimensional se previó que tanto la trituradora como los tornillos estuvieran acoplados, sin embargo, fue en los puntos de conexión entre máquinas donde aparecieron varios detalles que requirieron corrección:

- La trituradora no contaba con piezas inferiores que dirigieran adecuadamente el material hacia el primer tornillo. Esto provocaba acumulación dentro de la máquina al no existir la inclinación necesaria para que los residuos se deslizaran hacia la salida.
- Los tornillos no tenían orificios de entrada y salida que permitieran recibir el material triturado y entregarlo al siguiente proceso, lo que impedía la continuidad del flujo.

El primer problema se resolvió dentro de *Emulate3D* añadiendo una plataforma inclinada justo debajo de las cuchillas, asegurando que el material se deslizará hacia el tornillo sin interrupciones.

En cuanto al segundo problema, se realizaron modificaciones en Inventor para crear las aperturas necesarias y posteriormente se volvió a importar el modelo corregido para su integración definitiva.

Con estas correcciones, fue posible verificar que el flujo de residuos se ejecutara correctamente: desde el cargador frontal que deposita el material, pasando por la trituración y su transporte mediante los tornillos, hasta llegar al tanque destinado a almacenar el producto triturado en la parte exterior de la nave industrial. Este ajuste garantizó que el proceso se representara de manera realista dentro del entorno virtual y que el **DT** cumpliera con su propósito de replicar las condiciones operativas de la planta.

3.2.2. Propuestas para mejorar la seguridad

La superficie destinada a la inspección de la tolva de la trituradora representa un riesgo considerable. Aunque se cuenta con una línea de vida, la cercanía a las cuchillas convierte esta tarea en una operación peligrosa. Una solución práctica sería la instalación de una cámara de vigilancia que permita supervisar esta zona de manera remota, reduciendo la necesidad de exposición directa del personal.

De igual forma, la limpieza manual de las cuchillas de la trituradora horizontal implica un riesgo elevado, sobre todo cuando se realizan pruebas para verificar si se ha eliminado el agente que provocó un atascamiento. En este sentido, resultaría recomendable implementar un sistema de limpieza automatizado que permitan retirar residuos sin necesidad de intervención directa de los operadores. Además, la capacitación del personal en procedimientos seguros de desatascos, aprovechando el **DT** como entorno de práctica, podría contribuir significativamente a disminuir la probabilidad de accidentes durante estas operaciones.

3.3. Comisionamiento virtual

Una vez completada la simulación del entorno y están definidas las animaciones necesarias para representar el proceso, el siguiente paso es establecer la conexión entre el entorno virtual y la lógica de control. Esta etapa es conocida como comisionamiento virtual y permite vincular el comportamiento del modelo tridimensional con un **PLC**, de manera que sea posible simular condiciones reales de operación.

3.3.1. Desarrollo de la lógica de control

Para este proyecto se utilizó el software **FT Echo**, esta herramienta permite generar el emulador de un **PLC** de la marca *Allen-Bradley*, replicando su comportamiento de manera precisa y permitiendo ejecutar rutinas de control desarrolladas en *Studio 5000 Logix Designer*. Al usar este tipo de controlador virtual, se pueden realizar pruebas completas de operación, encendido, apagado y respuesta a eventos, todo dentro del entorno digital de *Emulate3D*.

Programación de la lógica de control

La lógica de control del proceso fue programada en el entorno *Studio 5000 Logix Designer*, utilizando el lenguaje de programación escalera. Esta rutina incluye la operación automática, la activación de motores de manera individual y la respuesta a entradas como botones tanto físicos como señales virtuales provenientes de una **HMI**.

Cada variable de control utilizada dentro de *Emulate3D* como puede ser la activación de un motor o la lectura de un sensor fue definida en el entorno *IO Browser* que nos proporciona el software para su posterior enlace con variables del tipo base en el controlador al que será vinculado el proyecto mediante el protocolo *Ethernet/IP*.

La operación de la trituradora exige tres modos de funcionamiento, dos automáticos y uno manual. Los más simples son el modo manual que permite encender cualquier motor en ambas direcciones, adelante y reversa, de forma autónoma mientras que el modo automático de reversa mueve ambos motores en direcciones opuestas. Por último el modo automático de inicio de secuencia empieza ambos motores de forma que converjan por 10 segundos, luego ambos operan en reversa es decir, divergen y esto se repite tres veces hasta que por último se quedan enclavados en convergencia, es decir, sentido hacia adelante, esto se aprecia en la Figura 3.9.

Un detalle importante a resaltar es que en *Emulate3D* existen tres valores relevantes en el movimiento de un objeto, por ejemplo las cuchillas, primero encontramos el estado, llamado *State*, que representa si el motor está encendido o no, luego la dirección que puede ser tanto hacia adelante, nombrada *Forward*, como en sentido opuesto, denominada *Reverse*. Estos dos últimos datos no pueden encontrarse en estado encendido al mismo tiempo pues es una señal contradictoria y provocará el mal funcionamiento del DT pues no permitirá el giro en ninguno de los dos sentidos. De la misma forma, si hay una señal de encendido es decir que *State* está habilitado pero no hay dirección definida o viceversa, tampoco habrá movimiento, esto fue tomado en cuenta y se manejó de la manera que puede observarse en la Figura 3.10.

3.3.2. Implementación de rutinas de control en el ambiente virtual

Configuración de la conexión en Emulate3D

La conexión entre el entorno virtual y el controlador se configuró mediante la herramienta *IO Browser* dentro de *Emulate3D* que se puede observar en la Figura 3.11. Desde esta ventana se puede configurar la comunicación utilizando diversos protocolos entre los que se destacan *Ethernet/IP*, *Modbus*, *Profinet* y *OPC* por ser ampliamente utilizados en entornos industriales, a través de cualquiera de los mencionados en la lista de la Figura 3.11 podemos establecer un vínculo y permitir la interacción directa entre el DT y el PLC.

En el caso específico del proyecto al que corresponde este texto se hizo lo siguiente para establecer correctamente la conexión de red:

1. Se seleccionó el protocolo de comunicación *EtherNet/IP*, que es compatible con el controlador virtual *FT Echo*.
2. Se identificó el emulador activo emulado por el software mencionado en el punto anterior y se comprobó que la dirección IP correspondiera al mismo.
3. A través del botón *Start* en la interfaz de *Emulate3D* se ordenó establecer la comunicación y se comprobó su correcto funcionamiento a través del indicador a un lado del nombre del controlador el cual debe cambiar a color verde si no hay ningún inconveniente.

¹⁰Fuente: elaboración propia

¹¹Fuente: elaboración propia

¹²Fuente: elaboración propia

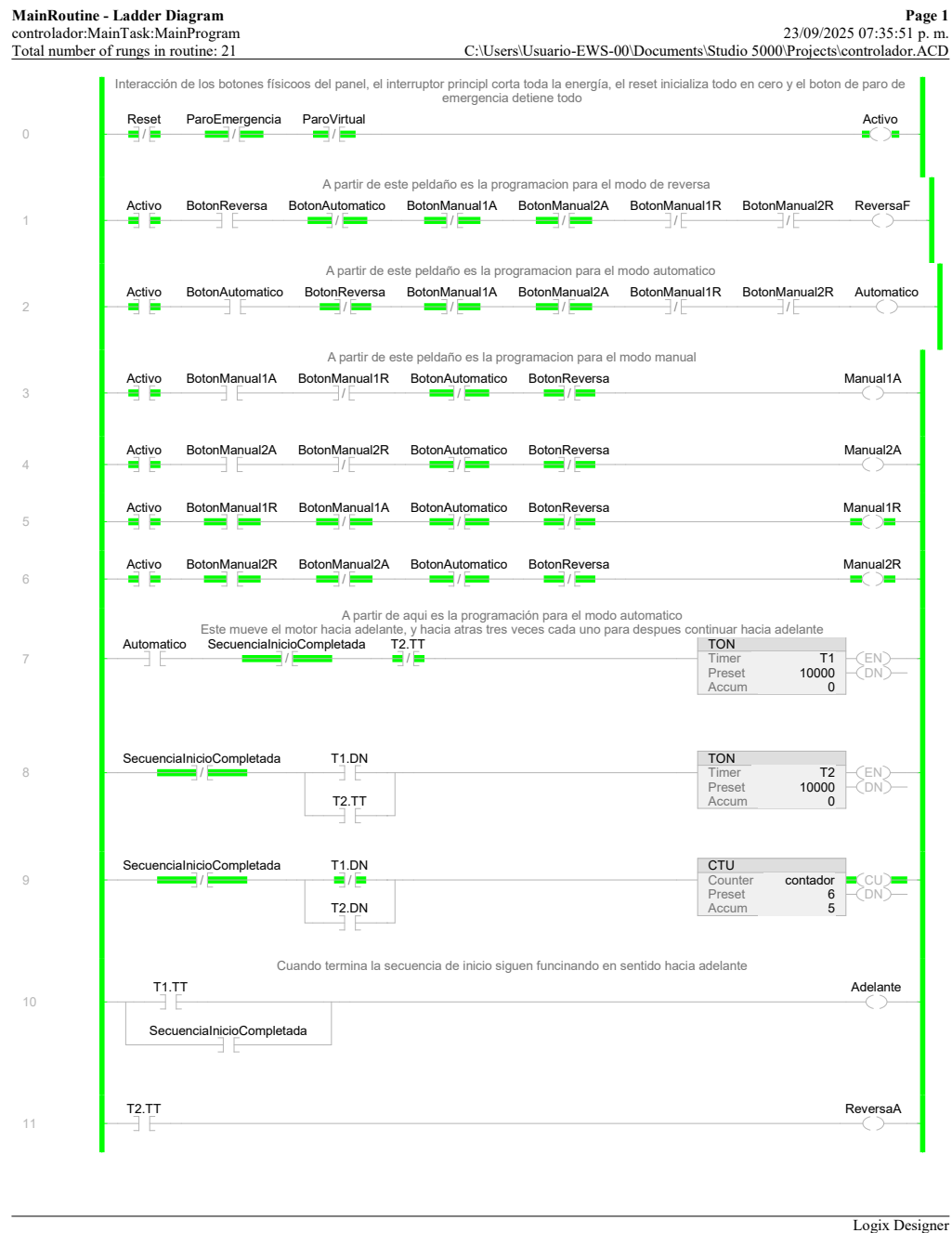


Figura 3.9 Primera parte de la rutina *Ladder* de la trituradora horizontal.¹⁰

4. Por último se importan las direcciones de las variables del **PLC** para poder ser asignadas a propiedades de objetos del **DT**.

Vinculación de variables virtuales con el controlador

Durante la animación de los componentes en *Emulate3D*, se generaron variables de entrada o salida asociadas a cada aspecto de movimiento o estado al ser creados dentro del controlador genérico que se observa en la Figura 3.8. Estas variables se encuentran en la interfaz *IO Browser*, y una vez creadas se pueden vincular a un controlador emulado o real para que acciones de entrada como encender un

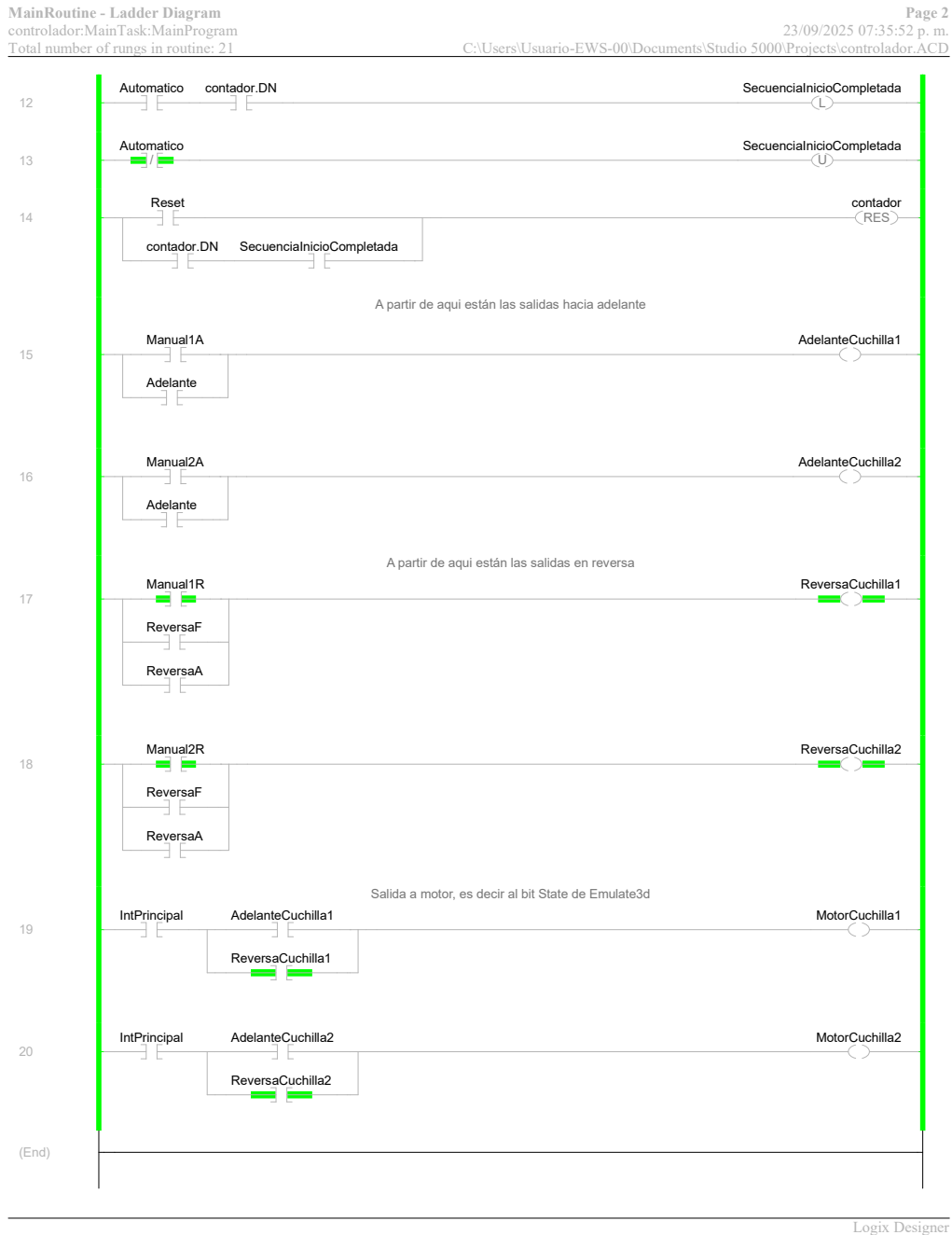


Figura 3.10 Segunda parte de la rutina *Ladder* de la trituradora horizontal.¹¹

motor o de salida como un botón presionado tengan influencia en la lógica de control programada en escalera.

Emulate3D ofrece distintas formas de interacción entre el **DT** y el **PLC**.

- *Read From PLC*: la variable toma el valor del controlador real o emulado y lo aplica en el modelo.
- *Write To PLC*: la variable en el entorno virtual envía su valor al controlador.
- *Bidirectional*: se pueden activar ambas opciones para permitir una interacción simultánea.

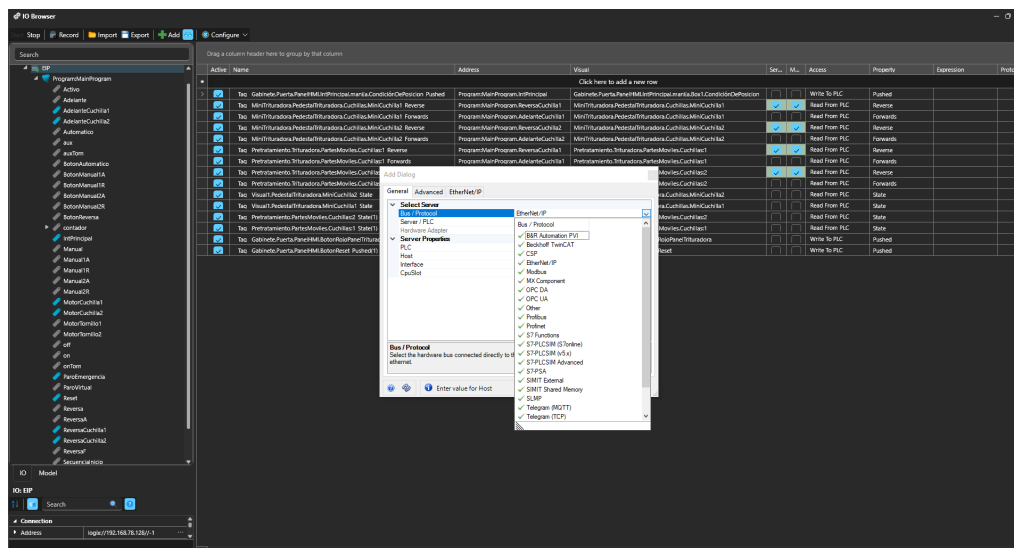


Figura 3.11 Ventana *IO Browser* con variables ya comisionadas y lista de protocolos soportados.¹²

Para que estas variables puedan comunicarse con la rutina de control, se debe asignar una dirección específica en la sección *Address* que se puede ver en la Figura 3.11 esta corresponde a la dirección real del controlador con el que se estableció comunicación. Una vez establecida la dirección a la que escribirá o leerá información se puede interactuar con la variables en cuestión, visualizar su estado tanto dentro del **DT** como en el **PLC** que no necesariamente son el mismo y manipular las mismas desde este mismo entorno.

Ahondando un poco en la diferencia entre el estado dentro del entorno virtual y en el controlador, en la sección *Value* que se puede observar en la Figura 3.11 se define si el valor actual proviene del **PLCs** (*Server Value*) o si debe mantenerse el definido localmente en *Emulate3D* (*Model Value*). Esta configuración permite decidir si el modelo actúa como esclavo de la lógica o si opera en modo autónomo.

La comunicación se realiza a través de una red local entre una máquina virtual que contiene el controlador emulado y al cual se accede a través de *Ethernet/IP* con la dirección **192.168.78.128**, estas características se observan en la Figura 3.12. La comunicación se definió así para darle prioridad a la velocidad de comunicación y no ser afectado por la capacidad de la red en que se ejecute la experiencia pues esta puede funcionar incluso sin conexión a internet pero tiene la desventaja de que únicamente la computadora anfitrión puede establecer comunicación con la máquina virtual y los programas que alberga.

Generacion de interfaz humano máquina

La **HMI** fue generada en **FT Optix** pues es necesario la capacidad de ser utilizada desde un servidor web para su implementación en *Emulate3D*, esta se puede apreciar de mejor manera en la Figura 3.13 donde además se puede observar que está dentro de una máquina virtual pues esta está vinculada con el controlador **FT Echo** dentro de esta misma. El **PLC** puede acceder a ambos a través de *Ethernet/IP* en una red local compartida entre la maquina virtual y la computadora anfitrión en la dirección **192.168.78.128** y a través del puerto 8080. Esto permite acceder a la **HMI** a través de cualquier

¹³Fuente: elaboración propia

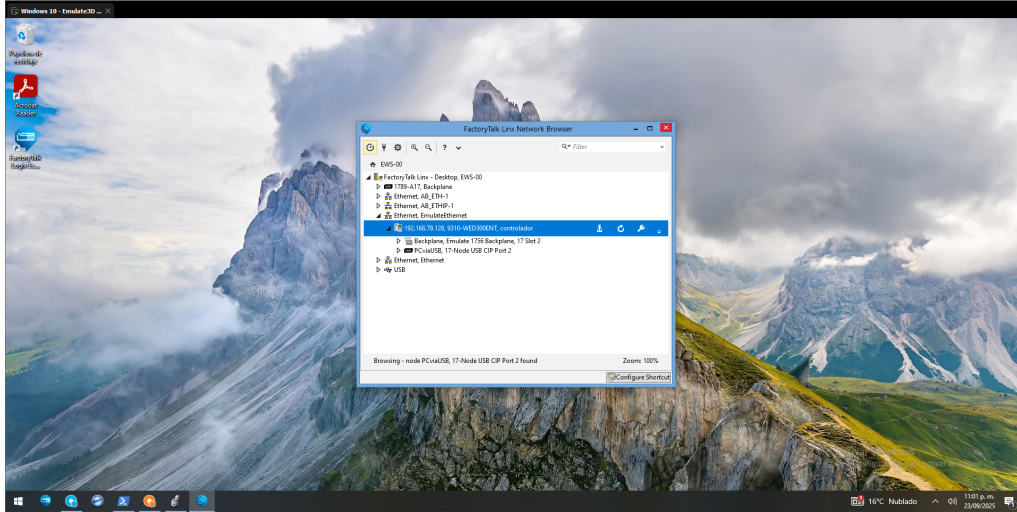


Figura 3.12 Emulador de **PLC** que se ejecuta dentro de una máquina virtual. ¹³

navegador *web* como puede observarse en la Figura ¹⁴ lo cual da mucha flexibilidad para ser utilizada en muchos entornos como es nuestro caso pues dentro del entorno virtual se puede acceder de manera sencilla a esta terminal a través de un buscador web que *Emulate3D* incorpora en sus herramientas de desarrollo.

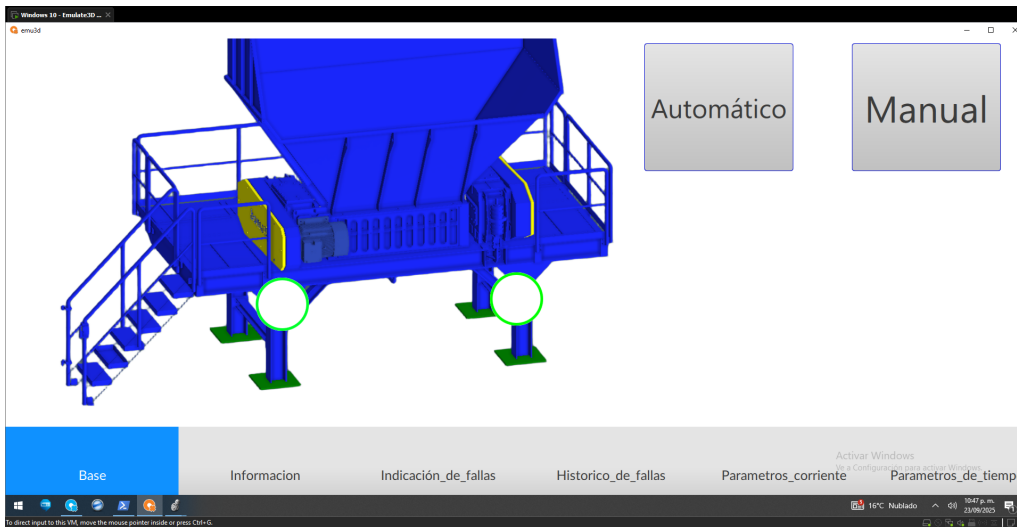


Figura 3.13 **HMI** generada en **FT Optix** y ejecutada dentro de una máquina virtual. ¹⁴

Ventajas del comisionamiento virtual

El principal beneficio de esta conexión es que permite probar la lógica de control en condiciones reales de operación sin poner en riesgo al equipo ni al personal. Esto es especialmente útil durante el desarrollo de nuevas rutinas o durante la capacitación de personal, ya que se pueden simular fallas, verificar tiempos de respuesta, y validar la interacción entre usuario y sistema.

¹⁴Fuente: elaboración propia

¹⁵Fuente: elaboración propia

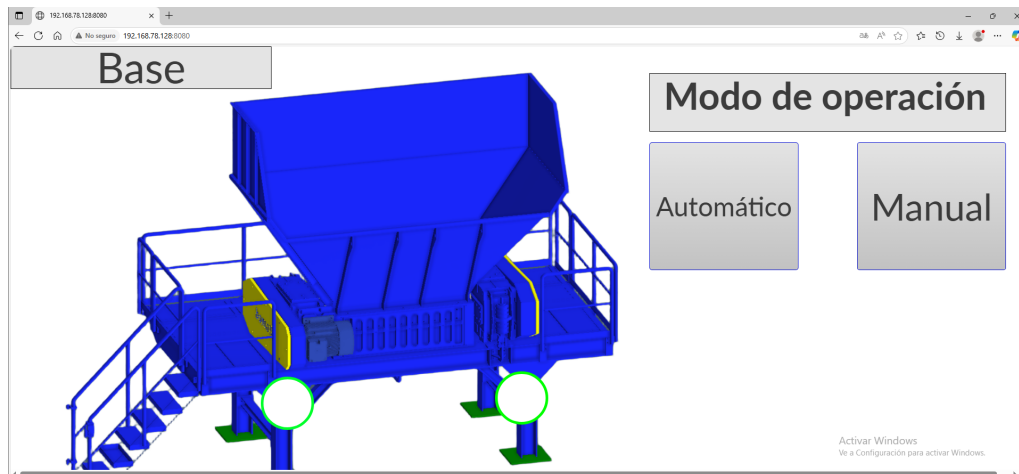


Figura 3.14 **HMI** generada en **FT Optix** y ejecutada en un servidor *web*. **15**

Además, este tipo de integración facilita el trabajo remoto entre las áreas de diseño mecánico, automatización y seguridad industrial, permitiendo trabajar sobre un mismo entorno virtual antes de la puesta en marcha en planta. El tiempo de validación se reduce considerablemente, y se pueden realizar múltiples pruebas sin impacto en la producción.

En el contexto de este proyecto, el comisionamiento virtual fue una pieza clave para vincular el modelo animado con la lógica de control real, transformando un entorno visual en una plataforma funcional de capacitación y validación operativa.

3.4. Desarrollo de la experiencia de capacitación

El diseño de una experiencia de capacitación en la operación de maquinaria industrial debe responder a las necesidades reales del entorno laboral, considerando tanto la seguridad del operador como la efectividad del aprendizaje. En este caso particular, se busca capacitar a personal para la operación de una trituradora de residuos orgánicos mediante un entorno virtual inmersivo que reproduce fielmente el comportamiento del sistema real.

Una experiencia de este tipo debe cumplir con varias características fundamentales. En primer lugar, debe ofrecer una representación precisa del entorno físico en el que se llevará a cabo la operación. Esto incluye tanto el modelado tridimensional de la planta como la animación de los elementos móviles de la máquina, lo que permite al operador familiarizarse con la disposición espacial del equipo y la secuencia de funcionamiento antes de enfrentarse al entorno físico real.

En segundo lugar, debe integrar la rutina operativa completa, desde la verificación de condiciones iniciales de seguridad hasta la puesta en marcha. Para ello, es necesario que el entorno de simulación permita no solo observar el comportamiento de los componentes, sino también interactuar con ellos a través de interfaces gráficas o controles virtuales. Este punto es esencial para que el operario comprenda no solo la acción a realizar sino también el cómo ejecutarla y en qué orden deberá efectuar cada acción.

Otro aspecto clave del diseño es la incorporación de retroalimentación inmediata. El **DT** debe estar vinculado a una lógica de control operativa, de forma que las acciones del usuario generen respuestas en tiempo real en el sistema virtual. Esto permite simular condiciones reales de operación y observar sus consecuencias en el entorno seguro y controlado que provee la realidad virtual.

Adicionalmente, se debe considerar la accesibilidad del sistema. La experiencia no debe depender de conocimientos técnicos avanzados para poder ser utilizada con eficacia. La navegación por el entorno debe ser intuitiva, los controles deben estar claramente identificados y los mensajes del sistema deben guiar al operador de forma clara durante toda la sesión de entrenamiento. Esta propuesta abre el abanico de personas que pueden aspirar a este puesto y permite a sectores de la población como por ejemplo los trabajadores informales ejercer un puesto de operador industrial.

Para enriquecer la experiencia, se contempla el uso de tecnologías de realidad virtual. La posibilidad de visualizar el proceso a escala real, moverse alrededor de los componentes e interactuar con ellos desde una perspectiva inmersiva, proporciona una ventaja significativa frente a los métodos de capacitación tradicionales. Este enfoque no solo mejora la comprensión de los procesos, sino que también incrementa el nivel de compromiso y retención del conocimiento por parte del operador [Jongbloed, et al., 2024]. Para mejorar aún más la inmersión se pretende implementar una interfaz humano-máquina real para su utilización en la operación, la cual debe reflejar fielmente la pantalla real del equipo y estar disponible directamente dentro del entorno virtual.

Estas características juntas permiten diseñar una experiencia de capacitación robusta, interactiva y realista, que prepare adecuadamente al personal operativo sin comprometer la seguridad, ni interrumpir la producción de la planta.

3.4.1. Elaboración del manual operativo

El proceso de operación de la trituradora horizontal Bomatic comienza con una verificación de seguridad donde se debe asegurar que ningún operador se encuentre dentro de la tolva de alimentación y que no existan objetos que puedan interferir con el movimiento de los ejes trituradores. Este paso es crítico pues cualquier descuido en esta fase podría resultar en daños al equipo o, peor aún, en accidentes laborales.

Para el encendido del equipo se sigue un protocolo específico que inicia en el panel de control. Primero se gira la llave en la sección *Control Voltage Off/On* para energizar el PLC que controla toda la operación de la máquina. Al hacer esto, el sistema muestra una pantalla de inicio y un botón *Reset* que parpadea en azul, el cual debe ser presionado para completar la secuencia de arranque del controlador.

Posteriormente aparece un mensaje indicando "*Interruptor principal 1Q1 desconectado*", lo que nos lleva a la siguiente fase donde se debe abrir el panel de control para levantar manualmente la pastilla del interruptor principal. Una vez completado este paso, el sistema nos presenta la pantalla de selección de idioma y luego el menú principal donde se selecciona el *Modo de operación automática*. Finalmente, al elegir la opción *Encendido/Apagado automático*, los motores de los ejes se activan y comienzan su secuencia de inicio.

Cuando los ejes alcanzan su velocidad operacional y giran en la dirección correcta, la trituradora está lista para recibir el material orgánico (*FORSU*) en la tolva de alimentación. Es importante mencionar que aunque esta máquina tiene capacidad para procesar hasta 75 toneladas por hora, en la operación normal solo se trabaja con una tonelada por hora por consideraciones del proceso productivo.

Para el apagado del equipo se sigue un proceso inverso: primero se presiona el botón *Encendido/apagado automático* (que durante la operación permanece iluminado en verde), se espera a que los ejes se detengan completamente, se gira la llave del panel a la posición *Off* y finalmente se baja la pastilla del interruptor principal a su posición *OFF*.

En caso de atascamiento, el sistema cuenta con un modo manual accesible desde el menú principal que permite operar los motores en reversa mediante los botones *Motor 1 reversa* y *Motor 2 reversa*. Esta función es esencial para liberar obstrucciones sin necesidad de intervención física en los componentes internos de la trituradora.

1. Verificación de seguridad previa al encendido
2. Secuencia de arranque controlada por PLC
3. Operación normal con capacidad de 1 tonelada por hora
4. Modo manual para desatascamiento

Esta metodología de operación garantiza tanto la seguridad del personal como el correcto funcionamiento del equipo, siendo parte fundamental del proceso de pretratamiento que permite la posterior carbonización hidrotermal de los residuos orgánicos.

3.4.2. Implementación del manual en realidad virtual

Para la implementación de lo anterior mencionado y que se detallará en la siguiente sección en realidad virtual existen varios caminos con sus respectivas ventajas y desventajas.

Existen distintas formas de visualizar e interactuar con los modelos generados en Emulate3D, cada una con ventajas y limitaciones específicas. El *Raw 3D Viewer* destaca por su ligereza y portabilidad, aunque solo permite visualizar procesos grabados. El *Demo 3D Viewer* ofrece la experiencia más fluida en equipos de bajos recursos, pero con una calidad gráfica básica. El *Demo 3D VR* incrementa la calidad visual y la interacción, aunque requiere mayor capacidad de cómputo y conexión estable. Finalmente, la opción de *Emulate3D con control Xbox* brinda un salto gráfico gracias a *Unreal Engine 5*, pero con menor inmersión y una interacción más torpe todo lo anterior se puede observar de mejor manera en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Opciones de visualización e interacción de modelos en Emulate3D

Opción	Método de conexión	Ventajas	Desventajas
Raw 3D Viewer	Visualización de un entorno previamente generado en Emulate3D mediante archivos <code>.raw3D</code> .	■ Muy ligero: ejecutable incluso en teléfonos inteligentes. ■ Fácil distribución de archivos grabados.	■ No es interactivo. ■ Solo reproduce lo que se grabó durante la simulación.
Demo 3D Viewer	Visualización e interacción básica vía servidor web; el procesamiento recae en los lentes VR.	■ La computadora anfitrión requiere recursos mínimos. ■ Funciona en equipos antiguos o sin GPU dedicada. ■ Excelente rendimiento y respuesta rápida.	■ Calidad gráfica básica y no modificable.
Demo 3D VR	Visualización e interacción vía servidor web; el renderizado se realiza en la computadora anfitrión y se transmite a los lentes.	■ Calidad gráfica mejor que Demo 3D Viewer. ■ Permite interacción con el modelo.	■ Requiere computadora potente y conexión rápida. ■ Interacción puede resultar lenta o inestable. ■ Calidad gráfica fija y limitada por la implementación.
Emulate3D + Control Xbox	Duplicación de pantalla en los lentes VR; interacción mediante mando Xbox conectado al PC anfitrión.	■ Permite renderizado con Unreal Engine 5 (salto visual importante). ■ Compatible con hardware de PC estándar.	■ Experiencia menos inmersiva (pantalla curva). ■ Interacción torpe por depender de un control externo. ■ Rendimiento e interacción pueden resultar lentos e inestables.

Se optó por priorizar el rendimiento a través del uso de Demo3d viewer pues si bien hay un incremento de calidad visual en otras opciones, no es lo suficientemente relevante para reducir la gran desventaja de una interacción torpe ya que esto interfiere en gran manera con una característica esencial para el correcto desarrollo de la experiencia de capacitación que es la necesidad de respuesta a las acciones que se realizan dentro del entorno virtual.

3.4.3. Implementación de escenario práctico para la capacitación

El manual inmersivo es la versión interactiva del manual operativo, pensado específicamente para ser usado dentro del entorno virtual. A diferencia de los documentos tradicionales que se leen y luego se aplican, este se vive dentro del DT. El operador no solo aprende el procedimiento, lo ejecuta directamente en el entorno simulado, con las condiciones y respuestas del sistema tal como sucederían en la planta real.

Para su implementación, se parte del modelo tridimensional ya construido y se integran instrucciones que aparecen en pantalla a medida que el operador avanza por cada paso del procedimiento. Estas instrucciones pueden ser mensajes flotantes, indicadores visuales sobre las piezas o rutas guiadas. De esta forma, el operario no necesita memorizar pasos ni consultar documentos externos, pues el mismo sistema lo va guiando en tiempo real.

Experiencia de puesta en marcha

Las acciones que se integran dentro del manual inmersivo son:

- Revisión inicial de seguridad: verificar visualmente que no haya personal en la tolva ni objetos extraños.
- Puesta en marcha del controlador, la **HMI** y encendido del panel de control.
- Secuencia de arranque desde el **HMI** virtual, activación del modo automático.
- Alimentación de la tolva y observación del comportamiento de la máquina en operación.
- Indicación de atascamientos o errores cometidos.

Cada paso incluye retroalimentación visual (carteles flotantes y animaciones) que permiten saber si se ejecutó correctamente o si hubo un error. Si el operador falla, el sistema habrá de reiniciarse para ejecutar correctamente la secuencia de pasos. El objetivo es claro: permitirle al usuario practicar, fallar y volver a intentar cuantas veces sea necesario, sin riesgo para él ni para el equipo. Y hacerlo de forma realista, guiada y lo más cercana posible a cómo la actividad real sería ejecutada en planta. Para entrar en esta experiencia el usuario habrá de interactuar con el cubo verde que tiene escrito **Empezar rutina de encendido** que se observa en la Figura 3.15.

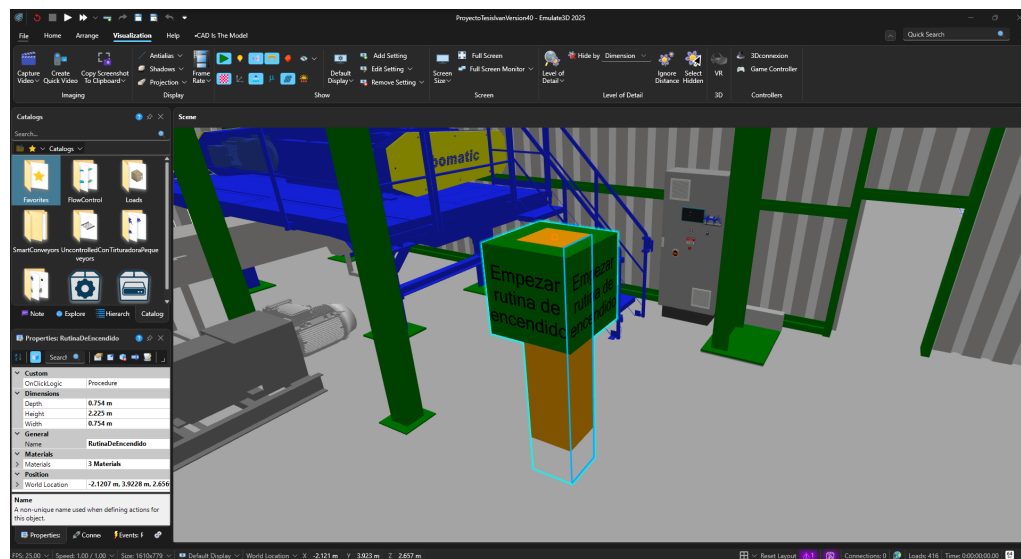


Figura 3.15 Bloque que activa la rutina de encendido de la trituradora horizontal. ¹⁶

¹⁶Fuente: elaboración propia

Inicio de operación: verificación previa

Antes de comenzar cualquier acción, el procedimiento requiere una verificación de seguridad de manera visual, muy importante en el entorno físico y que fue trasladado a su réplica virtual como la primer instrucción a seguir de la forma que se aprecia en la Figura 3.16. Es indispensable confirmar que ninguna persona se encuentre dentro de la tolva de la trituradora, de la misma forma asegurar que no haya objetos extraños que puedan interrumpir el giro de las cuchillas y provocar un atascamiento que provocaría una sobrecorriente en sus respectivos motores. Esta etapa inicial, aunque sencilla, representa uno de los filtros de seguridad más relevantes del proceso y se implementó como se observa en la Figura 3.18, a esta zona se llega siguiendo las flechas en el suelo que se muestran en la figura 3.17.

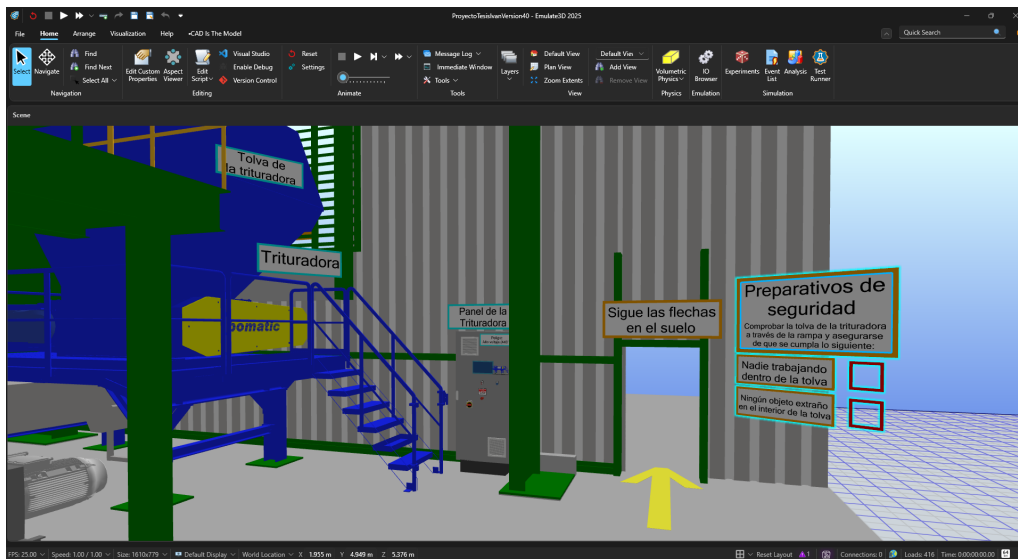


Figura 3.16 Vista inicial de la rutina de operación de la trituradora horizontal. ¹⁷

Para comprobar que no hay nadie dentro de la tolva se han de abrir las puertas que están en lo alto de la rampa y al completar este paso se observa como uno de los puntos ha sido marcado en la lista como completado, esto se observa en la Figura 3.19. Pero se observa en la misma Figura 3.19 un objeto extraño que habrá de retirarse, al realizar esta tarea se completa la lista de actividades en esta zona y se indica el regreso como se puede apreciar en la Figura 3.20 para continuar con la puesta en marcha de la trituradora de residuos orgánicos, este retorno está además marcado por flechas como las que guiaron hasta este punto pero en sentido inverso y que terminan en el panel de control como puede observarse en la Figura 3.21 y la Figura 3.22.

Una vez que se cumple con los preparativos de seguridad, se procede al encendido del equipo desde el panel de control como se puede observar indicado en la Figura 3.22. El primer paso es girar la llave en la sección *Control Voltage Off/On* para energizar el **PLC** como se observa en la Figura 3.23. Con esta acción se activa el controlador junto con la **HMI** y se despliega la indicación de interactuar con el

¹⁷Fuente: elaboración propia

¹⁸Fuente: elaboración propia

¹⁹Fuente: elaboración propia

²⁰Fuente: elaboración propia

²¹Fuente: elaboración propia

²²Fuente: elaboración propia

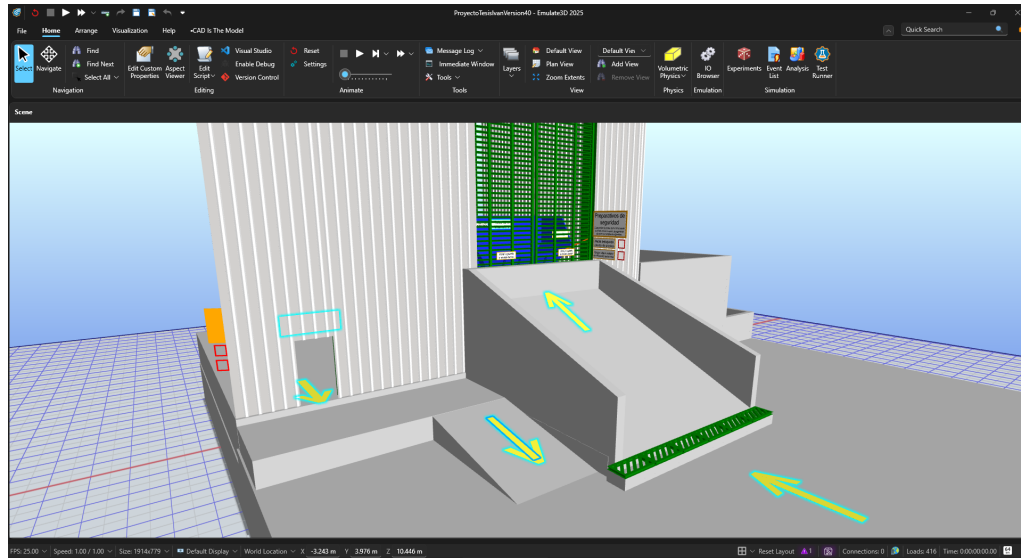


Figura 3.17 Flechas que guían hacia la zona en que se realiza la comprobación de seguridad. ¹⁸

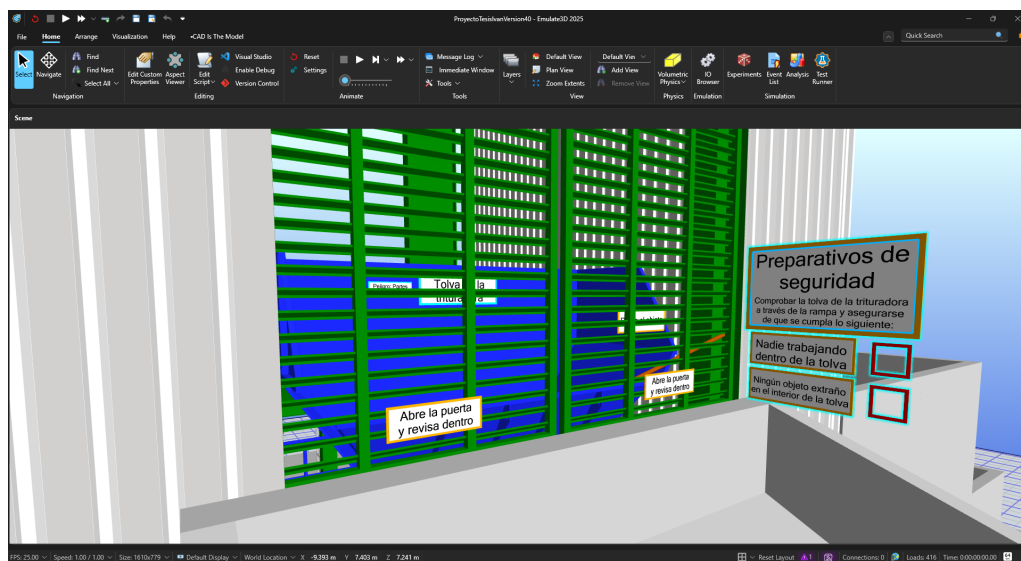


Figura 3.18 Zona en la que se realizan las comprobaciones de seguridad. ¹⁹

botón *Reset* que resalta en un azul más claro como se observa en la figura ^{3.24}. Este debe presionarse para continuar con la secuencia de arranque de la máquina.

Se aprecia en la HMI un mensaje con la leyenda “*Interruptor principal 1Q1 desconectado*”. Esta señal indica que es necesario activar el interruptor principal y desaparecerá cuando se complete este paso, mismo que se indica con una flecha igual que sus predecesores como se aprecia en la Figura ^{3.25}. Este paso desbloquea el acceso a la interfaz humano máquina, misma que con la que se indica que se debe interactuar como se observa en la Figura ^{3.26} y desde la cual se indica operar la trituradora, misma que se puede apreciar mejor en la Figura ^{3.13}.

²³Fuente: elaboración propia

²⁴Fuente: elaboración propia

²⁵Fuente: elaboración propia

²⁶Fuente: elaboración propia

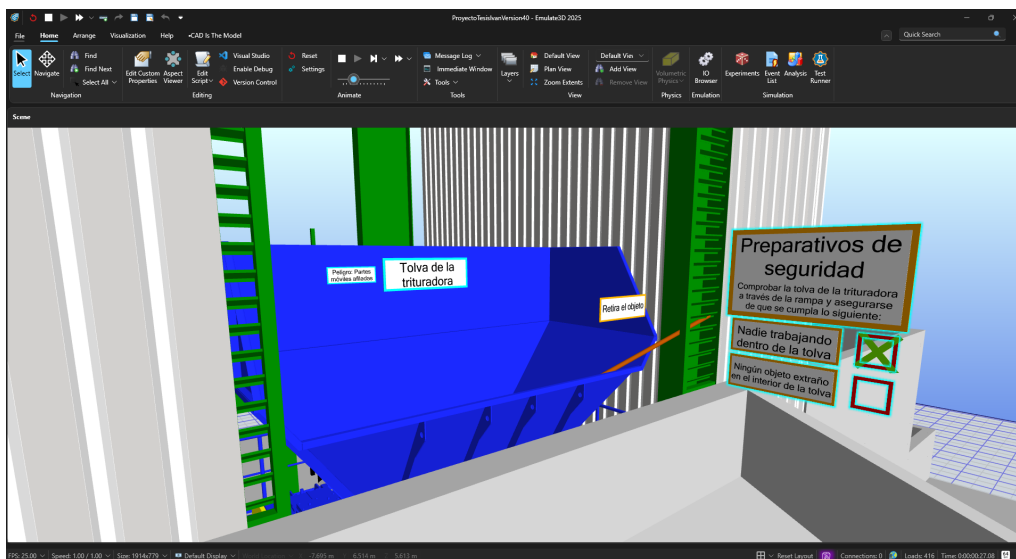


Figura 3.19 Momento en que se ha comprobado que no hay nadie dentro de la tolva. 20

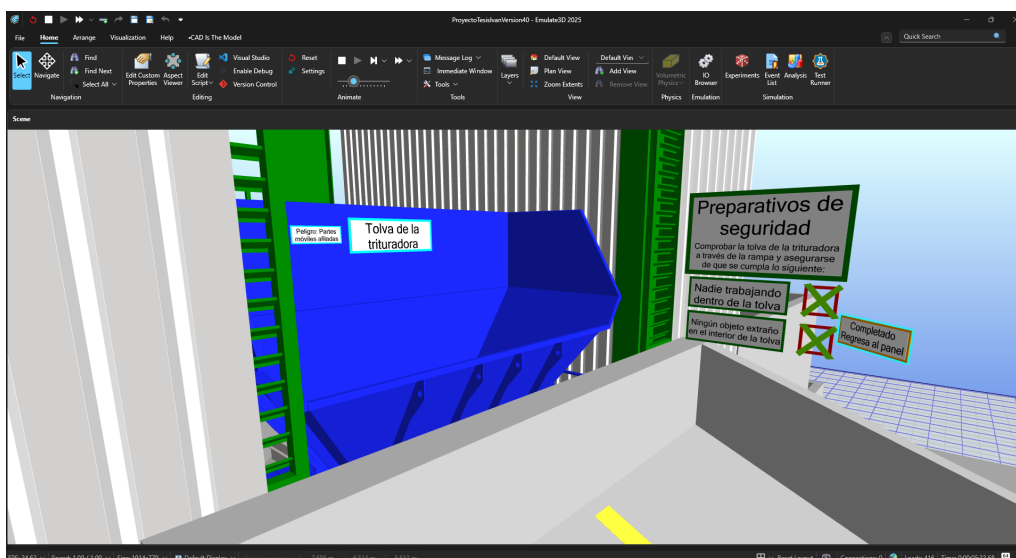


Figura 3.20 Situación en que se han completado las comprobaciones de seguridad. 21

En el menú principal se elige la opción de operación Automático y dentro de esta se presiona el botón virtual *Encendido/Apagado automático*, lo cual inicia la secuencia de activación de los motores. Los ejes de la trituradora comenzarán a girar en la secuencia descrita en la rutina LD que se puede consultar en la Figura 3.10 hasta alcanzar un giro convergente constante, momento a partir del cual la máquina se encuentra lista para recibir material y procesarlo. Para solicitar una carga al operador del cargador frontal se interactúa con el cubo amarillo con la leyenda "Solicitar carga" que aparece una vez que se completa la interacción con la interfaz humano máquina como se observa en la Figura 3.27. Una vez realizados todos los pasos anteriores la rutina de puesta en marcha de la trituradora ha sido

²⁷Fuente: elaboración propia

²⁸Fuente: elaboración propia

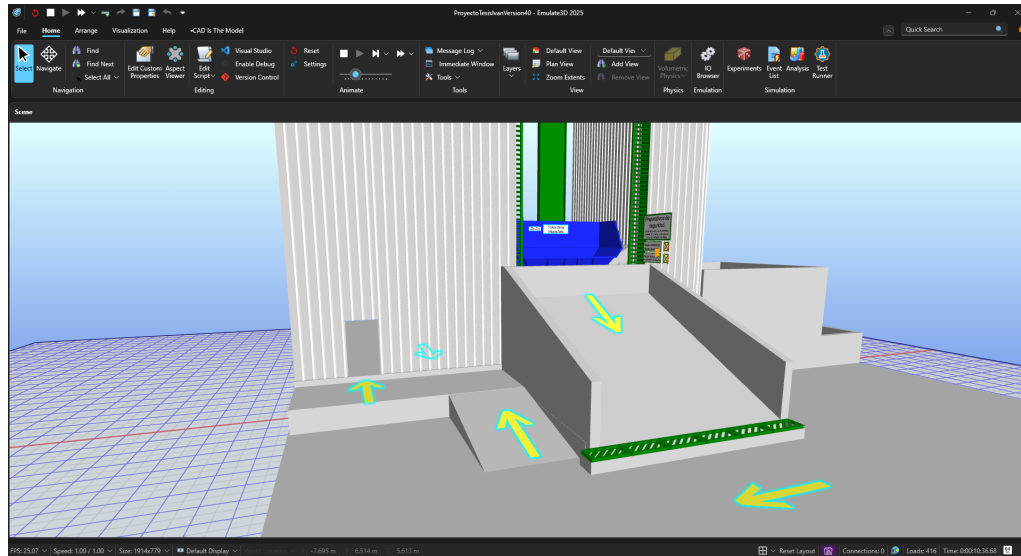


Figura 3.21 Momento en que se han completado los preparativos de seguridad. ²²

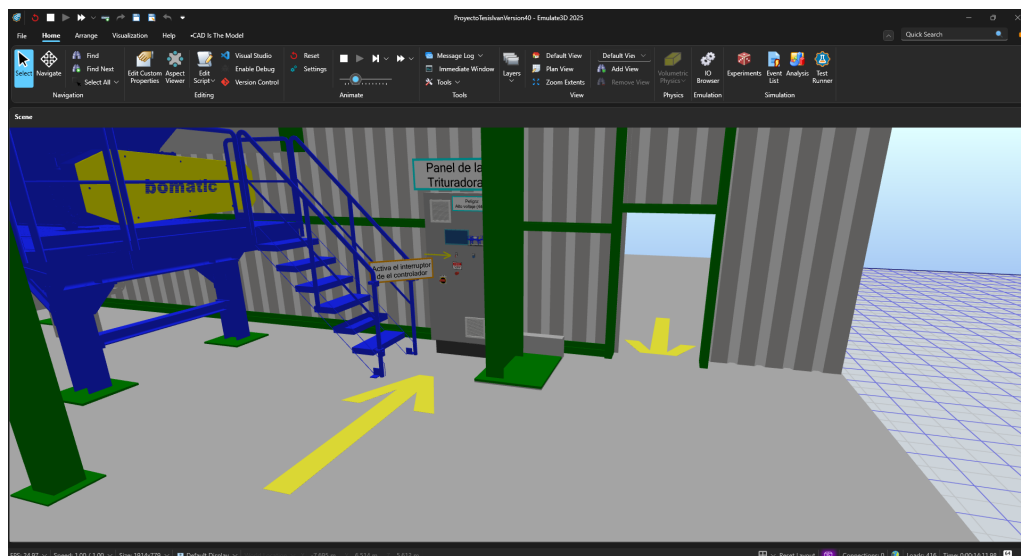


Figura 3.22 Indicación de regresar al panel para continuar la rutina. ²³

completada, lo que se marca por la aparición del cargador frontal con la pala llena de material como se observa en la Figura ^{3.28}.

Una vez que el cargador deposita el material en la tolva, si todo se realizó correctamente se podrá apreciar un cartel que indica la operación correcta de la trituradora como se puede apreciar en la Figura ^{3.29} en caso contrario se podrá apreciar un indicador semejante pero expresando cual fue el error cometido. Si se cometió un error se deberá reiniciar la experiencia para intentar de nuevo operar la trituradora de forma correcta.

²⁹Fuente: elaboración propia

³⁰Fuente: elaboración propia

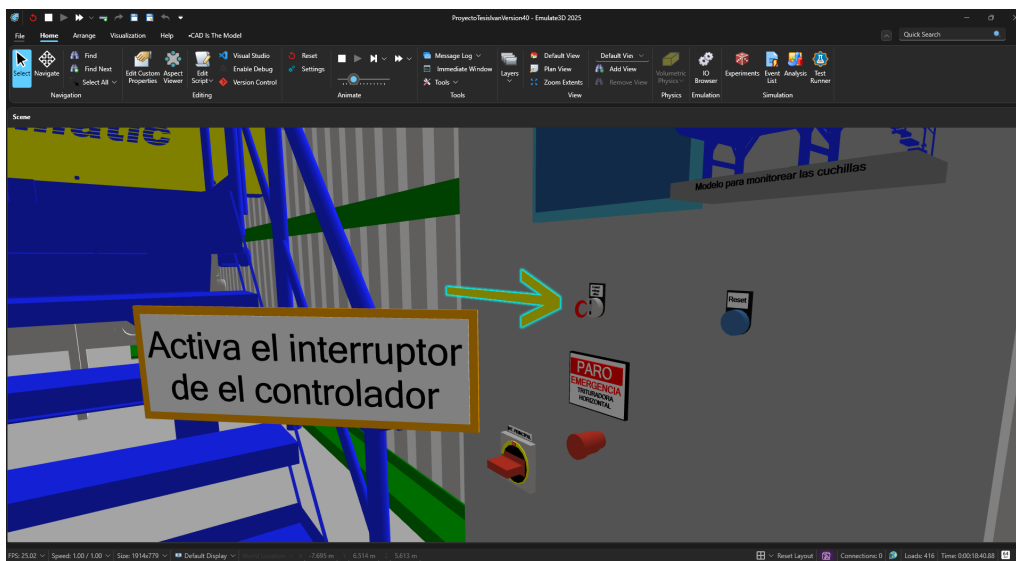


Figura 3.23 Instrucción de encender el controlador con el interruptor de llave. ²⁴

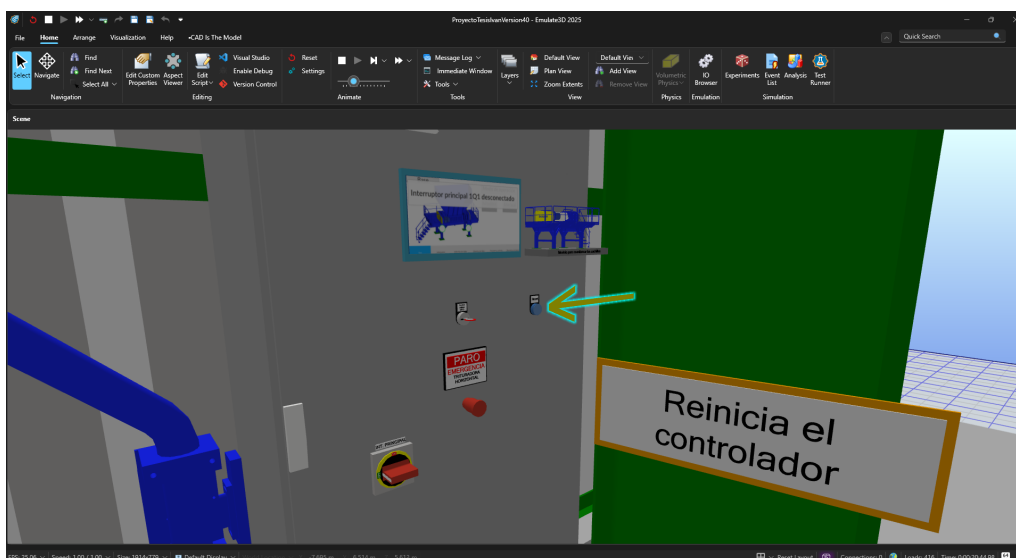


Figura 3.24 Orden de presionar el botón *Reset*. ²⁵

Casos de operación incorrecta

Existen tres casos en los que la operación de esta trituradora horizontal no fue realizada de manera adecuada, el primero es en el que se deposita una carga antes de encender las cuchillas de la máquina. El segundo caso se genera cuando no se retira el objeto extraño que se encuentra dentro de la tolva y el tercero se presenta cuando ambos casos anteriores se cumplen.

Si bien la trituradora está sobredimensionada y es capaz de procesar los residuos orgánicos aun cuando es encendida ya con el material dentro de la tolva, llegar a esta situación se considera un error pues genera un estrés innecesario sobre los motores acoplados a las cuchillas trituradoras que se puede evitar fácilmente si se hace que los motores lleguen a su velocidad nominal antes de que empiecen

³¹Fuente: elaboración propia

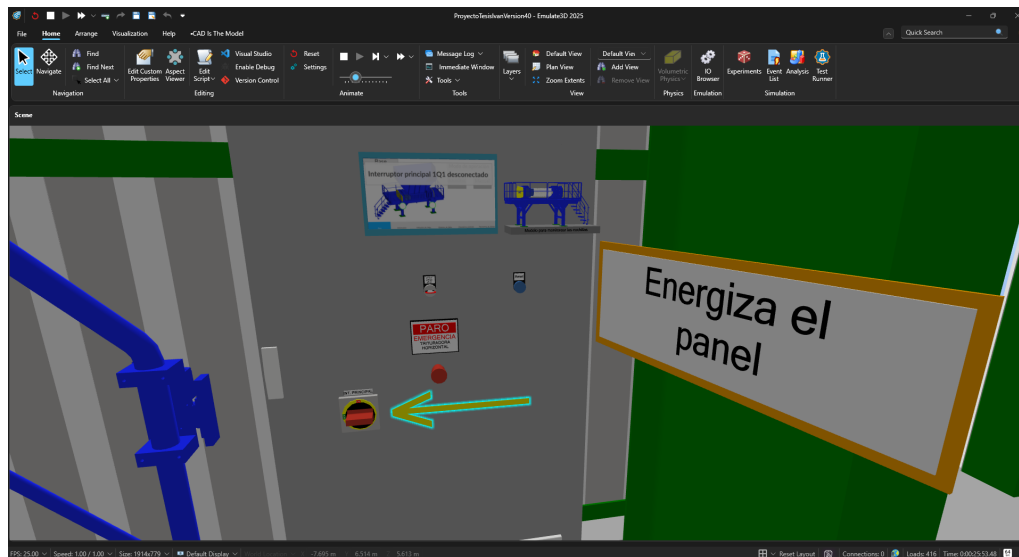


Figura 3.25 Instrucción de encender el interruptor principal. ²⁶

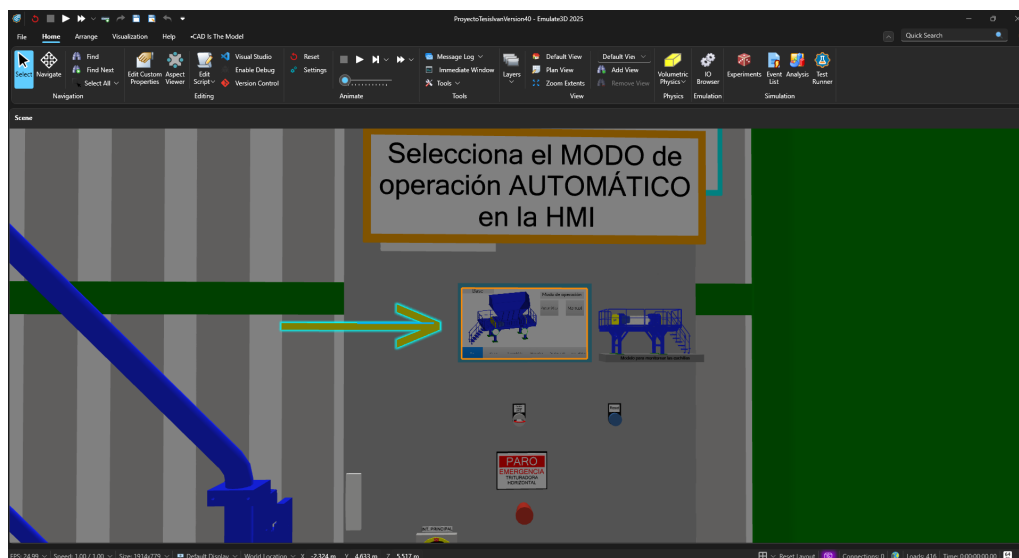


Figura 3.26 Momento que se indica operar la trituradora desde la **HMI**. ²⁷

a ejecutar su labor de triturado. En el contexto del **DT** se obtiene esta indicación de error como la que se aprecia en la Figura 3.30 si el cargador frontal deposita una carga y la propiedad *State* de cualquiera de las cuchillas está en estado apagado, es decir "false" lo que significa que están apagadas.

Si hay un atascamiento en la trituradora usualmente se genera a partir de un material fibroso que impide el giro de las cuchillas y en este caso se pueden utilizar herramientas sencillas como garrochas para cortar las fibras que se oponen a su correcto funcionamiento, al realizar esta maniobra pueden suceder accidentes como es olvidar esta herramienta dentro de la tolva, en este caso es importante retirarla antes de encender la máquina en cuestión. Aterrizado al entorno virtual, este error es indicado como se observa en la Figura 3.31 en el momento que la carga es depositada en la tolva con el objeto extraño aún dentro de la misma.

³²Fuente: elaboración propia

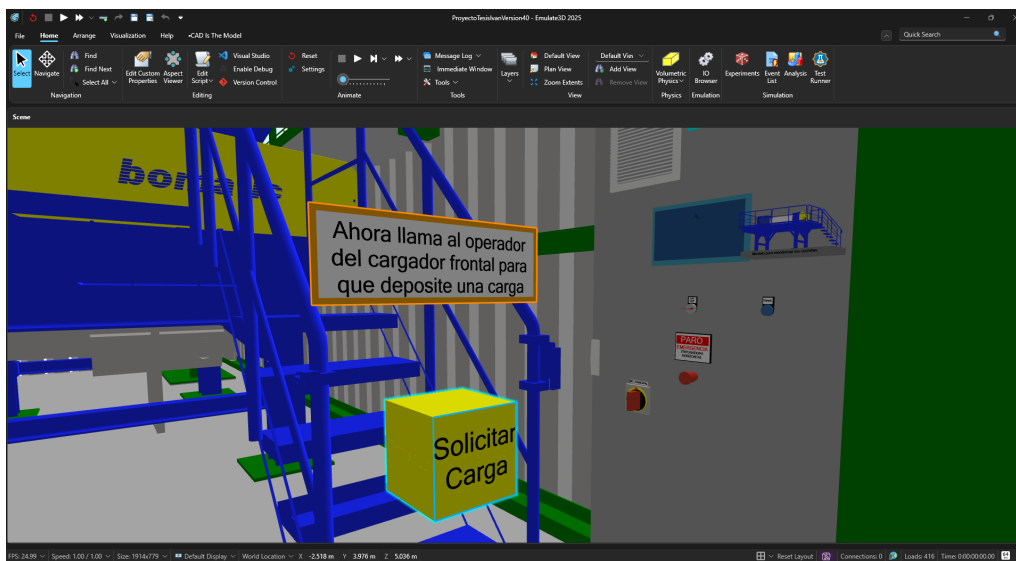


Figura 3.27 Paso final en el que se solicita una carga de material. 28

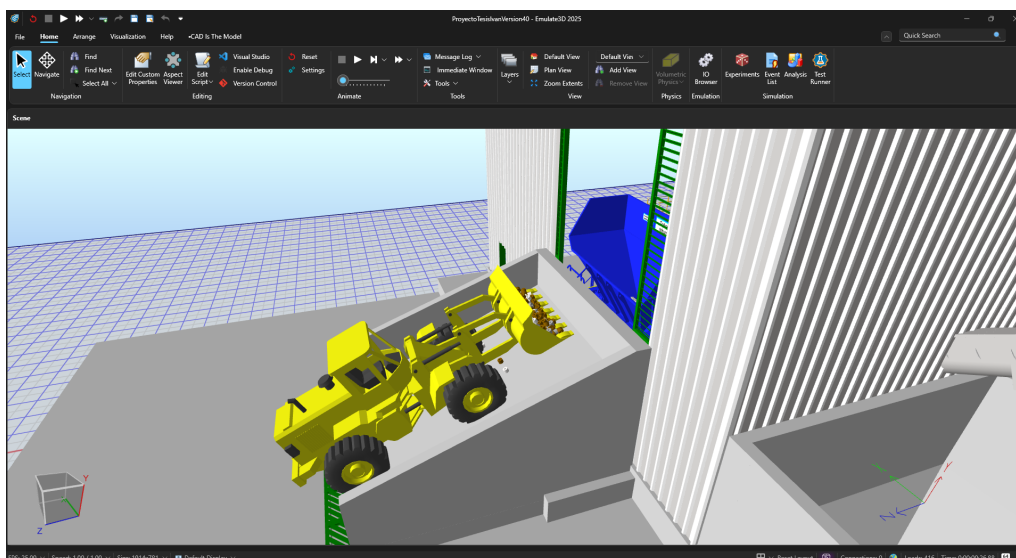


Figura 3.28 Cargador frontal que aparece al finalizar la operación de la trituradora. 29

Si se cometen ambos errores a la vez se indicará cada uno con su respectivo cartel de forma que se visualicen ambos errores, en este caso al igual que en los anteriores el operador deberá volver a empezar la capacitación, esto se habrá de hacer reiniciando el DT desde la interfaz de Emulate3D en la computadora que contiene el entorno virtual.

Experimentación con el entorno

Una de las ventajas principales de realizar la experiencia de capacitación usando como base el DT del proceso en cuestión es que la rutina antes mencionada solo es una de las múltiples formas en que se puede utilizar. Lo que esto implica es que el entorno virtual se puede explorar libremente y además se pueden realizar experimentos para comprender de mejor manera su funcionamiento sin consecuencias

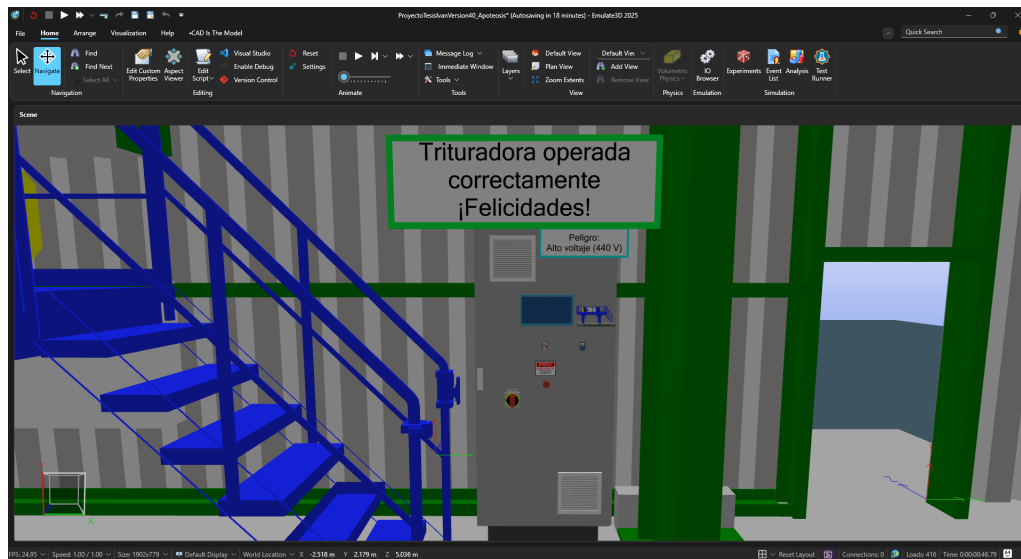


Figura 3.29 Indicador de que la operación se realizó correctamente.³⁰

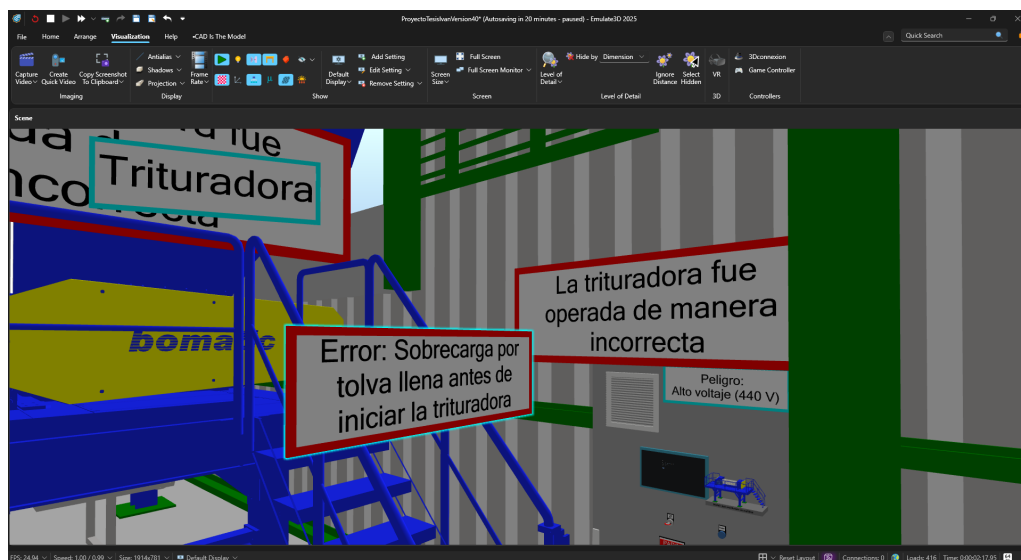


Figura 3.30 Caso en que no se encendió la trituradora antes de introducir la carga de material.³¹

permanentes ni en el sistema real ni en el virtual pues con reiniciar este último se inicializará en el mismo estado en el que se encontró.

El operador al empezar la experiencia de capacitación en el **DT** se encuentra en un entorno inerte, es decir que el gabinete de control no está comisionado al controlador a excepción de la interfaz humano máquina que se encuentra en el mismo, esta sí se está comunicando con el PLC en todo momento por lo que se puede operar la trituradora desde este panel. Esto con la intención de que el usuario explore el proceso de pretratamiento y la HMI de forma libre tanto en sus modos automático como manual y la información contenida en la misma. Todo lo anterior con el propósito de incentivar la experimentación y que el operador pueda averiguar por sí mismo como están construidas las máquinas involucradas en sus labores y las formas en que puede interactuar con ellas.

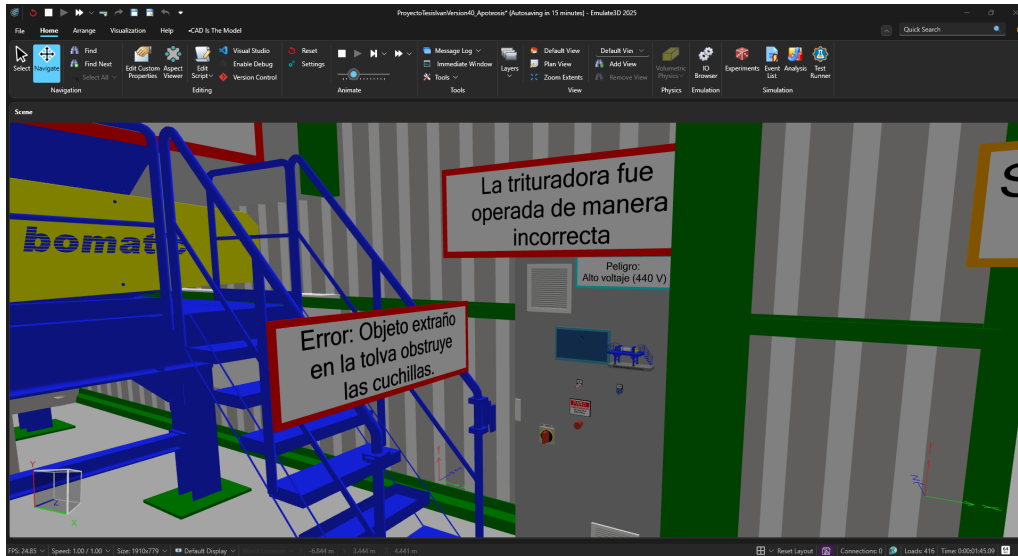


Figura 3.31 Caso en que no se retiró el objeto extraño de la tolva antes de depositar la carga.³²

Tanto la puesta en marcha como la detención del equipo se puede y de manera correcta se debe hacer a través de la interfaz humano máquina o en casos de emergencia a través de los botones del gabinete que están completamente integrados en el **DT** pero sólo cuando se entra en el manual inmersivo. El operador en este entorno virtual puede seguir la secuencia operativa correcta o no y observar que sucede tras cada acción, incluyendo la activación de interruptores, selección de opciones en el HMI y su posterior visualización del estado del sistema incluso de maneras imposibles en la vida real como es observar dentro de los tornillos o por debajo de las cuchillas para comprobar su correcto funcionamiento o en su defecto, las consecuencias de sus errores.

Capítulo 4

Evaluación

El proceso de evaluación del **DT** desarrollado tuvo como propósito analizar su desempeño en diferentes entornos de ejecución y verificar el grado de realismo, estabilidad e interacción alcanzado en cada uno. Para ello, se realizaron pruebas en cuatro plataformas: computadora personal, visor de **AR** *Microsoft HoloLens*, visor de **VR** *Meta Quest 3* y entorno de navegador web. Cada uno de estos escenarios ofrece distintas capacidades de interacción y exige diferentes necesidades de procesamiento, compararlas permitió identificar las ventajas, limitaciones y alcances de cada entorno.

Adicionalmente se evaluó a través de voluntarios la capacidad del manual de guiar paso a paso al usuario y de que estos fueran capaces de completar satisfactoriamente el mismo.

4.1. Evaluación en estación de trabajo

4.1.1. Implementación

La etapa de desarrollo, depurado y la primer prueba se llevó a cabo en una **WS** dentro del entorno nativo de *Emulate3D*. Este no necesita equipo adicional para proporcionar al usuario la experiencia en cuestión ya que esta se lleva a cabo en la misma interfaz que se realiza el desarrollo.

La interacción del usuario con el **DT** se puede realizar tanto utilizando teclado y ratón o un mando de *Xbox*, la primera está diseñada para la fase de depuración y la segunda para el usuario final.

4.1.2. Experiencia de usuario

Como se mencionó antes, la mejor forma de realizar la experiencia de capacitación es a través del uso de un control de *Xbox* que le permite al operador desplazarse horizontal y verticalmente con el uso de la palanca derecha y cruceta respectivamente. La interacción con el entorno se realiza a través de presionar el botón *A* de color verde y se verá afectado lo que esté bajo el cursor de la computadora que se mantiene fijo en el centro de la pantalla mientras se utilice el mando.

Esta forma de interactuar tiene el mejor motor de visualización pues se cuenta con la opción de usar el que proporciona *Emulate3D* o *Unreal Engine 5* que es superior respecto al primero debido a que este último añade reflejos y sombras que le dan mucho más realismo visual al proceso.

4.1.3. Limitaciones

La mayor desventaja de esta forma de experimentar la capacitación es que debe visualizarse en una pantalla, monitor o proyector lo cual limita en gran medida la inmersión que experimenta el usuario y restringe su caso de uso a la situación en que no se cuente con un visor de **VR** o que el operador reporte sentirse mareado con el mismo.

4.2. Evaluación en navegador *web*

Esta versión buscó ofrecer una alternativa ligera que pudiera visualizarse sin requerir hardware especializado, manteniendo la visualización esencial del modelo.

4.2.1. Implementación

Emulate3D proporciona la capacidad de albergar un servidor web en la computadora que está ejecutando el software, gracias a este es posible acceder al **DT** a través de cualquier navegador *web* tales como *Mozilla Firefox*, *Microsoft Edge* o cualquiera incorporado por defecto tanto en televisores o teléfonos inteligentes, consolas o visores de **VR** que se encuentren en la misma red local en la que se encuentra la computadora que alberga la aplicación activa de *Emulate3D*, estos pueden acceder al **DT** a través de la dirección *IP* del equipo de cómputo en el puerto 9080 por defecto.

4.2.2. Experiencia de usuario

La mayor ventaja de este método para acceder al gemelo digital es que se puede realizar desde cualquier dispositivo que cuente con un navegador *web* y esto permite que múltiples personas puedan inspeccionarlo desde la posición que deseen y lo exploren libremente sin la necesidad de instalar ningún software adicional al que por defecto tienen dispositivos como los teléfonos inteligentes.

Esta aproximación únicamente permite la visualización del **DT** por lo que este es completamente explorable y se reflejan en tiempo real los cambios que se hacen sobre el mismo o los procesos que se ejecutan en este pero el usuario no es capaz de interactuar de ninguna manera por lo que se reduce a un simple espectador.

4.2.3. Limitaciones

La mayor limitación es la incapacidad del usuario de interactuar con el **DT** por lo que sólo puede observar y explorar el proceso, esto contrasta con su gran accesibilidad por lo que esta modalidad se considera útil en presentaciones, revisiones, y supervisión remota ya que permite explorar el funcionamiento del sistema a través de una red local y si se necesita, es posible implementarlo de forma que se pueda acceder al mismo a través de internet.

4.3. Evaluación en *Microsoft HoloLens*

Este dispositivo fue el primer visor en el que se realizaron pruebas para evaluar la viabilidad del mismo en la presentación e interacción con el **DT**, esto con el propósito de lograr una experiencia inmersiva de capacitación.

4.3.1. Implementación

La implementación es muy semejante a la que se realizó para cualquier navegador *web* pues de la misma manera aprovechamos el servidor *web* que *Emulate3D* permite crear simplemente presionando un botón en su interfaz. Para acceder al mismo desde los visores de **AR** de *Microsoft* necesitamos descargar una aplicación desde su tienda virtual llamada *Demo3D* y dentro de esta ingresar la dirección *IP* de la computadora que alberga el **DT** junto con el puerto que por defecto es el 9080, de la siguiente manera: **http://192.168.1.205:9080**

4.3.2. Experiencia de usuario

Una vez habiendo accedido desde el visor al **DT** el usuario podrá visualizar el proceso en escala real, permitiéndole caminar alrededor de las mismas y explorarlas como si se encontrara en la planta real.

El usuario es capaz de interactuar con el **DT** haciendo un gesto de pellizco con los dedos, esto le habilita a accionar botones e interactuar con la **HMI**.

4.3.3. Limitaciones

Una de las mayores limitaciones de la **AR** es la necesidad de un espacio apto para la capacitación ya que es recurrente encontrarse con obstáculos como mesas o sillas durante la experiencia pues se exige que el usuario camine para explorar la planta.

La segunda limitación de la **AR** es que requiere gran capacidad de cómputo pues el procesamiento para ser presentado se realiza en la computadora que alberga la sesión de *Emulate3D* por lo que si no se cumplen los requisitos necesarios se nota un gran retraso entre las acciones realizadas y su efecto en el **DT**.

El caso de uso de la **AR** a partir de un **DT** para la capacitación es en los casos que no sea necesario desplazarse físicamente durante las labores que habrá de realizar el operador.

4.4. Evaluación en *Meta Quest 3*

El uso de **VR** para la capacitación a través de su implementación en un **DT** resultó muy conveniente por las razones que se detallan a continuación.

4.4.1. Implementación

Para visualizar el **DT** en visores de **VR** se realiza el mismo proceso que en **AR**, aprovechamos el servidor *web* que *Emulate3D* permite crear. Accedemos al mismo desde los visores de **VR** de *Meta*, descargamos la aplicación llamada *Demo3D* desde su tienda virtual y dentro de esta ingresamos la dirección *IP* de la computadora que alberga el **DT** junto con el puerto que por defecto es el 9080, de la siguiente manera: **http://192.168.1.205:9080**

4.4.2. Experiencia de usuario

Esta tecnología es la que reportó mejores resultados debido a que el entorno virtual que proporciona es totalmente inmersivo y le permite al usuario desplazarse por el mismo con los controles manuales que se le proporcionan al usuario junto con el visor mismo.

La mayor ventaja es que le permite al operador realizar la secuencia de capacitación sentado y sin exponerse a ningún tipo de peligro y que ambos mandos le proporcionan retroalimentación pues vibran cuando se interactúa con un objeto.

4.4.3. Limitaciones

El uso de **VR** es la tecnología que menos limitaciones presenta, aún con esto sí las posee por ejemplo la sensación de inmersión que proporciona puede producir sensaciones desagradables en algunas personas como puede ser el vértigo.

Esta tecnología es la más apta para el caso de uso que planteamos darle a los **DT** en este trabajo pues permite al operador realizar sus labores de la misma forma que las realizaría en la planta real.

4.5. Evaluación con voluntarios

Una vez completado el manual inmersivo, se solicitó a un colaborador, sin contexto previo sobre el proceso, que realizara la operación de la trituradora y reportara las áreas de mejora identificadas durante su experiencia. Posteriormente, se corrigió el manual tomando en cuenta la retroalimentación recibida y se pidió a la misma persona que repitiera el procedimiento para detectar nuevos puntos de optimización. Tras esta etapa, se implementaron las correcciones y se replicó el proceso con un voluntario diferente. De este ciclo de pruebas se obtuvieron los siguientes resultados:

- La frecuencia con la que los usuarios dudaban sobre qué acción realizar a continuación se redujo gradualmente con las correcciones al sistema. Este proceso de prueba y retroalimentación concluyó cuando tres usuarios consecutivos no reportaron dificultades que le impidieran terminar la experiencia.
- Se observó la capacidad de los usuarios de recordar el procedimiento de encendido en la segunda iteración de los usuarios, evidenciado por la omisión de la lectura de los carteles guía. Gran parte de los colaboradores completaron la experiencia sin problemas en su segunda iteración, aquellos que presentaron dificultades, al cometer algún error, volvían a consultar las instrucciones visuales, corregían su error y completaban satisfactoriamente la experiencia.
- En la versión final de la experiencia, tres voluntarios lograron completar el manual inmersivo en su primer intento y sin reportar dificultades. En este punto, se dieron por finalizadas las pruebas con colaboradores y con esto se validó la capacidad del manual para guiar al usuario paso a paso durante toda la experiencia.

4.6. Discusión

Este proceso de evaluación permitió contrastar el desempeño del **DT** en diferentes plataformas de visualización que permiten distintos niveles de inmersión e interacción. Cada entorno presentó capacidades que influyen directamente en la calidad de experiencia y en el que tanto los usuarios pueden aprovechar las características del modelo por lo que algunos son aptos para capacitación y supervisión industrial mientras que otros únicamente para la segunda.

En el caso de la **WS**, el entorno de escritorio de *Emulate3D*, ofreció la experiencia más estable y fluida en términos de rendimiento y capacidad gráfica. Esto se debe a que todo el cálculo para la

visualización se realiza localmente, lo cual evita retrasos o pérdidas de conexión. La posibilidad de emplear un control de *Xbox* brinda flexibilidad en la interacción. Aún con esto, su mayor desventaja radica en la limitada sensación de inmersión, ya que la experiencia depende completamente de una pantalla convencional. Por ello, esta modalidad resulta adecuada principalmente para la etapa de desarrollo, depuración o como recurso de capacitación alternativo en caso de no contar con uno mejor como **VR**.

En contraste, el entorno de navegador *web* se distingue por su alta accesibilidad. La capacidad de acceder al **DT** desde cualquier dispositivo con un navegador *web* convierte a esta alternativa en la más práctica para la visualización del proceso. La ausencia de requisitos de aplicaciones adicionales o capacidad de cómputo la hacen ideal para presentaciones o revisiones grupales. No obstante, la imposibilidad de interactuar con el entorno lo reduce a un modo de observación pasiva.

Por su parte, en el área de tecnologías disruptivas, el uso del visor de **AR** *Microsoft HoloLens* demostró características muy interesantes. La capacidad de visualizar el **DT** a escala real y de desplazarse alrededor del modelo aporta una sensación espacial interesante para entender la disposición física de los componentes. Sin embargo, esta modalidad depende en gran medida de un espacio apto para realizar la capacitación y de la capacidad de cómputo que posee la computadora que alberga el **DT**, lo que puede provocar latencias perceptibles. Su uso resulta conveniente cuando se busca contextualizar al operador dentro de su entorno real de trabajo si este es pequeño o no necesita desplazarse para realizar sus labores.

La implementación en el visor de **VR** *Meta Quest 3* es la plataforma que presentó los mejores resultados. El gran nivel de inmersión, junto con la posibilidad de interactuar directamente mediante los controles y recibir retroalimentación inmediata reproduce con gran fidelidad la experiencia operativa dentro de la planta. Esta modalidad permite recrear la secuencia de trabajo completa de forma segura y sin limitaciones. Su principal limitación se asocia a la incomodidad que pueden experimentar algunos usuarios debido al movimiento simulado, como puede ser una sensación de vértigo.

Las diferencias entre plataformas permiten elegir la más adecuada según el objetivo: desarrollo, presentación o capacitación inmersiva, como se muestra en la tabla 4.1.

Durante las pruebas con colaboradores se observó que estos se familiarizan en la primer iteración con la operación de encendido de la trituradora, lo cual nos deja ver tus efectividad en apoyar al operador a familiarizarse con su entorno de trabajo. En su versión final el manual fue capaz de orientar en el proceso a tres personas sin contexto del mismo por lo que se logró validar el uso de carteles para guiar al usuario en sus tareas.

Los resultados evidencian que el **DT** desarrollado es versátil y se puede usar de manera en diversas plataformas según las necesidades que se deseen satisfacer. Mientras que la ejecución en **WS** y navegador *web* favorece la accesibilidad y la demostración técnica, los entornos inmersivos como la **VR** y la **AR** potencian su valor como herramienta de capacitación. La experiencia con *Meta Quest 3* confirma el potencial del uso de gemelos digitales combinados con tecnologías inmersivas para la formación segura de operadores.

Tabla 4.1 Comparativa de plataformas utilizadas para la evaluación del gemelo digital

Plataforma	Ventajas	Desventajas	Área de aplicación
WS	Alta estabilidad y rendimiento; permite interacción mediante mando de <i>Xbox</i> ; motor gráfico <i>Unreal Engine 5</i> .	Inmersión limitada; depende de una pantalla convencional.	Desarrollo, depuración y capacitación si no se desea usar AR o VR.
Navegador web	Accesibilidad desde cualquier dispositivo; no requiere instalación de software adicional; permite exploración en tiempo real.	No permite interacción; El usuario necesita un dispositivo conectado a la red local.	Presentaciones, supervisión y revisiones remotas.
AR	Visualización a escala real; integración del entorno físico con el modelo virtual; interacción mediante gestos.	Requiere espacio físico despejado; alta demanda de procesamiento; retrasos en la visualización.	Capacitación limitada espacialmente.
VR	Alta inmersión; interacción natural mediante mandos; retroalimentación táctil; experiencia segura y completa.	Posibles molestias por vértigo o mareo.	Capacitación inmersiva y e interacción completa con procesos.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

El desarrollo del gemelo digital (DT) para la capacitación en la operación de una trituradora de residuos orgánicos demostró la viabilidad de los entornos virtuales inmersivos para reproducir procesos industriales de manera verosímil. Esta implementación garantiza la seguridad del operador durante la etapa de capacitación, permitiéndole recibir entrenamiento técnico sin la exposición a los riesgos inherentes de la operación física en planta.

El proyecto logró la integración exitosa de diversas áreas tecnológicas: modelado tridimensional, animación cinemática, comisionamiento virtual e implementación en plataformas de VR y AR. La sinergia de estos elementos resultó en un entorno interactivo que replica el comportamiento funcional de la máquina y su lógica de control. Esto aportó una plataforma capaz de cumplir múltiples propósitos y, específicamente en el ámbito de la capacitación, los resultados sugieren un alto potencial formativo gracias a su naturaleza inmersiva, la cual permite al operador familiarizarse con su entorno de trabajo. Esto fue validado por la capacidad de los voluntarios para prescindir de los carteles guía durante su segunda iteración, logrando completar el manual satisfactoriamente sin dicho apoyo.

A través del manual operativo inmersivo en su versión final permitió evaluar distintas plataformas de visualización. Tras comparar el desempeño y la experiencia de usuario en WS, navegador web y visores de AR y VR, se determinó que la VR es la mejor opción para la capacitación. Esta tecnología proporciona una interacción inmediata y un entorno de inmersión total, lo que le permite al operador practicar sus actividades desde un espacio seguro como puede ser una oficina.

Finalmente, se comprobó que combinar un DT con tecnologías inmersivas potencia su valor como herramienta de formación industrial al proveer un entorno en el cual se pueden cometer errores y corregirlos sin consecuencias en el entorno físico. La integración de un modelo tridimensional detallado con un PLC virtual, mediante protocolos industriales, permitió validar la lógica de control sin riesgos ni necesidad de pruebas en campo. Usar herramientas como *Emulate3D* confirma que es factible realizar capacitación industrial en entornos seguros reduciendo riesgos operativos.

5.2. Trabajo futuro

Al apreciar las posibilidades de un DT industrial y su proceso de desarrollo es fácil identificar diversas líneas de trabajo orientadas a expandir sus capacidades y aplicación. Algunas de las propuestas más relevantes son las siguientes:

- **Conexión con la maquinaria real:** Vincular el **DT** con el **PLC** que controla la trituradora para habilitar una comunicación entre estas dos entidades. Esto permitiría actualizar el modelo en tiempo real y emplearlo como herramienta de monitoreo y diagnóstico.
- **Validación con usuarios finales:** Aplicar la herramienta en capacitaciones reales para medir su efectividad en términos de tiempos de respuesta, reducción de errores y retención de conocimiento, comparándola con métodos tradicionales de entrenamiento.
- **Expansión del alcance:** Extender la metodología a otros equipos del área de pretratamiento y posteriormente a la planta completa, con el fin de desarrollar un entorno virtual integral que abarque todas las etapas del proceso productivo.
- **Aumento del realismo:** Integrar simulaciones dinámicas de motores que permitan reproducir con mayor fidelidad las interacciones entre los residuos orgánicos y los componentes mecánicos, mejorando así la fidelidad del gemelo.
- **Escalarlo a la nube:** Implementar la aplicación en servidores remotos, de modo que el sistema pueda utilizarse de manera colaborativa y desde cualquier dispositivo con acceso a internet, habilitando la capacitación remota y simultánea de múltiples usuarios.
- **Enfoque social y educativo:** Utilizar el **DT** como herramienta formativa en programas orientados a personas con poca o nula experiencia técnica que busquen fomentar la inclusión y facilitar el acceso a trabajos formales.

Finalmente, es importante mencionar que este trabajo sienta las bases para la aplicación de gemelos digitales y tecnologías disruptivas en el ámbito educativo e industrial pero su evolución depende de futuros desarrollos que en conjunto permitirán no solo mejorar la formación del personal, sino también que la industria adopte nuevas formas de interacción entre personas y equipo industrial que estén orientadas a la seguridad en los procesos productivos.

Referencias

- [Ansys, 2024] Ansys (2024). Ansys twin builder – create and deploy digital twin models. <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder>. Accedido: 2025-09-01. (Citado en página 8.)
- [Babalola, *et al.*, 2023] Babalola, A., Manu, P., Cheung, C., Yunusa-Kaltungo, A., & Bartolo, P. (2023). A systematic review of the application of immersive technologies for safety and health management in the construction sector. *Journal of Safety Research*, 87, 373–389, <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.01.007> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437523000075>. (Citado en página 2.)
- [Borole, *et al.*, 2023] Borole, Y., Borkar, P., Raut, R., Balpande, V. P., & Chatterjee, P. (2023). *Digital Twins: Internet of Things, Machine Learning, and Smart Manufacturing*. De Gruyter <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110778861/html>. (Citado en páginas 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15 y 20.)
- [FANUC, 2020] FANUC (2020). Digital and visual twins: Fanuc’s vision for the future of manufacturing. <https://www.fanucamerica.com/news-resources/articles/digital-and-visual-twins-fanuc-s-vision-for-the-future-of-manufacturing>. Accedido: 2025-10-02. (Citado en página 8.)
- [GE Digital, 2024] GE Digital (2024). Ge digital / predix. <https://www.ge.com/digital>. Accedido: 2025-09-01. (Citado en página 8.)
- [IBM, 2025] IBM (2025). Maximo application suite. <https://www.ibm.com/products/maximo>. Accedido: 2025-09-01. (Citado en página 8.)
- [Jongbloed, *et al.*, 2024] Jongbloed, J., Chaker, R., & Lavoué, E. (2024). Immersive procedural training in virtual reality: A systematic literature review. *Computers & Education*, 221, 105124, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105124> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131524001386>. (Citado en páginas 2 y 44.)
- [NASA, 2024] NASA (2024). Digital twin – a new frontier for nasa’s future missions. <https://www.nasa.gov/general/digital-twin/>. Accedido: 2025-10-02. (Citado en página 8.)
- [Pireddu, *et al.*, 2025] Pireddu, A., Innocenti, A., Lusuardi, L. M., Santalucia, V., & Simeoni, C. (2025). The impact and effectiveness of virtual reality applied to the safety training of workers in open-cast mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(2), 151, <https://doi.org/10.3390/ijerph22020151> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11855612/>. (Citado en página 1.)
- [Pribadi, *et al.*, 2024] Pribadi, A. P., Rahman, Y. M. R., & Silalahi, C. D. A. B. (2024). Analysis of the effectiveness and user experience of employing virtual reality to enhance the efficacy of occupational safety and health learning for electrical workers and graduate students. *Heliyon*, 10(15), e34918, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34918>. (Citado en página 1.)
- [PTC, 2024] PTC (2024). Thingworx industrial iot platform. <https://www.ptc.com/en/products/thingworx>. Accedido: 2025-09-01. (Citado en página 8.)

- [Siemens, 2024] Siemens (2024). Digital twin - siemens xcelerator. <https://www.siemens.com/digital-twin>. Accedido: 2025-09-01. (Citado en página 8)
- [UnoReciclaje/Bomatic, 2025] UnoReciclaje/Bomatic (2025). Triturador de basura: Bomatic b1700s — serie extra fuerte b1700dd (o b1700s). <https://www.unoreciclaje.com/productos/bomatic/b1700s/>. Accedido: 2025-10-02. (Citado en página 18)