



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO, SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ACADÉMICO DEL
PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL ECOLÓGICO MEDIANTE PLC Y HMI”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: BYRON JOSUE BUSTAMANTE CEVALLOS

TUTOR: ING.JORGE GREGORIO LLAGUNO VERA, MSC.

GUAYAQUIL – ECUADOR

2026


CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Yo, **Byron Josue Bustamante Cevallos** con documento de identificación N°0950542696; manifestó que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 30 de Enero del 2026

Atentamente,



Byron Josue Bustamante Cevallos

0950542696

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, **Byron Josue Bustamante Cevallos**, con documento de identificación N° 0950542696, expreso mi voluntad y por medio del presente documento de ceder a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales al ser el autor del trabajo de grado titulado: **"DISEÑO, SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ACADÉMICO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL ECOLÓGICO MEDIANTE PLC Y HMI"**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO ELECTRÓNICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que realizo la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 30 de Enero del 2026

Atentamente,



Byron Josue Bustamante Cevallos

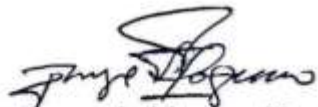
0950542696

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Jorge Gregorio Llaguno Vera** con documento de identificación N°0909020679, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **"DISEÑO, SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ACADÉMICO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL ECOLÓGICO MEDIANTE PLC Y HMI"**, realizado por **Byron Josue Bustamante Cevallos**, con documento de identificación N° 0950542696, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de trabajo de grado que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 30 de Enero del 2026

Atentamente,



Ing. Jorge Gregorio Llaguno Vera MSc.

0909020679

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, ante todo, a Dios por ser mi guía mi fortaleza y mi luz en cada etapa de este camino, por darme la fe y la perseverancia necesaria para no rendirme y seguir adelante en los momentos más difíciles, a mi madre por su amor incondicional, su apoyo constante y su sacrificio silencioso.

Gracias por creer en mi incluso cuando dudé por tus consejos, tu paciencia y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi abuela por acompañarme siempre, por su comprensión sus palabras de ánimos y por estar presentes en cada logro de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por guiar mis pasos y permitirme alcanzar este objetivo académico a mis padres, por su apoyo moral, emocional y económico durante todo mi proceso de tesis, por su orientación, paciencia y valiosa sugerencia que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

Agradezco a mis docentes, por compartir sus conocimientos y formar parte de mi crecimiento profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a la culminación de mi tesis.

RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DE PROYECTO TÉCNICO	TEMA DE PROYECTO TÉCNICO
2025	Byron Josue Bustamante Cevallos	Ing. Jorge Gregorio Llaguno Vera, MSc.	Diseño, Simulación y Desarrollo de un prototipo académico del proceso de fabricación de papel ecológico mediante plc y hmi

Este proyecto desarrolla un sistema automatizado para análisis formativos y de capacitación en el proceso de producción de papel ecológico mediante materiales reciclados. El sistema incorpora herramientas de control industrial a través de un PLC Siemens S7-1500, sensores de variables físicas (como la temperatura y la humedad), un variador de frecuencia y una HMI para monitoreo en vivo. La lógica de control se diseña por etapas, incorporando lazos PID para optimizar parámetros como la humedad en la fase de secado.

El prototipo simulado representa, en un entorno controlado, el ciclo completo de producción de papel reciclado, lo que permite ajustar el rendimiento del sistema a través de parámetros como la eficiencia del proceso y la cantidad de materia prima disponible. Este modelo proporciona una plataforma útil para prácticas de automatización industrial, sostenibilidad y evaluación de desempeño bajo diferentes condiciones operativas, y es escalable a plantas piloto o sistemas de capacitación técnica.

Desde un enfoque didáctico, el proyecto fortalece el aprendizaje práctico en la programación de controladores, la implementación de dispositivos, la supervisión HMI y la creación de procesos sustentables. Así, vincula conceptos teóricos con

aplicaciones concretas en el marco de la Industria 4.0 y se complementa a las tendencias presentes de capacitación técnica interdisciplinaria en sostenibilidad y automatización.

En un laboratorio, el prototipo experimental representa el ciclo global de producción, brindando una herramienta útil para prácticas de automatización, sostenibilidad y evaluación del funcionamiento. Además, se puede escalar a áreas piloto o a sistemas de formación técnica de avanzada.

PALABRAS CLAVES: PROTOTIPO, PAPEL ECOLÓGICO, RECICLAJE, PID, FORMACION, SIEMENS, SENSORES, ACTUADORES, SISTEMAS DE CONTROL, HMI.

ABSTRACT

YEAR	STUDENTS	DIRECTOR OF TECHNICAL PROJECT	TECHNICAL PROJECT THEME
2025	Byron Josue Bustamante Cevallos	Ing., Jorge Gregorio Llaguno Vera MSc.	Design, Simulation and Development of an academic prototype of the ecological paper manufacturing process using PLC and HMI.

This project develops an automated system for training and training analysis, the production process of ecological paper using recycled materials. The system incorporates industrial control tools through a Siemens S7-1500 PLC, physical variable sensors (such as temperature and humidity), a variable frequency drive and an HMI for live monitoring. The control logic is designed in stages, incorporating PID loops to optimize parameters such as humidity in the drying phase.

The simulated prototype represents, in a controlled environment, the complete recycled paper production cycle, allowing the system performance to be adjusted through parameters such as process efficiency and the amount of raw material available. This model provides a useful platform for industrial automation practices, sustainability and performance evaluation under different operating conditions, and is scalable to pilot plants or technical training systems.

From a didactic approach, the project strengthens hands-on learning in controller programming, device implementation, HMI monitoring and the creation of sustainable processes. It thus links theoretical concepts with concrete applications within the

framework of Industry 4.0 and complements current trends in interdisciplinary technical training in sustainability and automation.

In a laboratory, the experimental prototype represents the overall production cycle, providing a useful tool for automation practices, sustainability and performance evaluation. In addition, it can be scaled up to pilot areas or advanced technical training systems.

KEYWORDS: PROTOTYPE, GREEN PAPER, RECYCLING, PID, TRAINING, SIEMENS, SENSORS, ACTUATORS, CONTROL SYSTEMS, HMI.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA	1
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	2
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	8
ÍNDICE GENERAL	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
ÍNDICE DE TABLAS.....	16
INTRODUCCIÓN.....	17
1. EL PROBLEMA.....	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Importancia y Alcances.....	20
1.3. Delimitación.....	20
1.3.1. Temporal	20
1.3.2. Espacial.....	20
1.3.3. Académica.....	21
2. OBJETIVOS.....	22

2.1. Objetivo general	22
2.2. Objetivos específicos.....	22
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	23
3.1. Historia y situación actual del reciclaje de papel	23
3.2. Proceso de fabricación de papel ecológico.....	24
3.2.1. Análisis y diagnóstico de datos.....	24
3.3. Automatización con PLC y HMI	26
3.3.1. Siemens	26
3.3.2. PLC S7-1500.....	26
3.3.3. TIA Portal	27
3.3.4. PLCSIM.....	27
3.4. Variables	27
3.4.1. Variables de entrada.....	27
3.4.2. Variables del proceso	27
3.4.3. Variables de salida	28
3.5. Control PID aplicado a procesos industriales.....	28
3.5.1. Variable del proceso.....	28
3.5.2. Variable controlada.....	29
3.5.3. Punto de consigna.....	29
3.5.4. Variable manipulada.....	30
3.6. Variadores de frecuencia (VDF).....	30

3.6.1. Principios de funcionamiento del VDF	30
3.6.2. Integración del VDF con el PLC Siemens S7-1500.....	32
3.7. Software de automatización TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) 33	
3.8. PANTALLA TÁCTIL HMI KTP-700.....	35
3.9. Lenguajes de Programación utilizados en TIA Portal.....	36
3.9.1. Ladder	37
3.9.2. SCL	38
4. MARCO METODOLÓGICO	39
4.1. Métodos.....	39
4.2. Técnicas	39
4.3. Instrumentos de investigación y recolección de datos	40
4.4. Población y muestra	40
4.5. Diseño del prototipo.....	41
4.5.1. Proyecto nuevo en TIA portal	41
4.5.2. Creación de bloques.....	42
4.5.3. Declaración de las variables	43
4.5.4. Programación Ladder	44
4.5.5. Configurar HMI	49
4.5.6. Diseño de la pantalla HMI.....	50
5. RESULTADOS.....	59
5.1. Conexión del PLC y el HMI físicos.....	59

5.1.1. Funcionamiento del PLC	60
5.1.1. Funcionamiento del HMI.....	62
5.1.1. Movimiento del motor	66
5.1.2. Resmas producidas.....	67
6. CRONOGRAMA.....	69
7. PRESUPUESTO	70
8. CONCLUSIONES	71
9. RECOMENDACIONES	72
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Historia del papel</i>	23
Figura 2 <i>Proceso de fabricación de papel</i>	24
Figura 3 <i>interfaz TIA portal v18</i>	34
Figura 4 <i>Pantalla HMI</i>	36
Figura 5 <i>Lenguaje Ladder de programación</i>	38
Figura 6 <i>Módulos de entrada y salida digitales y analógicas</i>	42
Figura 7 <i>Bloques para la programación</i>	43
Figura 8 <i>Declaración de las variables para el proceso</i>	44
Figura 9. <i>Programación de la etapa general</i>	45
Figura 10 <i>Movimiento de cinta en la etapa de triturado</i>	46
Figura 11 <i>Movimiento del motor en la etapa de triturado</i>	46
Figura 12 <i>Condiciones para el accionado y apagado del motor.</i>	47
Figura 13 <i>Carga y descarga del triturado</i>	47
Figura 14 <i>Control de la temperatura del tanque en el destintado</i>	48
Figura 15 <i>Tiempo de residencia del material</i>	49
Figura 16 <i>Variables para la pantalla HMI</i>	50
Figura 17 <i>Lista de pantallas</i>	51
Figura 18 <i>Objetos para el desarrollo de las pantallas</i>	52
Figura 19 <i>Pantalla principal de presentación</i>	53
Figura 20 <i>Desarrollo de la pantalla secundaria con el proceso resumido</i>	54

Figura 21 <i>Etapa de triturado</i>	55
Figura 22 <i>Etapa de destintado</i>	56
Figura 23 <i>Etapa de depuración</i>	57
Figura 24 <i>Etapa de secado y PID</i>	58
Figura 25 <i>Conexiones del PLC y el HMI</i>	59
Figura 26 <i>Conexión de entradas y salidas del sistema</i>	60
Figura 27 <i>Programa cargado en PLC</i>	61
Figura 28 <i>Programa cargado en PLC</i>	62
Figura 29 <i>HMI pantalla principal</i>	63
Figura 30 <i>HMI pantalla principal</i>	64
Figura 31 <i>Etapa de triturado HMI</i>	65
Figura 32 <i>Subprocesos de la fabricación de papel ecológico</i>	65
Figura 33 <i>Movimiento del motor trifásico real</i>	66
Figura 34 <i>Resmas producidas</i>	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Cronograma del proyecto</i>	69
Tabla 2 <i>Presupuesto del proyecto</i>	70

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el incremento de los problemas ambientales derivados de la sobreexplotación de los recursos naturales ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles que permitan equilibrar el desarrollo productivo con el cuidado del medio ambiente. Uno de los sectores más cuestionados en este aspecto es la industria papelera, reconocida por su elevado consumo de agua, energía y materias primas forestales, además de la generación de desechos sólidos y emisiones contaminantes que impactan de manera negativa en los ecosistemas (Pérez & Freire, 2021). Frente a esta situación, la fabricación de papel reciclado se ha consolidado como una alternativa viable y ecológica, ya que promueve la reutilización de fibras, disminuye la presión sobre los bosques y reduce significativamente la huella de carbono asociada a la producción convencional de papel.

El presente proyecto plantea el diseño, simulación y construcción de un prototipo académico del proceso de fabricación de papel ecológico, cuyo propósito central es recrear de manera controlada y pedagógica las principales fases del ciclo de reciclaje, desde la preparación de la pulpa hasta el secado y la obtención del producto final. Para ello, se propone la integración de tecnologías de automatización industrial, incorporando un controlador lógico programable (PLC) Siemens S7-1500, sensores para la medición de variables físicas críticas como la humedad o la temperatura, y un sistema de supervisión mediante una interfaz HMI (Zhang, 2018). Esta infraestructura no solo permite representar con precisión un proceso industrial real, sino que también constituye una herramienta didáctica que conecta los conocimientos teóricos con su aplicación práctica en el ámbito académico.

Una de las características más relevantes de este trabajo es la inclusión de algoritmos de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), los cuales resultan indispensables para la regulación de variables dinámicas en los procesos industriales. En el caso del papel reciclado, el control de la humedad en la fase de secado es determinante para garantizar la calidad final del producto, por lo que la implementación de un sistema de control automático ofrece la posibilidad de optimizar el rendimiento, mejorar la eficiencia energética y minimizar errores asociados a la operación manual (Sánchez, Toapanta, & Mellichamp, 2021). Esta aproximación tecnológica permite a los estudiantes comprender la importancia del

control avanzado en la estabilidad de procesos industriales y su aplicación en contextos sostenibles.

El prototipo propuesto trasciende el objetivo de ser únicamente una maqueta de laboratorio, ya que se plantea como una plataforma de aprendizaje interactiva y flexible, capaz de adaptarse a diferentes condiciones de operación y escenarios de experimentación. De esta manera, se fomenta la formación de competencias en áreas como la automatización, la programación de PLC, la integración de sensores y actuadores, y la supervisión industrial mediante HMI, todo ello enmarcado en los principios de la Industria 4.0, donde la digitalización, el control remoto y el análisis de datos se convierten en ejes fundamentales para la innovación productiva (Cruz, 2023).

En este sentido, el trabajo no solo busca aportar una alternativa educativa que acerque a los estudiantes a la realidad industrial, sino que también constituye un aporte hacia la promoción de prácticas sustentables en el sector papelerero. Al reproducir un proceso de reciclaje mediante un sistema automatizado, se establece un puente entre la tecnología y la sostenibilidad (Cruz, 2023). Con el fin de exponer cómo la ingeniería puede contribuir a enfrentar los retos ambientales y, al mismo tiempo, preparar a las futuras generaciones de profesionales para liderar la transición hacia modelos de producción más limpios, eficientes y responsables.

1. EL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La industria del papel conocida por su alto uso de recursos naturales y producción de restos sólidos se encuentra frente a un reto relacionado con el medio ambiente que ha inspirado la investigación en el reciclaje como una estrategia sostenible. Varios estudios técnicos y ambientales señalan que de una tonelada de papel recuperado se pueden extraer entre 850 y 900 kilogramos de papel reciclado, lo que indica una eficiencia media del 85–90 % en masa, teniendo en cuenta las pérdidas relacionadas con la impureza, tintas y humedad residual (Diez, 2024)

Esta cantidad resulta en una aproximada conversión de 360 a 400 resmas por tonelada de papel reciclado (Acosta, 2024). Un indicador esencial para la dimensión de modelos simulados o prototipos de laboratorio. Asimismo, el proceso de reciclaje constituye una opción ecológica frente al papel puro, dado que disminuye de manera notable el uso de energía, agua y emisiones de CO₂, a la vez que facilita la incorporación de principios de economía circular en la cadena de valor del papel (Reyes, Pellegrini, & Gil, 2024)

A pesar de su relevancia, la enseñanza de procesos industriales sustentables como la fabricación de papel ecológico todavía presenta vacíos importantes en el ámbito académico. Muchos programas técnicos y de ingeniería no contemplan prácticas reales que integren automatización, control de variables físicas (como humedad y presión), y monitoreo en tiempo real mediante plataformas HMI o sistemas PLC (Armendariz & Poznyak, 2001).

La ausencia de herramientas académicas de este tipo genera una brecha significativa en la formación profesional, ya que limita la posibilidad de que los estudiantes comprendan en la práctica cómo se monitorean y regulan variables críticas como presión, humedad o tiempo de secado en procesos de producción industrial. Asimismo, impide que se desarrollen competencias vinculadas con la Industria 4.0, donde la digitalización, la simulación y el control automatizado son pilares fundamentales (Asanza & Segovia, 2021).

En este escenario, surge la necesidad de diseñar, simular y desarrollar un prototipo académico del proceso de fabricación de papel ecológico, que represente de forma

didáctica y funcional el ciclo de producción desde la materia prima reciclada hasta la obtención del producto final en forma de resmas. Este tipo de solución no solo permitirá reproducir condiciones reales del proceso industrial, sino que también constituirá un instrumento educativo para fortalecer la enseñanza de la sostenibilidad, la automatización y la innovación tecnológica en el campo académico.

1.2. Importancia y Alcances

Este proyecto hace posible la integración de la viabilidad ambiental y la automatización industrial a través del desarrollo de un prototipo práctico para una de las etapas de la fabricación de papel ecológico hecho de material reciclado. Su importancia se basa en que promueve la disminución del efecto ambiental asociado a la fabricación tradicional de papel, mientras que actúa como recurso didáctico para el aprendizaje práctico de control de procesos, instrumentación y sistemas PLC/HMI en contextos reales o simulados.

El proyecto incluye la creación, simulación y prueba de un sistema automatizado que comprende fases básicas como la dosificación, mezcla, secado y bobinado, controladas a través de un PLC Siemens S7-1500 y supervisadas desde una HMI. Se consideran factores físicos como la humedad, la presión y la temperatura, además de la aplicación de un controlador PID. La aplicación se restringe a un nivel de laboratorio, es decir, prototipo académico, sin producción industrial, pero puede ser adaptada a entornos de capacitación técnica o investigación aplicada.

1.3. Delimitación

1.3.1. Temporal

Se estima un período de cinco meses repartidos entre el estudio, recolección de información, desarrollo, pruebas de operación e implementación del prototipo con el objetivo de proporcionar un producto final.

1.3.2. Espacial

Se centra en el laboratorio de automatización de la UPS sede Guayaquil.

1.3.3. Académica

El proyecto incluirá los requerimientos de la Universidad Politécnica Salesiana en relación con los niveles de investigación y desarrollo, junto con los respaldos necesarios e incorporación de las materias enseñadas a lo largo del camino de grado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Diseñar, simular y desarrollar un prototipo académico para la fabricación de papel ecológico, utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC) y una Interfaz Hombre-Máquina (HMI), con el fin de validar el proceso en un entorno de laboratorio y sentar las bases para su posible implementación en plantas de producción.

2.2. Objetivos específicos

- Programar en el PLC las cuatro etapas del proceso de trituración, mezclado, prensado y secado.
- Programar en el HMI las cuatro etapas del proceso de tal manera que permita monitorear el proceso en tiempo real, ajustar parámetros y registrar datos operativos.
- Desarrollar el prototipo académico del proceso para realizar pruebas
- Implementar la programación del PLC y de HMI en un módulo del Laboratorio de Automatización Industrial II.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Historia y situación actual del reciclaje de papel

El papel ha sido, desde su invención en China durante el siglo II a. C., uno de los materiales más relevantes en el desarrollo cultural y tecnológico de la humanidad. No obstante, su producción tradicional, basada en la transformación de fibras de celulosa extraídas de la madera, ha generado impactos ambientales importantes, como la deforestación, el consumo intensivo de agua y la emisión de contaminantes durante los procesos de blanqueo y secado (Ferrara & Defeo, 2021).

A partir del siglo XX, con el aumento de la producción masiva y la presión sobre los recursos naturales, surgió con fuerza la práctica del reciclaje de papel como una estrategia para disminuir estos efectos. Actualmente, se estima que de una tonelada de papel usado se pueden recuperar entre 850 y 900 kilogramos de papel reciclado, lo que representa una eficiencia promedio del 85–90 %, aunque condicionada por la calidad de la materia prima y el tratamiento aplicado (Ferrara & Defeo, 2021).

Figura 1

Historia del papel



Nota. En la imagen se presenta como fue creado el papel en tiempos pasados.

Esta práctica no solo reduce la presión sobre los ecosistemas forestales, sino que también permite ahorrar energía y agua en comparación con la fabricación de papel virgen, consolidándose como un pilar dentro de la economía circular (Abushammala, Aljazzar, & Zubaidi, 2023)

decisiones informadas para optimizar la producción. La digitalización de datos mediante sistemas de supervisión y control se convierte así en un elemento esencial de la industria 4.0 (Kumar, Singh, & Patel, 2022).

3.2.1.1. Control de procesos y optimización

El control de procesos en la fabricación de papel ecológico permite mantener las variables dentro de rangos establecidos para garantizar la calidad del producto y la eficiencia energética. Estrategias como la automatización con lazos de retroalimentación (feedback) y el empleo de algoritmos PID facilitan la regulación de parámetros como la presión en la etapa de prensado o la velocidad de secado. La optimización implica no solo reducir costos, sino también minimizar desperdicios y asegurar la sostenibilidad del sistema (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2021).

3.2.1.2. Diseño y fabricación

El diseño de prototipos académicos busca representar, en una escala didáctica, los principios del proceso industrial. En el caso del papel ecológico, este diseño debe integrar fases básicas de pulpeo, filtrado, prensado y secado, junto con un sistema de automatización que supervise y controle las variables críticas. El desarrollo de prototipos permite a los estudiantes interactuar con tecnologías industriales en un entorno seguro, fomentando el aprendizaje activo y la aplicación práctica de los conocimientos (Jain, 2011).

3.2.1.3. Predicción de fallos

La predicción de fallos en sistemas industriales se apoya en técnicas de monitoreo continuo, sensores inteligentes y algoritmos de mantenimiento predictivo. En la fabricación de papel, detectar anomalías en motores, bombas o válvulas puede evitar pérdidas de material, tiempos de inactividad y sobrecostos. La integración de modelos de predicción en el prototipo académico fomenta la comprensión de cómo la inteligencia artificial y la analítica de datos se aplican en contextos reales (Zhang, 2018).

3.2.1.4. Robótica

El uso de sistemas robóticos en la industria papelera se orienta principalmente al transporte, empaquetado y manipulación de materiales. En el entorno académico, la inclusión de robots o manipuladores automatizados en prototipos de fabricación de papel ecológico permite ejemplificar cómo la robótica colaborativa se integra a procesos industriales sustentables, mejorando la seguridad y la eficiencia operativa (Elvins, 2009).

3.3. Automatización con PLC y HMI

La automatización industrial se ha consolidado como un elemento esencial para el control eficiente de procesos. Los PLC (Controladores Lógicos Programables) constituyen el núcleo de estos sistemas, permitiendo la regulación automática de equipos y la supervisión de variables en tiempo real. Complementariamente, las HMI (Interfaces Hombre-Máquina) ofrecen un entorno gráfico donde los operadores pueden visualizar el estado del sistema, ajustar consignas y recibir alertas. Esta combinación no solo optimiza la producción, sino que también incrementa la seguridad y facilita el diagnóstico de fallas (Bednarek, 2012).

3.3.1. Siemens

Siemens es uno de los principales fabricantes de soluciones de automatización, destacando por la fiabilidad de sus PLC, la integración con sistemas SCADA y su compatibilidad con estándares de la industria 4.0. La compañía ha desarrollado plataformas que permiten tanto el control de procesos complejos como la formación académica, lo que la convierte en una referencia en el ámbito educativo e industrial (Siemens, 2021).

3.3.2. PLC S7-1500

El S7-1500 es una de las series más avanzadas de Siemens, caracterizada por su capacidad de procesamiento rápido, seguridad integrada y conectividad con redes industriales modernas. Este PLC ofrece módulos de entrada y salida analógicos y digitales, ideales para controlar variables como humedad, presión y temperatura en prototipos de fabricación de papel. Su arquitectura modular lo hace flexible para adaptarse a diferentes escalas de proyectos (Siemens, 2021).

3.3.3. TIA Portal

El Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) es el entorno de programación de Siemens que permite configurar, programar y supervisar PLC, HMI y variadores de frecuencia desde una misma plataforma. Esta herramienta facilita la integración de todos los dispositivos del sistema y simplifica el diseño de proyectos de automatización. En el contexto académico, el TIA Portal resulta fundamental para enseñar programación en Ladder, SCL y otros lenguajes normalizados (H. Rahman, 2019)

3.3.4. PLCSIM

El PLCSIM es un software de simulación que acompaña al TIA Portal y que permite validar programas de control sin necesidad de hardware físico. Gracias a esta herramienta, los estudiantes pueden verificar la lógica de control, simular entradas y salidas, y detectar posibles errores antes de la implementación en el prototipo real. De esta forma se reduce el riesgo de fallos y se optimiza el proceso de aprendizaje (Siemens, 2021).

3.4. Variables

En los sistemas de automatización industrial se distinguen tres tipos principales de variables:

3.4.1. Variables de entrada

Son señales provenientes de sensores o dispositivos externos que informan al PLC sobre el estado del proceso, como temperatura, nivel de agua o humedad del papel.

3.4.2. Variables del proceso

Corresponden a los parámetros internos que describen el estado dinámico del sistema, como la presión de prensado, la velocidad de secado o el flujo de agua reciclada.

3.4.3. Variables de salida

Son las señales generadas por el PLC hacia actuadores como motores, bombas o resistencias, que modifican el proceso en función de los valores deseados.

3.5. Control PID aplicado a procesos industriales

El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es una de las estrategias de regulación más utilizadas en la industria, debido a su simplicidad y robustez. Este controlador ajusta la variable manipulada de forma que la variable de proceso siga el punto de consigna con el menor error posible. En la fabricación de papel, un PID puede aplicarse al control de temperatura en el secado, manteniendo condiciones estables y optimizando el consumo de energía (Abushammala, Aljazzar, & Zubaidi, 2023)

3.5.1. Variable del proceso

La variable del proceso se refiere al parámetro físico específico que se busca regular dentro de un sistema industrial para garantizar que el funcionamiento sea óptimo y cumpla con los estándares de calidad y eficiencia (Ortiz, 2019).

Este parámetro puede ser de distinta naturaleza según el tipo de proceso: temperatura, presión, nivel de líquido, flujo o humedad, entre otros. En el contexto de la fabricación de papel ecológico, la variable del proceso es fundamental para asegurar que las condiciones de secado, prensado y pulpeo sean las adecuadas, ya que cualquier desviación puede afectar directamente la calidad del producto final (Serrano Arenas, 2020).

Su correcta identificación y seguimiento permiten establecer los límites operativos y diseñar estrategias de control que mantengan el sistema dentro de rangos seguros, evitando pérdidas de material, sobreconsumo de energía o deterioro de los equipos. Además, la variable del proceso sirve como el punto de referencia para el diseño de sistemas automatizados, ya que define qué parámetros se medirán y controlarán mediante sensores y actuadores conectados a un PLC (Sparkfun, 2018).

3.5.2. Variable controlada

La variable controlada es el valor que efectivamente se mide en tiempo real mediante instrumentos o sensores y que refleja el estado actual de la variable del proceso. Es el parámetro que se compara continuamente con un punto de referencia o consigna para determinar si se requiere una intervención correctiva (Sánchez, Toapanta, & Mellichamp, 2021).

En un sistema de secado de papel reciclado, un sensor de humedad detecta el contenido de agua en la hoja y transmite esta información al PLC. La variable controlada permite que el sistema de regulación identifique desviaciones, evalúe la magnitud del error y active mecanismos de corrección a través de la variable manipulada (Qazi., 2016).

Su importancia radica en que constituye el enlace entre el mundo físico y el sistema de control, garantizando que las decisiones automatizadas se basen en datos precisos y confiables, reduciendo errores humanos y optimizando el desempeño general del proceso (Sánchez, Toapanta, & Mellichamp, 2021; Sánchez, Toapanta, & Mellichamp, 2021).

3.5.3. Punto de consigna

El punto de consigna representa el valor deseado que se pretende alcanzar y mantener dentro del sistema de control. Funciona como la referencia contra la cual se compara la variable controlada, definiendo los límites de operación ideales. En la práctica, establecer un punto de consigna adecuado implica considerar las características del proceso y los objetivos de producción (Negnevitsky, 2016).

Para determinar la humedad óptima para el secado del papel ecológico o la presión correcta durante el prensado de las fibras recicladas. Mantener la variable de proceso cerca del punto de consigna es esencial para la estabilidad del sistema y para evitar sobre correcciones que puedan generar fluctuaciones indeseadas (Armendariz & Poznyak, 2001).

Este concepto es central en el diseño de controladores PID, ya que las tres acciones proporcional, integral y derivativa actúan para minimizar la diferencia entre la variable

controlada y el punto de consigna, asegurando que el proceso opere de manera eficiente y consistente.

3.5.4. Variable manipulada

La variable manipulada es el parámetro sobre el cual el sistema de control ejerce acción directa para ajustar la variable del proceso y reducir la desviación respecto al punto de consigna. Esta variable se encuentra asociada a los actuadores del sistema, como válvulas, resistencias eléctricas, bombas, motores o ventiladores (A. I. Alsarawi, 2019).

En la fabricación de papel ecológico, si la humedad del papel es superior al valor deseado, la variable manipulada podría ser la velocidad del ventilador en el secador o la apertura de una válvula de drenaje para ajustar el flujo de agua. La variable manipulada constituye el mecanismo mediante el cual el controlador transforma la información del sensor en acciones concretas que afectan físicamente el proceso (Abushammala, Aljazzar, & Zubaidi, 2023).

Su diseño y calibración adecuados son determinantes para lograr un control preciso y estable, evitando tanto la subcorrección como la sobrecorrección, y asegurando que el sistema alcance de manera eficiente los objetivos de calidad y producción.

3.6. Variadores de frecuencia (VDF)

Los variadores de frecuencia son dispositivos electrónicos que permiten regular la velocidad de motores eléctricos al modificar la frecuencia de alimentación. En procesos de fabricación de papel, controlan motores de bombas o ventiladores, garantizando una operación eficiente y reduciendo el consumo energético (Malik et al., 2020).

3.6.1. Principios de funcionamiento del VDF

El variador de frecuencia (VDF) es un dispositivo electrónico que permite controlar la velocidad y el par de un motor de corriente alterna (AC) mediante la modificación de la frecuencia y el voltaje de la señal de alimentación. Su funcionamiento básico se estructura en tres etapas principales: rectificación, filtrado y conversión a corriente alterna modulada.

En la primera etapa, la tensión alterna de entrada se convierte en corriente continua a través de un rectificador, generalmente utilizando diodos o tiristores, con el objetivo de obtener una señal estable y continua que pueda ser modulada posteriormente. Esta corriente continua pasa por un circuito de filtrado que reduce el rizado y estabiliza la tensión, preparando la señal para la etapa de conversión.

En la etapa final, un inversor transforma la corriente continua en una salida de corriente alterna cuya frecuencia y voltaje son variables, según las consignas enviadas por el controlador. Esta modulación permite ajustar la velocidad del motor de manera proporcional a las necesidades del proceso, sin perder eficiencia ni provocar sobrecarga.

A través de la regulación de frecuencia, el VDF puede mantener el par constante, iniciar motores de gran potencia de forma suave, y adaptar la operación a cambios de carga en tiempo real, lo que representa un ahorro significativo de energía y mayor vida útil del motor.

Además, los VDF modernos incluyen sistemas de protección y comunicación digital, que permiten monitorear parámetros como corriente, temperatura, velocidad y fallos. Esto no solo facilita el diagnóstico preventivo, sino que también permite integrar el VDF en sistemas de automatización industrial, conectándolo a PLCs y HMIs para lograr un control coordinado y programable. En aplicaciones como la fabricación de papel ecológico, el VDF resulta fundamental para controlar motores de ventiladores, bombas y transportadores, ajustando la velocidad de acuerdo con variables críticas del proceso, como la humedad o la presión de secado, lo que asegura calidad constante y eficiencia energética.

Asimismo, el principio de control del VDF se basa en la relación directa entre frecuencia y velocidad del motor: al aumentar la frecuencia de la señal de salida, la velocidad del motor incrementa; al disminuirla, la velocidad se reduce. Este control preciso, combinado con retroalimentación de sensores, permite implementar estrategias avanzadas de regulación automática, integrando el VDF como un componente clave en sistemas de control industrial y prototipos académicos de automatización.

3.6.2. Integración del VDF con el PLC Siemens S7-1500

La integración de un variador de frecuencia (VDF) con un PLC Siemens S7-1500 constituye un elemento central en la automatización de procesos industriales, ya que permite un control preciso y dinámico de motores eléctricos que forman parte del sistema.

Este vínculo se puede establecer mediante señales analógicas o comunicación digital PROFINET, dependiendo del nivel de control requerido y la complejidad del sistema. Las señales analógicas, típicamente en rangos de 0–10 V o 4–20 mA, se utilizan para transmitir consignas de velocidad al variador de manera proporcional, mientras que la comunicación digital PROFINET permite el intercambio bidireccional de información entre el PLC y el VDF, incluyendo no solo consignas, sino también datos de retroalimentación como velocidad real del motor, estado operativo, alarmas y fallos (Asanza & Segovia, 2021).

El uso de PROFINET proporciona ventajas significativas frente a la conexión analógica tradicional, ya que permite supervisar múltiples parámetros en tiempo real, integrar lógicas de control complejas y reducir el cableado necesario en el sistema. Además, facilita la configuración y diagnóstico remoto del variador desde el TIA Portal, permitiendo ajustes finos de velocidad, aceleración, desaceleración y límites de torque directamente desde el software de programación. Esto es especialmente útil en prototipos académicos, donde los estudiantes pueden observar y manipular el comportamiento del motor bajo diferentes condiciones, evaluando cómo el VDF responde a cambios en la consigna o a perturbaciones externas.

En la práctica, la integración de un VDF con el S7-1500 permite implementar estrategias de control avanzadas, como arranque y paro suave, control de torque, regulación de velocidad en función de la carga, y protección contra sobrecorrientes o sobre temperaturas (Qazi., 2016).

Los PLC modernos, como el S7-1500, poseen módulos de entrada/salida analógicos y digitales diseñadas para interactuar directamente con el VDF, así como bloques de funciones preprogramadas para control de velocidad, monitoreo de fallos y sincronización de motores. La retroalimentación en tiempo real es crítica, ya que garantiza que cualquier desviación de la velocidad programada pueda ser corregida

automáticamente, manteniendo la estabilidad del proceso y asegurando eficiencia energética.

Además, de acuerdo con Jain (2011) esta integración permite la implementación de sistemas de control jerárquico, donde el PLC supervisa múltiples VDF conectados a diferentes motores dentro del mismo proceso industrial, coordinando su operación para optimizar la eficiencia global.

En un prototipo de fabricación de papel ecológico, los VDF pueden controlar simultáneamente la velocidad de bombas de pulpa, ventiladores de secado y transportadores, asegurando que cada etapa del proceso funcione de manera sincronizada y dentro de los parámetros establecidos. Esta coordinación es fundamental para replicar las condiciones de la industria real y ofrecer un aprendizaje práctico sólido en el entorno académico.

La integración de VDF y PLC con comunicación digital permite registrar y almacenar datos operativos, facilitando el análisis de rendimiento, la predicción de fallos y la optimización continua del proceso. La combinación de control preciso, monitoreo en tiempo real y capacidad de ajuste remoto convierte al VDF junto con el S7-1500 en un componente esencial de la automatización moderna, alineado con los principios de eficiencia energética, seguridad industrial y formación en Industria 4.0 (Siemens, 2021).

3.7. Software de automatización TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)

El TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) es una plataforma integral de software desarrollada por Siemens que permite la programación, configuración y supervisión de sistemas de automatización industrial de manera unificada. Su principal ventaja radica en que integra en un solo entorno todas las herramientas necesarias para trabajar con controladores lógicos programables (PLC), interfaces hombre-máquina (HMI), variadores de frecuencia, redes industriales y dispositivos de campo, reduciendo la complejidad y el tiempo de desarrollo de proyectos (Siemens, 2021).

Este enfoque centralizado facilita el diseño de sistemas industriales bajo un esquema modular, en el que cada componente puede ser configurado, probado y optimizado

sin necesidad de recurrir a programas externos, lo que asegura coherencia y compatibilidad entre los elementos del sistema.

En el ámbito académico, el uso de TIA Portal resulta fundamental, ya que no solo brinda la posibilidad de programar controladores Siemens de las familias S7-1200 y S7-1500, sino que también permite realizar simulaciones mediante herramientas como PLCSIM, donde los estudiantes pueden verificar la lógica de control antes de implementarla en hardware físico.

Además, su compatibilidad con estándares internacionales, como la IEC 61131-3, garantiza que el aprendizaje obtenido sea aplicable en entornos industriales reales. Asimismo, TIA Portal ofrece una interfaz intuitiva que combina la programación gráfica (por ejemplo, en Ladder o FBD) con lenguajes de alto nivel como SCL, lo que permite abordar desde rutinas sencillas de encendido y apagado hasta algoritmos avanzados de control de procesos, optimización de recursos y gestión de fallos (Siemens, 2021).

El software también se encuentra alineado con los principios de la Industria 4.0, al incorporar funciones de conectividad con sistemas de comunicación industrial como PROFINET y PROFIBUS, además de la posibilidad de integrar diagnósticos en tiempo real, almacenamiento de datos históricos y monitoreo remoto. Esto convierte a TIA Portal en una herramienta clave no solo para la enseñanza, sino también para la investigación aplicada en prototipos académicos que buscan replicar condiciones de la industria moderna, tal como ocurre en el proceso automatizado de fabricación de papel ecológico propuesto en este trabajo.

Figura 3

Interfaz TIA Portal v18



Nota. Imagen de la interfaz de TIA Portal (Siemens, 2021)

3.8. PANTALLA TÁCTIL HMI KTP-700

La HMI (Human Machine Interface), o interfaz hombre-máquina, es un dispositivo de interacción que permite al operador supervisar, controlar y configurar un proceso industrial de manera visual y sencilla. En su versión moderna, la HMI se presenta como una pantalla táctil que muestra gráficos, diagramas de flujo, indicadores y alarmas, facilitando la comunicación entre el usuario y el sistema automatizado. Su función principal es traducir la información generada por los sensores, PLC y variadores de frecuencia en datos comprensibles para el operario, permitiendo que este pueda tomar decisiones, ajustar consignas o responder a fallos en tiempo real. En este sentido, la HMI cumple un papel fundamental al proporcionar un entorno amigable que simplifica la complejidad técnica de los procesos industriales (Sánchez, Toapanta, & Mellichamp, 2021).

En el caso específico de un prototipo académico de fabricación de papel ecológico, la pantalla HMI se convierte en una herramienta pedagógica esencial, ya que permite visualizar cada etapa del proceso: la preparación de la pulpa, el prensado, el secado y la salida del producto final. A través de interfaces gráficas diseñadas en el TIA Portal, los estudiantes pueden observar cómo las variables físicas —como la humedad, la temperatura o la presión— cambian en tiempo real y cómo los algoritmos de control PID regulan dichas condiciones para garantizar un funcionamiento estable. De este modo, la HMI no solo cumple una función operativa, sino que también refuerza el aprendizaje al convertir datos abstractos en representaciones gráficas claras y didácticas (Naranjo & Romero, 2021).

Además, las pantallas HMI modernas cuentan con capacidades avanzadas, como la gestión de alarmas, el registro de datos históricos y la conexión a redes industriales mediante protocolos como PROFINET, lo que posibilita una integración directa con el PLC y otros dispositivos del sistema. Esta conectividad asegura que cualquier fallo en el motor, variador de frecuencia o sensor sea detectado inmediatamente y mostrado al operador en la interfaz, mejorando así la seguridad y reduciendo tiempos de respuesta ante incidentes (Naranjo & Romero, 2021).

En consecuencia, el uso de una HMI no solo moderniza el prototipo propuesto, sino que también lo aproxima a las condiciones reales de la industria 4.0, en donde la

digitalización, la supervisión remota y el control eficiente son pilares fundamentales para el desarrollo de procesos sostenibles y altamente competitivos.

Figura 4

Pantalla HMI



Nota. Parte frontal de una HMI (Siemens, 2021).

Un sistema embebido es un sistema electrónico que está diseñado para realizar una o varias tareas específicas e integrado en un dispositivo o producto, son básicamente pequeñas computadoras que se integran en otros dispositivos para proporcionar algunas funciones (Furber, 2010).

Estos sistemas cuentan con software y hardware que pueden incluir microcontroladores, sensores, actuadores, memoria y dispositivos de entrada/salida (Liu, 2017).

El programa que se ejecuta en un sistema integrado puede ser desde un sistema operativo hasta un conjunto de programas para realizar tareas específicas (Jain, 2011). Los sistemas integrados se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde productos electrónicos de consumo masivo hasta equipos industriales y médicos (Jain, 2011).

3.9. Lenguajes de Programación utilizados en TIA Portal

El TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) es una plataforma integral desarrollada por Siemens que permite la programación, configuración y supervisión

de sistemas de automatización industrial, incluyendo PLC, HMI y variadores de frecuencia.

Uno de sus principales atributos es la compatibilidad con los lenguajes de programación estandarizados bajo la norma IEC 61131-3, lo que garantiza que los programas desarrollados sean interoperables, portables y fácilmente comprensibles para ingenieros y técnicos en todo el mundo.

La disponibilidad de múltiples lenguajes permite adaptar la programación al nivel de complejidad del sistema y al perfil del programador, combinando facilidad de uso, potencia de cálculo y flexibilidad para desarrollar tanto lógicas simples de control como algoritmos avanzados de regulación, monitoreo y análisis de datos.

3.9.1. Ladder

El lenguaje Ladder, también conocido como diagrama de escalera, es un lenguaje gráfico ampliamente utilizado en la programación de PLC debido a su similitud con los esquemas eléctricos tradicionales. Cada línea o “peldaño” del diagrama representa una operación lógica o de control, similar a un contacto o relé en un circuito eléctrico.

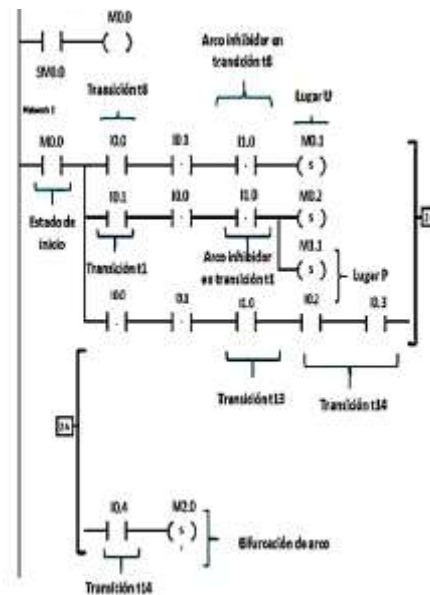
Esta representación facilita la comprensión de la lógica de control y permite que operadores, técnicos y estudiantes puedan visualizar claramente la secuencia de operaciones y el flujo de señales dentro del sistema (Armendariz & Poznyak, 2001).

El lenguaje Ladder es especialmente útil en aplicaciones industriales donde se requiere un control secuencial, activación de actuadores, temporizadores, contadores y alarmas, ya que permite desarrollar programas de manera intuitiva y realizar diagnósticos de fallas de forma rápida (Naranjo & Romero, 2021).

En el contexto educativo, su uso facilita la enseñanza de conceptos de automatización y control, ya que conecta la teoría de circuitos eléctricos con la programación de sistemas modernos de control industrial.

Figura 5

Lenguaje Ladder de programación



Nota. En la imagen se tiene el lenguaje Ladder que usa TIA Portal para programación

3.9.2. SCL

El Structured Control Language (SCL) es un lenguaje de programación de alto nivel incluido en el TIA Portal, basado en la sintaxis de Pascal, y diseñado para la creación de algoritmos más complejos que no se pueden manejar fácilmente con Ladder.

El SCL permite realizar operaciones matemáticas avanzadas, control de estructuras condicionales, bucles, arrays y manejo de datos, lo que lo hace ideal para el desarrollo de lógicas de control sofisticadas, optimización de procesos y cálculo de variables continuas en tiempo real (Jain, 2011).

En la fabricación de papel ecológico, el SCL puede ser utilizado para calcular de manera automática la velocidad óptima de motores, ajustar la humedad del pulpeo de forma dinámica o implementar estrategias de control PID más elaboradas. Su ventaja principal radica en que combina la claridad de un lenguaje estructurado con la capacidad de manejar operaciones complejas de forma eficiente, siendo una herramienta fundamental para proyectos de automatización educativa y simulación industrial avanzada.

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. Métodos

Para la presente investigación se adoptó un enfoque cuantitativo y de índole experimental, orientado a la construcción, simulación y análisis de un prototipo académico que represente el proceso de fabricación de papel ecológico.

Se empleó un método experimental porque se busca controlar y manipular variables del proceso mediante PLC y HMI, con el fin de observar su comportamiento en condiciones simuladas y reales. Esta aproximación permite establecer relaciones causa-efecto entre los parámetros controlados (humedad, presión, velocidad de secado) y los resultados obtenidos (calidad del papel, eficiencia y rendimiento).

Adicionalmente, se incorporó un método de análisis y diseño de sistemas, donde se aplican principios de ingeniería de control, automatización y modelado de procesos industriales. Esto implica simular el comportamiento del prototipo en plataformas como TIA Portal y PLCSIM antes de su implementación física, con el objetivo de minimizar errores, optimizar el control de variables y garantizar la funcionalidad del sistema.

Además, se incluyó un enfoque de investigación aplicada, ya que los resultados del prototipo pueden extrapolarse a entornos educativos e industriales para fortalecer la formación práctica y la comprensión de procesos sostenibles.

4.2. Técnicas

Para la ejecución del proyecto se empleó varias técnicas de carácter experimental y analítico. Entre ellas, la observación directa se utiliza para registrar el funcionamiento del prototipo, identificar fallos y evaluar la eficacia del control de variables en tiempo real. La simulación computacional mediante TIA Portal y PLCSIM constituye otra técnica fundamental, ya que permite verificar la lógica de control, ajustar parámetros y anticipar comportamientos del sistema sin necesidad de intervención física inicial.

Adicionalmente, se aplicaron técnicas de recolección y análisis de datos, mediante la instrumentación de sensores conectados al PLC que registran variables de proceso como humedad, presión y velocidad de motores. Estos datos son luego analizados con herramientas estadísticas para determinar la eficiencia del prototipo y evaluar la

calidad del papel ecológico producido. La combinación de estas técnicas asegura que la investigación no solo sea reproducible y controlada, sino también suficientemente rigurosa para extraer conclusiones válidas sobre la integración de automatización y sostenibilidad en procesos educativos.

4.3. Instrumentos de investigación y recolección de datos

Los instrumentos de investigación incluyeron tanto herramientas físicas como digitales. Entre los físicos se consideran sensores de humedad, presión, nivel de agua y temperatura, así como actuadores como bombas, motores y resistencias de calefacción, conectados al PLC para controlar y registrar las variables de manera automatizada. Estos instrumentos permiten medir con precisión los parámetros críticos del proceso, garantizando la validez y confiabilidad de los datos obtenidos.

En el ámbito digital, se utilizaron plataformas de simulación y programación como TIA Portal y PLCSIM, que permiten generar y validar la lógica de control, realizar pruebas de funcionamiento y registrar datos de operación sin necesidad de intervenir el prototipo físicamente en etapas iniciales.

Estos instrumentos facilitan la integración de variables de entrada, proceso y salida, y permiten almacenar los registros para su posterior análisis estadístico y comparativo. De este modo, la investigación combina medición directa, control automatizado y simulación computacional para generar un conjunto de datos robusto y confiable.

4.4. Población y muestra

La población de la investigación se definió de manera conceptual como los elementos y condiciones que intervienen en el proceso de fabricación de papel ecológico en un entorno académico, incluyendo tanto los componentes físicos del prototipo como los estudiantes y docentes que interactúan con el sistema para fines educativos. Dado que el estudio se centra en un prototipo a escala de laboratorio, la población está limitada a los módulos de control, sensores, actuadores y el software de simulación utilizado.

La muestra, en consecuencia, se determina como la selección representativa de variables, etapas del proceso y pruebas de funcionamiento del prototipo, a fin de

evaluar su desempeño y eficiencia. Esto incluye un número definido de ensayos de secado, prensado y formación de papel, así como registros de datos de sensores para cada ciclo experimental.

La muestra se seleccionó de forma intencional, asegurando que se abarque la totalidad de condiciones críticas del proceso, lo que garantiza que los resultados sean representativos y puedan extrapolarse a escenarios educativos similares.

4.5. Diseño del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se empleó el software TIA Portal, el cual permite programar y supervisar de forma integral cada una de las etapas que conforman el proceso de fabricación de papel. De manera complementaria, se implementan interfaces HMI que facilitan la visualización del funcionamiento del sistema en tiempo real, permitiendo un seguimiento dinámico y comprensible del proceso productivo.

4.5.1. Proyecto nuevo en TIA portal

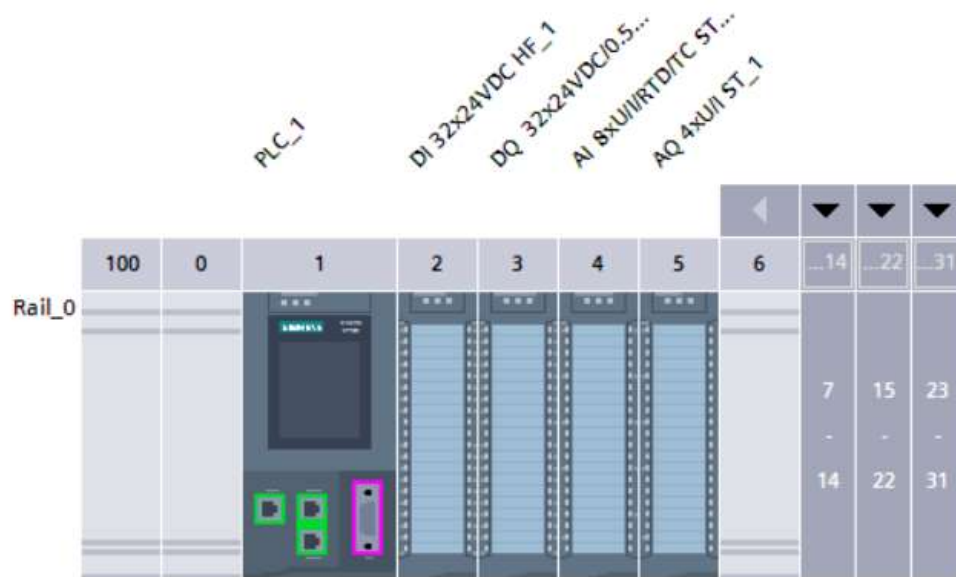
Para la creación de un nuevo proyecto en TIA Portal, se inició con definir el tipo de PLC y pantalla HMI que se va a utilizar. Para este proyecto se utilizó el módulo PLC S71500 y se selecciona mediante el siguiente proceso:

- Se inicia TIA Portal.
- Se crea un Nuevo Proyecto.
- Se elige el dispositivo PLC S7-1500 y la pantalla HMI KTP700 Basic.

Además, se seleccionó los módulos de entradas y salidas tanto digitales como analógicos que tiene el PLC como se observa en la figura 6. Estas son necesarias ya que se usa la comunicación con entradas y salidas analógicas y digitales.

Figura 6

Módulos de entrada y salida digitales y analógicas



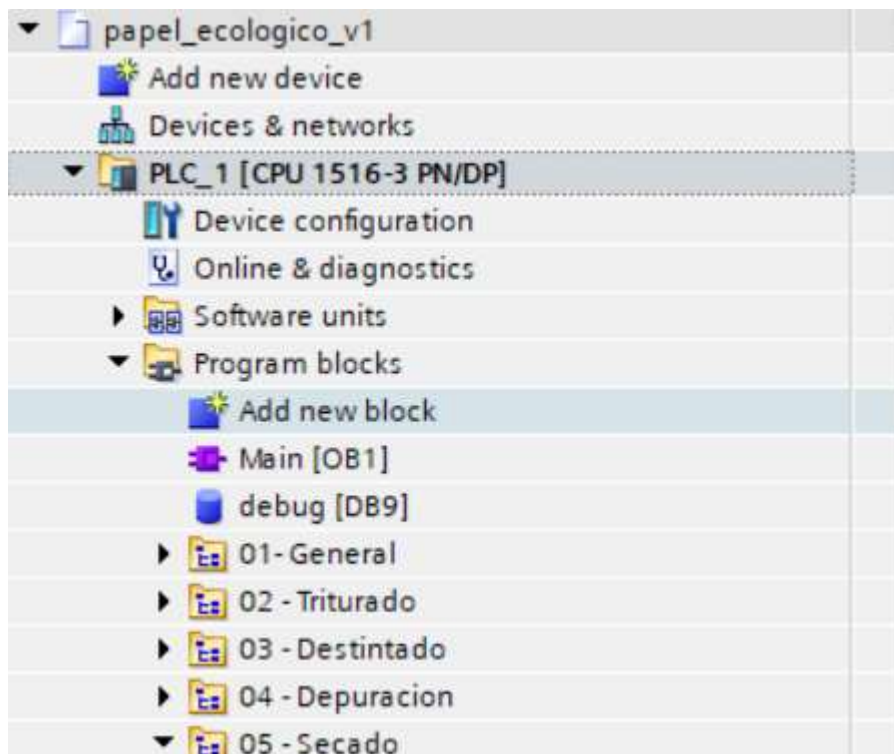
Nota. Se utiliza los módulos AI y AQ para las salidas analógicas.

4.5.2. Creación de bloques

Se desarrollo la programación en lenguaje para cada una de las etapas. Primero, se realizó la configuración de cada uno de los bloques con los que se trabajó como son el “general” que es con el que se controla todo el proceso, el bloque de cada uno de los procesos triturado, destintado, depuración y secado como se observa en la figura 7. Como cada uno de estos bloques están realizados por separado en el Main [OB1] se agrupan todos estos procesos.

Figura 7

Bloques para la programación



Nota. Se crea bloques para cada uno de los procesos

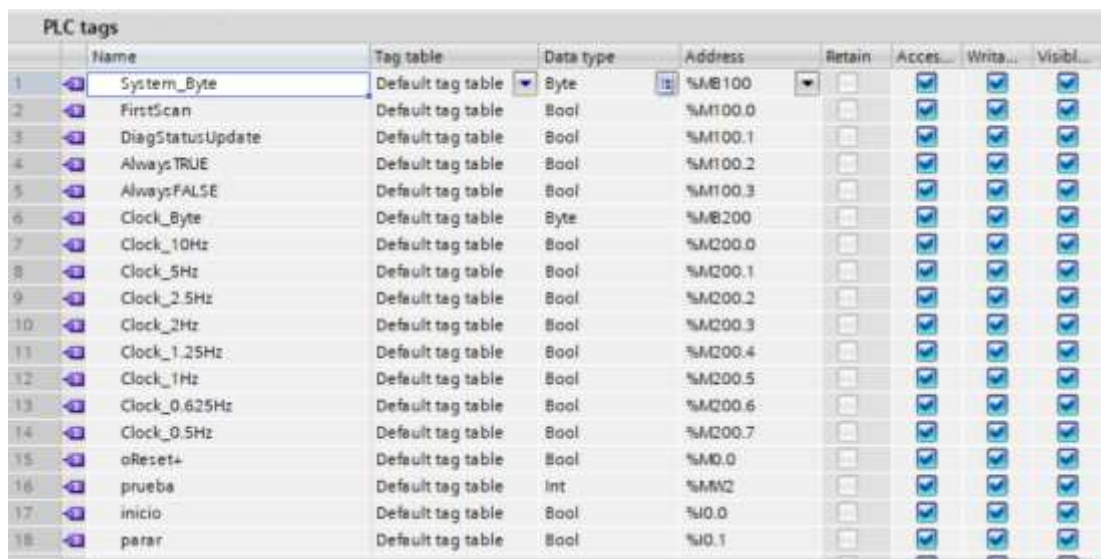
4.5.3. Declaración de las variables

En esta etapa se tiene las variables que se utilizaron en el proceso, entre las cuales destacan las señales de inicio y paro, responsables de activar y detener el funcionamiento del sistema, y que permiten el control del movimiento a lo largo de las distintas etapas del proceso.

Además, en La imagen 8 se muestra la tabla de *PLC Tags* configurada en el entorno TIA Portal, donde se detallan las variables utilizadas para el control y monitoreo del proceso. En ella se incluyen variables de sistema, señales de reloj a distintas frecuencias, así como entradas y marcas internas que permiten estructurar la lógica de control. Asimismo, se observa la asignación de direcciones de memoria específicas, lo que garantiza una correcta comunicación entre el programa del PLC y la interfaz HMI.

Figura 8

Declaración de las variables para el proceso



	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
1	System_Byte	Default tag table	Byte	%MB100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	FirstScan	Default tag table	Bool	%M100.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	DiagStatusUpdate	Default tag table	Bool	%M100.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	AlwaysTRUE	Default tag table	Bool	%M100.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	AlwaysFALSE	Default tag table	Bool	%M100.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Clock_Byte	Default tag table	Byte	%M200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Clock_10Hz	Default tag table	Bool	%M200.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Clock_5Hz	Default tag table	Bool	%M200.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Clock_2.5Hz	Default tag table	Bool	%M200.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Clock_2Hz	Default tag table	Bool	%M200.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Clock_1.25Hz	Default tag table	Bool	%M200.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Clock_1Hz	Default tag table	Bool	%M200.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Clock_0.625Hz	Default tag table	Bool	%M200.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Clock_0.5Hz	Default tag table	Bool	%M200.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	oReset+	Default tag table	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	prueba	Default tag table	Int	%M2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	inicio	Default tag table	Bool	%I0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	parar	Default tag table	Bool	%I0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Variables necesarias para programar el proceso completo

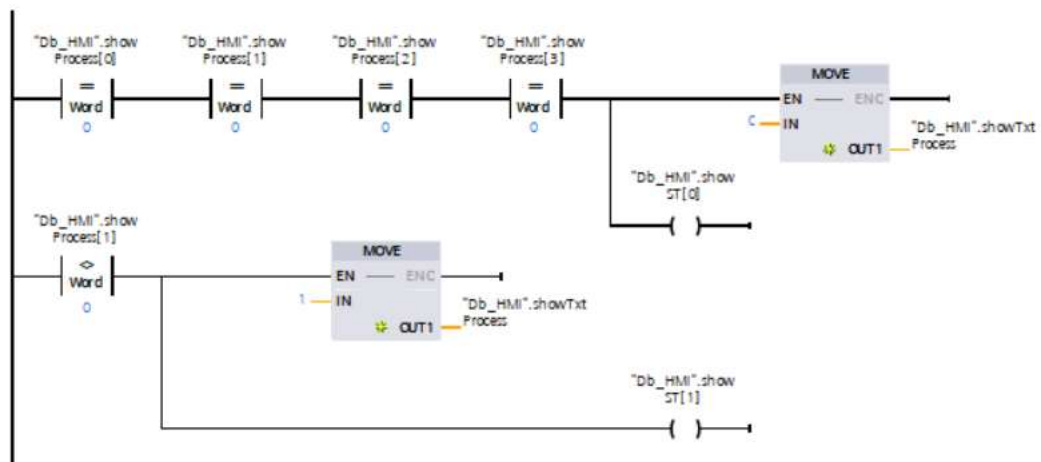
4.5.4. Programación Ladder

Se utilizó la programación Ladder/KOP para cada uno de los subprocesos. Primero se inició con el control general ya que en este se tiene todo el proceso de manera rápida, se genera que por cada etapa que pase se vaya encendiendo un indicador para saber que se está de manera organizada.

El cambio de cada una de las etapas se lo realiza a través de la función MOVE misma que se encarga de que al cumplir el proceso pase a la siguiente etapa hasta finalizar con la del secado como se muestra en la figura 9.

Figura 9.

Programación de la etapa general



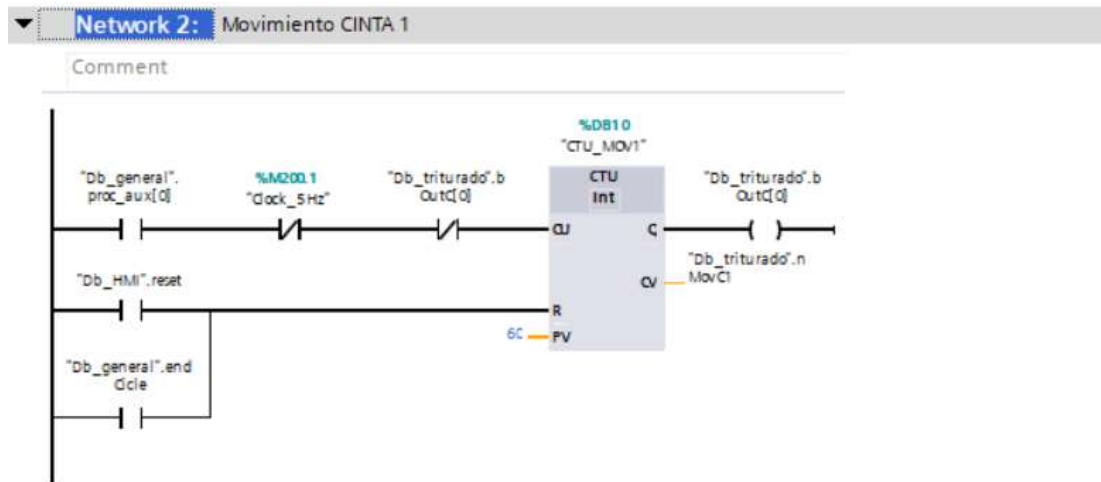
Nota. Se usa MOVE para pasar de etapa en etapa.

Una vez que se completó esta etapa, se pasa a la siguiente que es la del triturado. Aquí se tiene la llegada de los residuos para ser pasados a un tanque y ser molidos, para llevar los residuos de un lugar a otro se utiliza una banda transportadora misma que es la encargada de llevarlos desde el punto A hasta el punto B que es el recipiente.

Se utiliza en bloque CTU como se muestra en la figura 10. Este sirvió para contar eventos o pulsos dentro del sistema de control, incrementando su valor cada vez que la señal de entrada cambia de estado inactivo a activo. Se empleo ya que se necesita contar las piezas que ingresan, permitiendo que el sistema tome decisiones cuando se alcanza un número determinado de eventos.

Figura 10

Movimiento de cinta en la etapa de triturado



Nota. Se usa CTU para contar la cantidad de material que ingresa al tanque.

Además, en esta etapa se tiene el encendido de un motor trifásico el cual se acciona una vez que la banda empiece a funcionar al mismo tiempo el tanque de triturado comienza a llenarse como se observa en la figura 11.

Figura 11

Movimiento del motor en la etapa de triturado

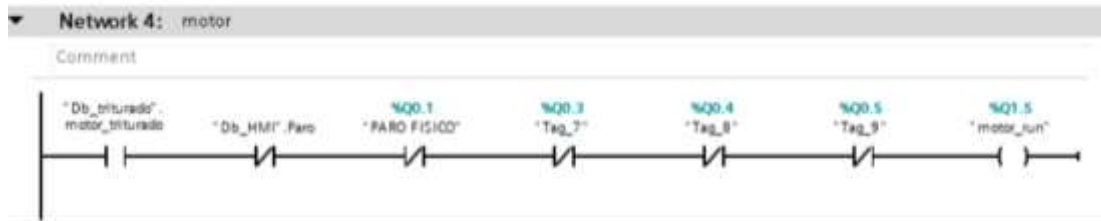


Nota. Para que el motor se accione se tiene la condición que primero debe activarse la banda.

El motor debe operar únicamente durante la etapa de triturado, permaneciendo apagado en las demás etapas del proceso. Para ello, se establecen las condiciones de control necesarias que permiten su accionamiento exclusivamente en dicha fase. Asimismo, se incorpora un paro de emergencia, el cual detiene inmediatamente el funcionamiento del motor al ser presionado; el sistema solo podrá reanudarse una vez que se libere el paro y se vuelva a accionar el botón de inicio como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Condiciones para el accionado y apagado del motor.

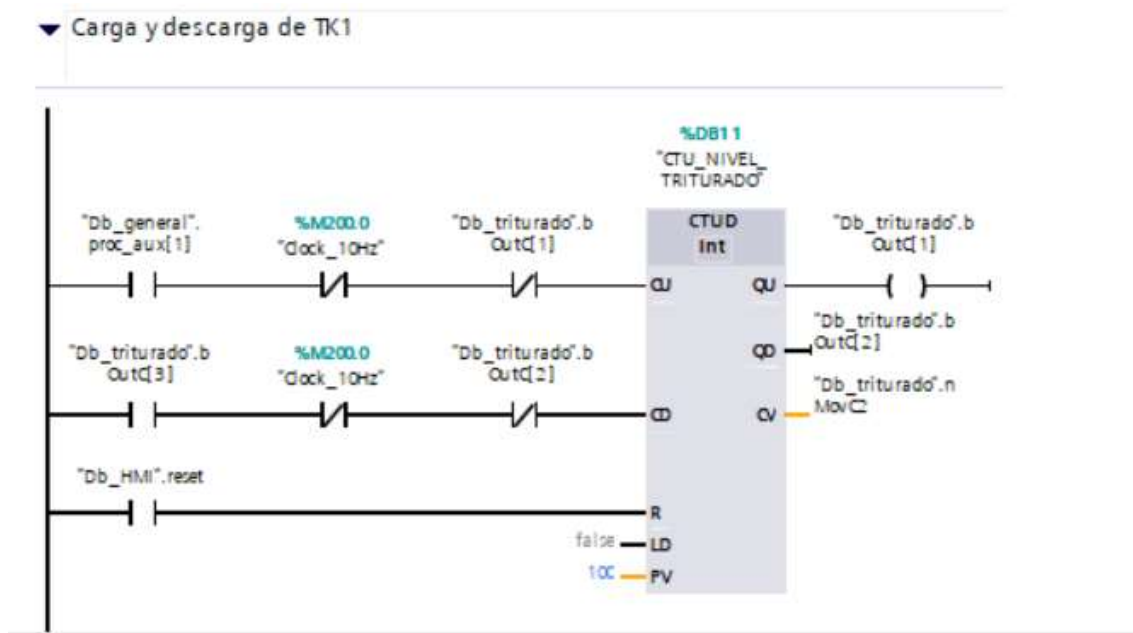


Nota. Con el botón de paro el motor debe apagarse.

Además, se tiene la carga y descarga del papel ya triturado para ello de usa el bloque CTUD que permite contar la cantidad de material que fue triturado, permitiendo aumentar o disminuir el valor del conteo según la señal recibida como se muestra en la figura 13.

Figura 13

Carga y descarga del triturado



Nota. Se usa el bloque CTUD para la cantidad de material triturado.

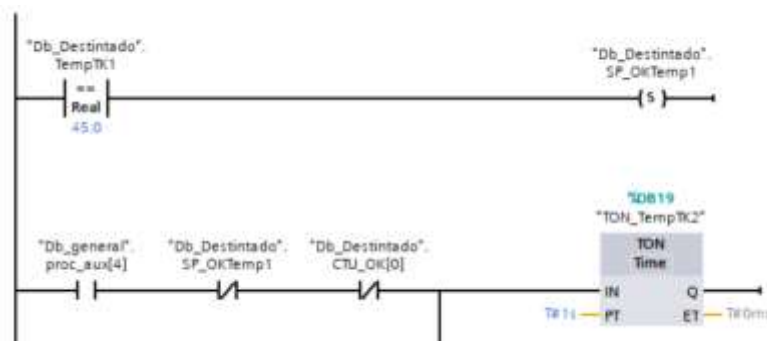
Para la etapa del destintado se detectó la temperatura del tanque TK1, la cual se comparó con un valor de referencia de 45 °C. Cuando esta condición se cumple, el

sistema activa una marca que indica que la temperatura requerida ha sido alcanzada y validada, quedando registrada para evitar repeticiones innecesarias.

Además, siempre que el proceso esté habilitado y aun no se ha completado la validación total de la etapa, se activa un temporizador de tipo TON con un retardo de un segundo, el cual funciona como un tiempo de estabilización antes de permitir el avance del proceso, asegurando así un control secuencial adecuado y una operación más estable y confiable del sistema como se observa en la figura 14.

Figura 14

Control de la temperatura del tanque en el destintado

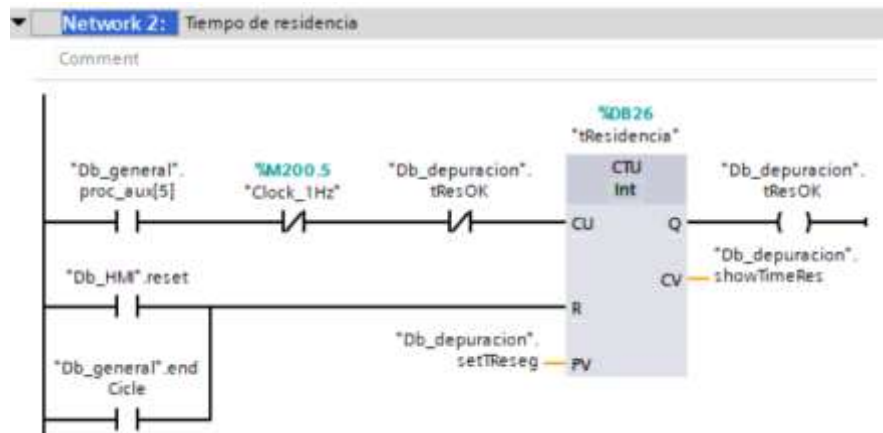


Nota. El temporizador ayuda a cambiar de etapa luego de cumplir el tiempo necesario.

En la etapa de la depuración, se controló el tiempo de residencia del proceso de mediante un contador ascendente. La lógica se habilita cuando el proceso está activo aprovechando una señal de reloj de 1 Hz. Este incrementa su valor de forma periódica siempre que aún no se haya alcanzado el valor requerido. Además, el sistema permite reiniciar el conteo tanto desde la interfaz HMI como al finalizar el ciclo del proceso, garantizando un control ordenado como se muestra en la figura 15.

Figura 15

Tiempo de residencia del material



Nota. En la imagen se tiene el control de la residencia del material en la etapa de depuración.

Por otro lado, en la etapa de secado se tiene el control de la temperatura y humedad. Este es el último proceso por lo que, al terminar se genera el número de resmas producidas.

Para las resmas producidas se considera que la máquina recepta únicamente 40kg de materia prima con la que se genera 16 resmas, para esta relación hay que tomar en cuenta que 1 resmas se producen con 2.5kg.

$$1 \text{ resma} = 2.5kg$$

$$16 \text{ resmas} = x$$

$$x = 16 * 2.5kg$$

$$x = 40kg$$

Una vez que el sistema completa las 16 resmas, el proceso se para y se debe ingresar los valores nuevamente para que empiece a funcionar.

4.5.5. Configurar HMI

Para el diseño de las pantallas en el HMI se creó variables que permitan conectar el PLC con HMI como se muestra en la figura 16.

Figura 16

Variables para la pantalla HMI

HMI tags				
Name	Tag table	Data type	Connection	PLC name
CTU_FinCiclo_CV	Default tag table	Int	HMI_Conne...	PLC_1
Datos_IMP	Default tag table	Dint	HMI_Connectio...	PLC_1
Datos_Reducion	Default tag table	Dint	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_depuracion_HumTK1	Default tag table	Real	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_depuracion_PresTK1	Default tag table	Real	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_depuracion_setReseg	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_depuracion_showTimeRes	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_depuracion_rResOK	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_Destintado_PresTK1	Default tag table	Real	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_Destintado_TempTK1	Default tag table	Real	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_general_proc_aux(0)	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_iniciosecado	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_Marcha	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_Paro	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_parosecado	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_reset	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1
Db_HMI_setkg	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1

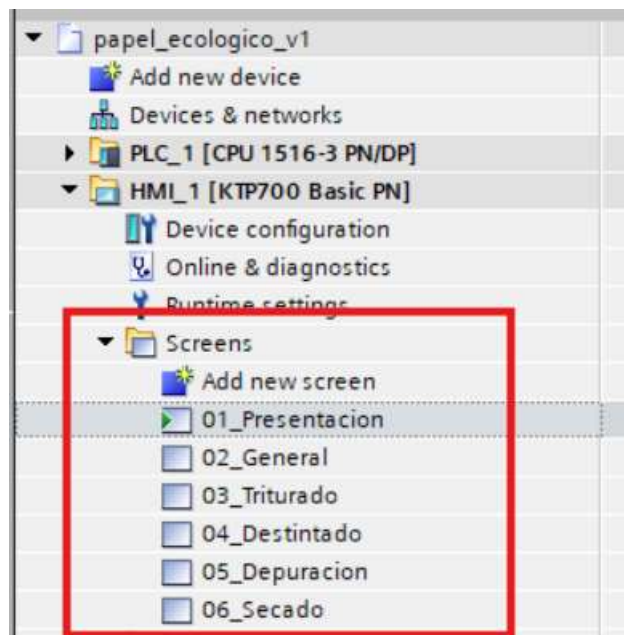
Nota. Las variables permiten conectar el HMI con el PLC.

4.5.6. Diseño de la pantalla HMI

Una vez que se configuró las variables que se van a utilizar, se desarrolló cada una de las pantallas necesarias. Según la norma ANSI/ISA-101.01-2015 Human Machine Interfaces for Process Automation Systems (AMERICAN NATIONAL STANDARD, 2015) se debe presentar una pantalla de presentación, una general que muestre el sistema completo resumido y los botones principales y por último una pantalla para cada uno de los subprocessos desarrollados como se muestra en la figura 17.

Figura 17

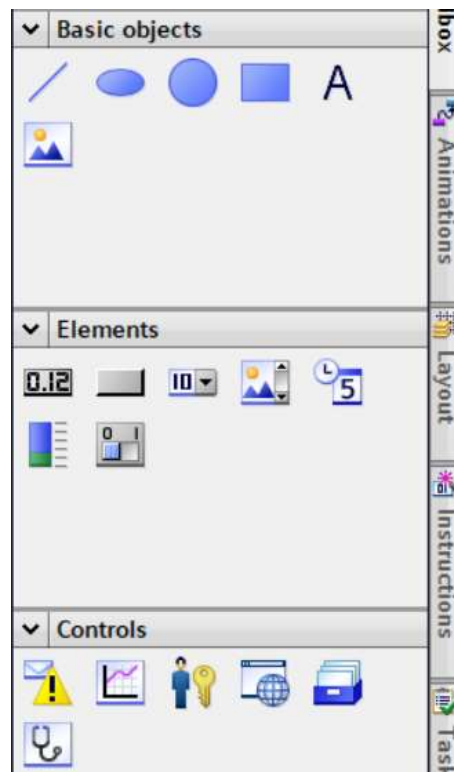
Lista de pantallas



Para el diseño de las pantallas se utilizaron formas, botones, barras, imágenes, mostradores de datos, entrada de datos, textos para que el operario pueda saber que va a ajustar, Trend View y alarmas como se observa en la figura 18.

Figura 18

Objetos para el desarrollo de las pantallas



Nota. Objetos necesarios para la visualización de los procesos en el HMI.

Una vez que se realizó la selección de las variables y se tiene los objetos, se procedió a realizar cada una de las pantallas. Primero, se tiene la pantalla de presentación, en donde consta el tema de tesis, el autor y el botón para ingresar a la segunda pantalla como se muestra en la figura 19.

Figura 19

Pantalla principal de presentación



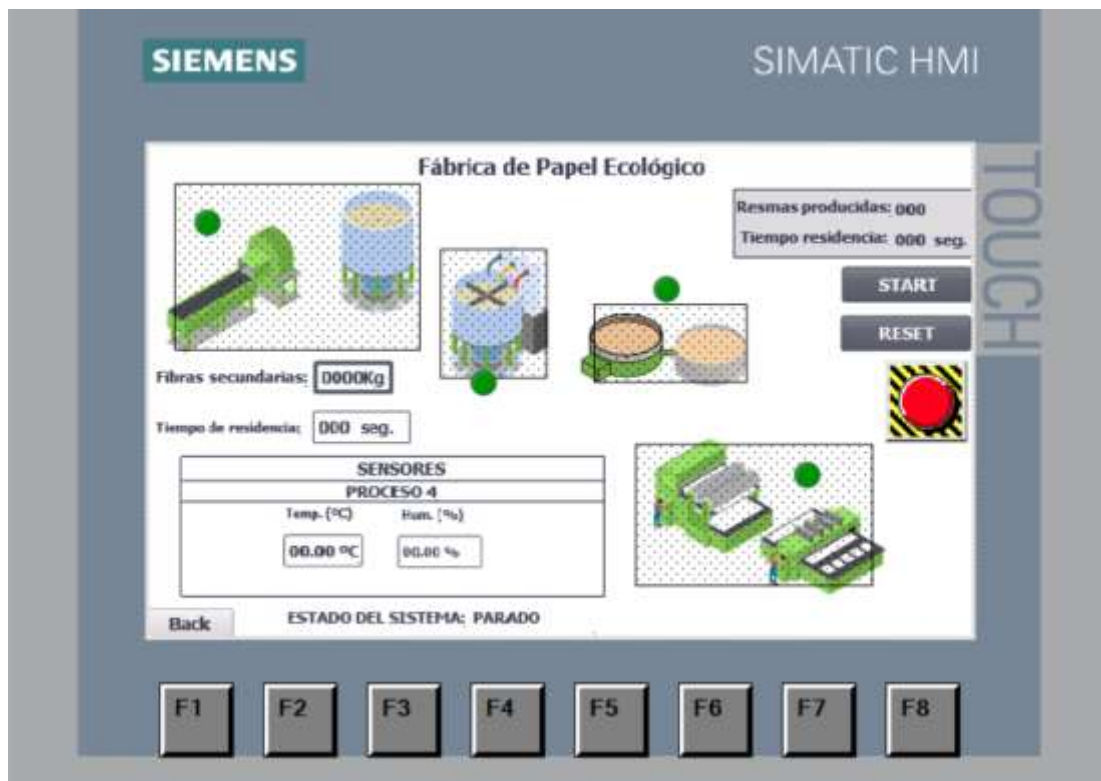
Nota. Se tiene el botón principal para pasar al proceso general.

En la pantalla 2, se diseñó el proceso en general con cada una de las cuatro etapas, estas presentan un indicador para mostrar que se está en el proceso. Además, se colocó los botones de inicio y reinicio, así como el paro de emergencia. Adicional se implementó un indicador para saber que se llegó al final del proceso.

Asimismo, se colocó el ingreso de las fibras y el tiempo de residencia, así como las remas producidas al terminar todas las etapas como se observa en la figura 20.

Figura 20

Desarrollo de la pantalla secundaria con el proceso resumido

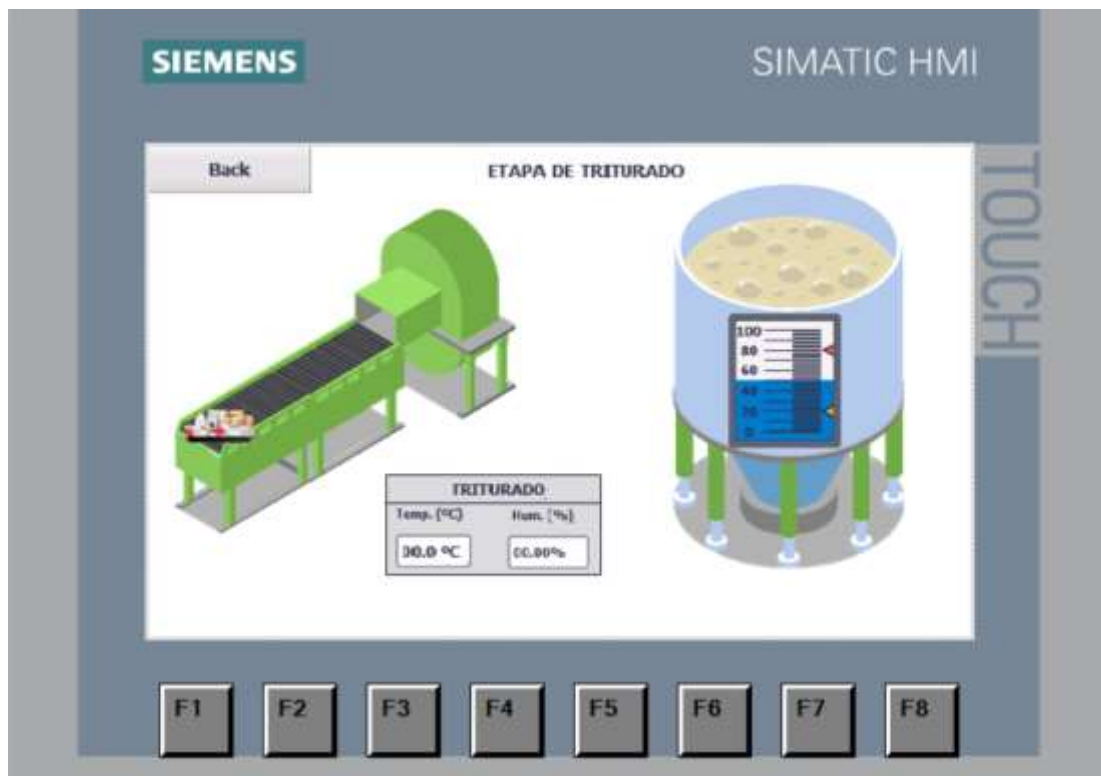


Nota. Se presenta un resumen del proceso de fabricación de papel ecológico.

En las pantallas de los subprocessos se comenzó con el triturado, en este se tiene una banda transportadora que es la encargada de llevar los residuos hasta llegar al tanque en donde son desintegrados a cierta temperatura. En el tanque se presenta el nivel al que llega para triturar el papel y que se puede continuar a la siguiente etapa como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Etapa de triturado

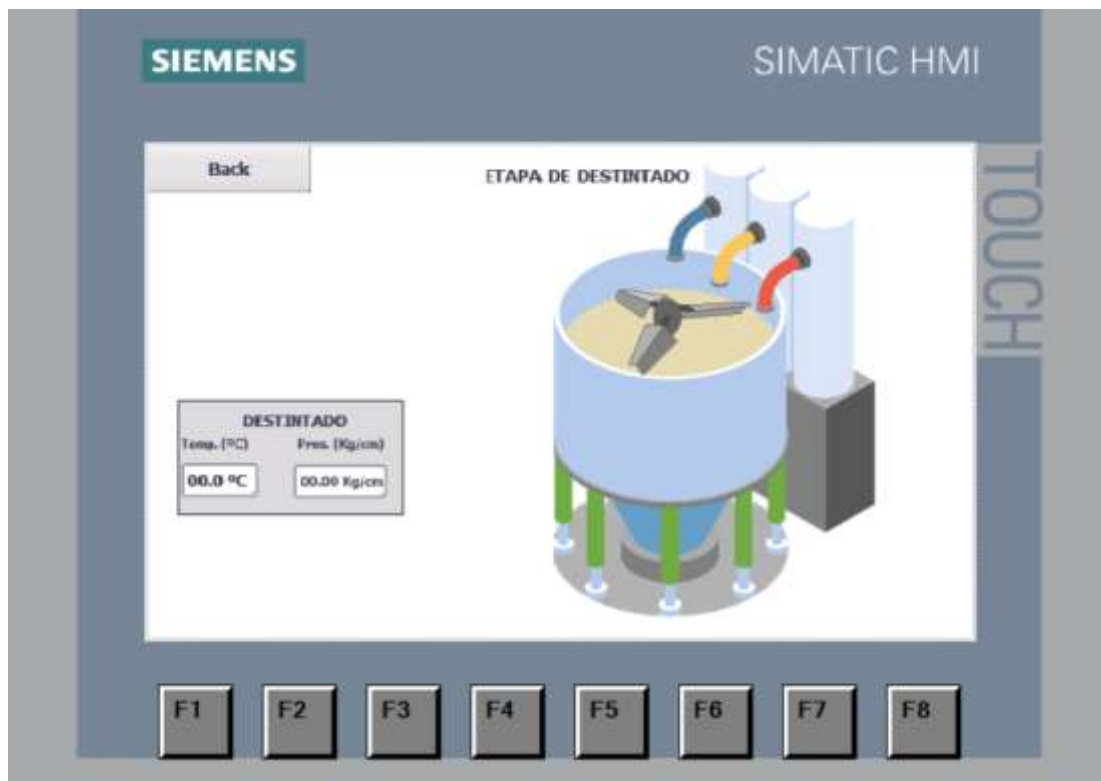


Nota. Recepción de materia prima.

Luego, se pasó a la etapa de destintado en donde se diseñó un indicador virtual y físico para saber que está en la etapa. En esta parte se controla la tempera y la presión que se presenta como se muestra en la figura 22.

Figura 22

Etapa de destintado

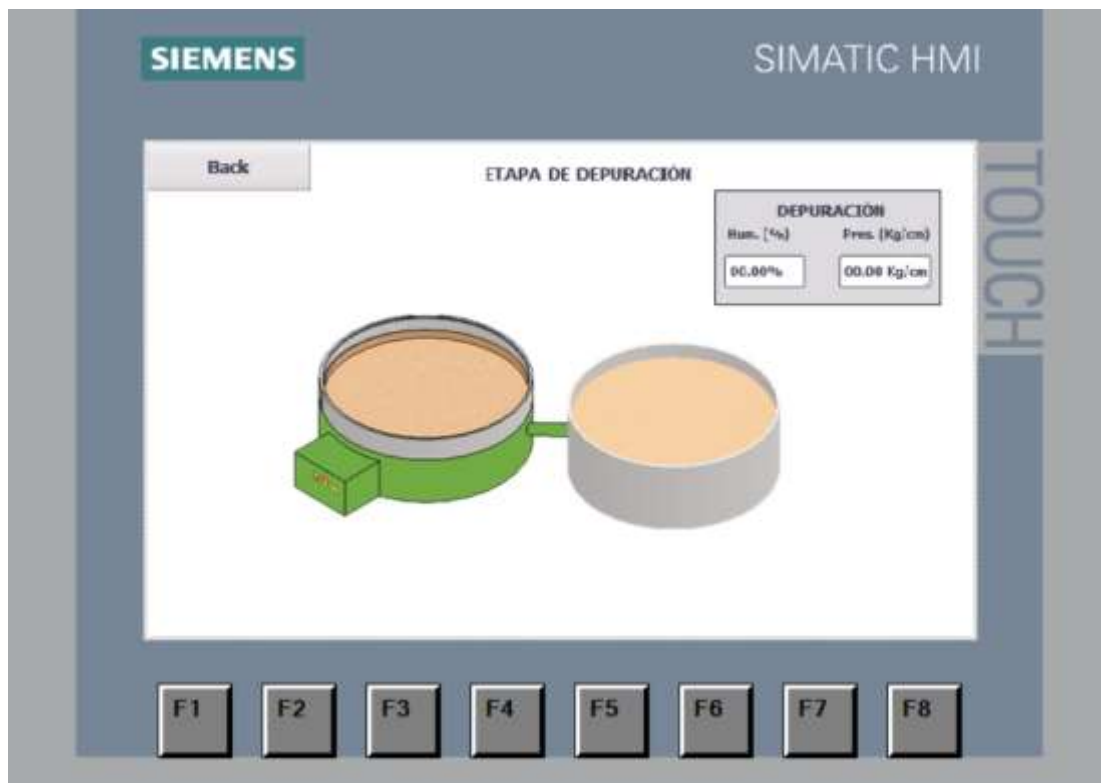


Nota. Temperatura y presión del tanque para quitar el color al papel.

En la etapa de depuración se diseñó don tanques que fueron los encargados de pasar el papel aun con residuos a otro para limpiarlo. Además, aquí se controló la humedad y la presión para que no se desintegre el papel ya casi listo como se muestra en la figura 23.

Figura 23

Etapa de depuración

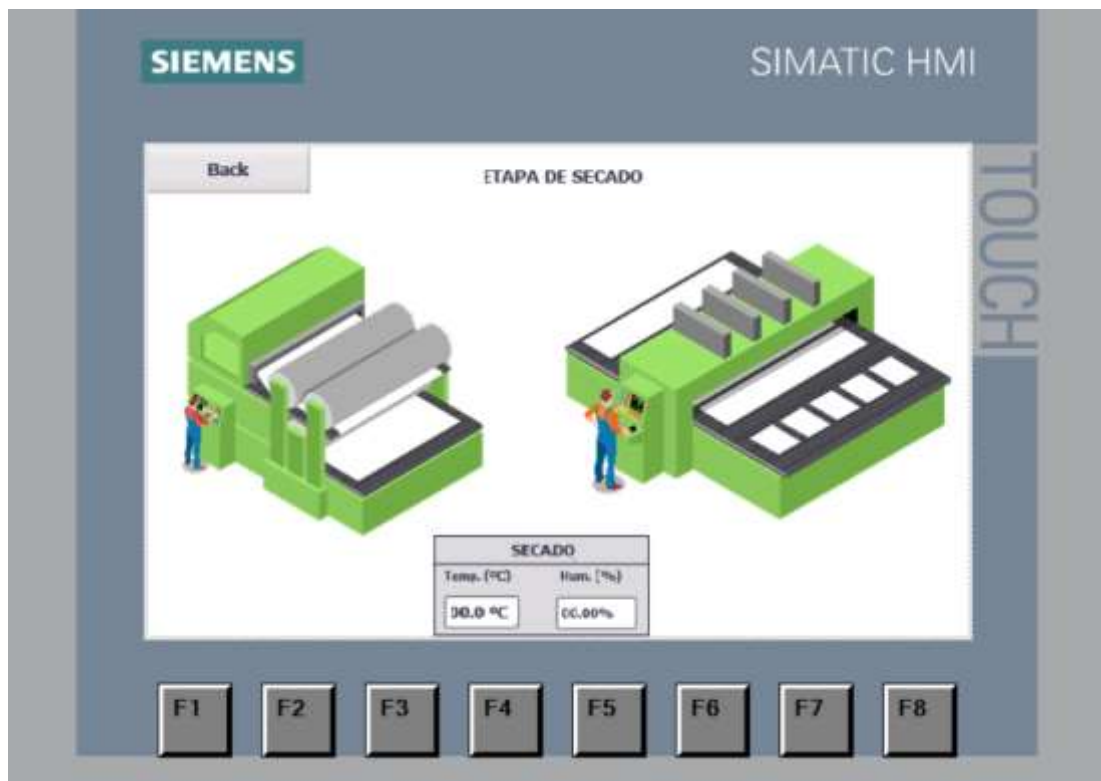


Nota. Se tiene botones para el menú, etapa 2 o pasar a la etapa 4.

Por último, en la etapa de secado se tiene dos máquinas que representan el papel que primero se seca al ser pasado por unos rodillos y luego se aplana con un tipo plancha para obtener la producción final como se muestra en la figura 24.

Figura 24

Etapa de secado y PID



Nota. Recepción de las resmas.

5. RESULTADOS

5.1. Conexión del PLC y el HMI físicos

Para la conexión del PLC y el HMI se tomó en cuenta que debían contener las mismas especificaciones que se colocaron en el TIA Portal como se muestra en la figura 25.

Figura 25

Conexiones del PLC y el HMI

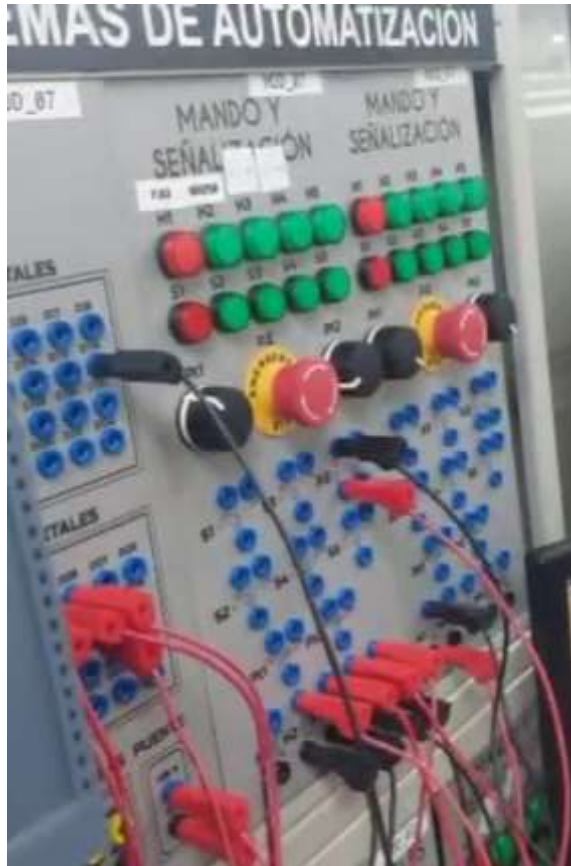


Nota. Conexión física de los indicadores, PLC y pantalla HMI.

Luego se realizó las conexiones de cada una de las entradas tanto digitales como analógicas. Estas deben ser las mismas con las que se programaron en el TIA Portal.

Figura 26

Conexión de entradas y salidas del sistema



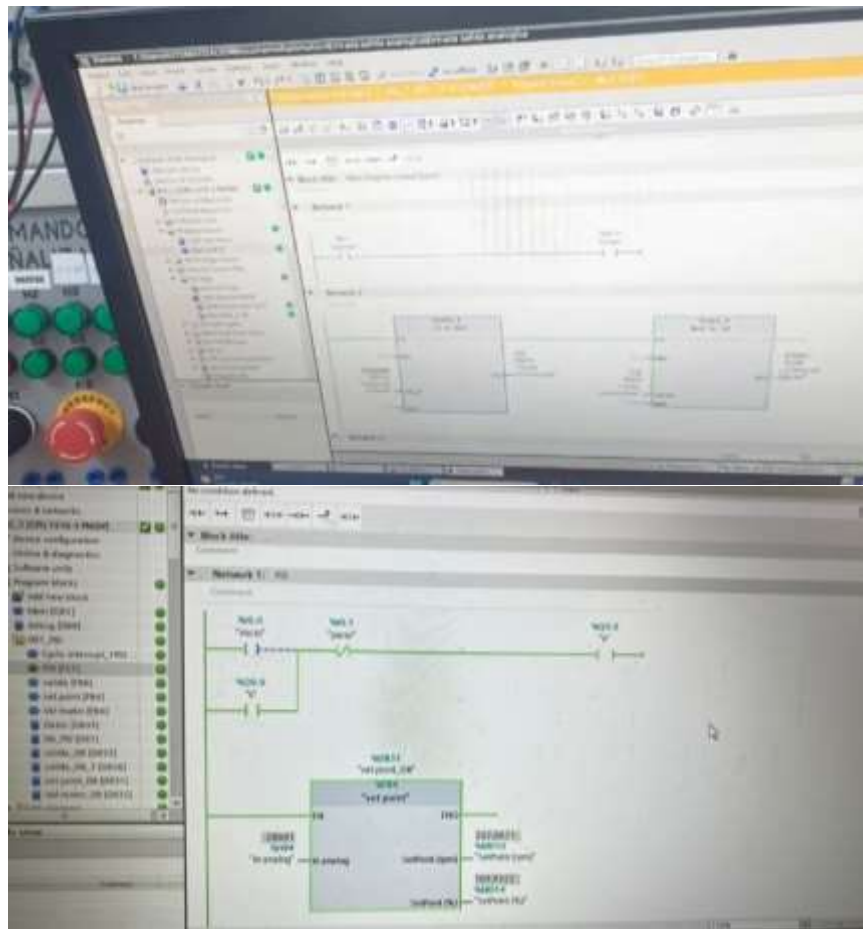
Nota. Deben ser las mismas variables del programa

5.1.1. Funcionamiento del PLC

Una vez que se tuvo todo listo, se procedió a subir el programa y a cargarlo para verificar que no existieran errores y esté funcionando como se muestra en la figura 27.

Figura 27

Programa cargado en PLC

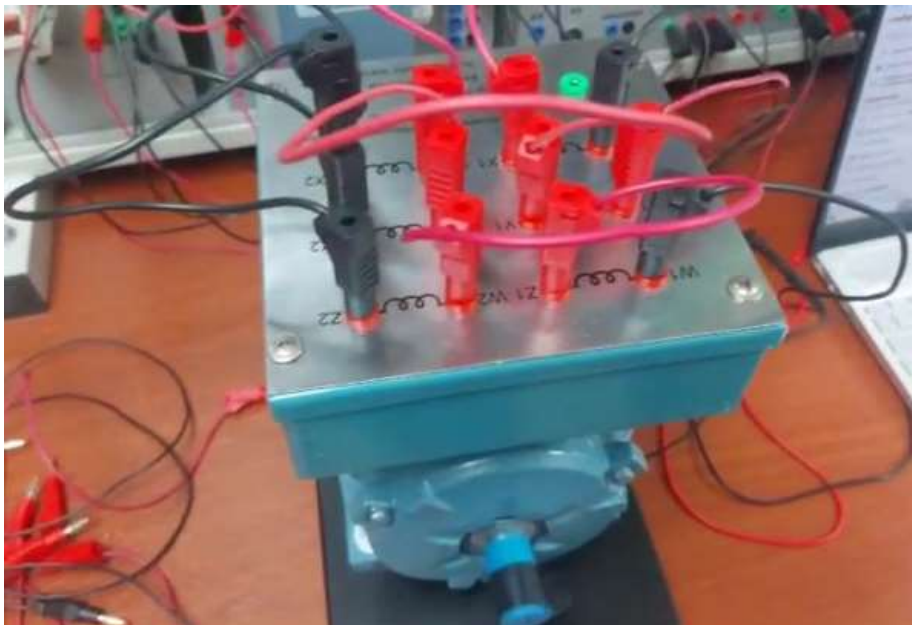
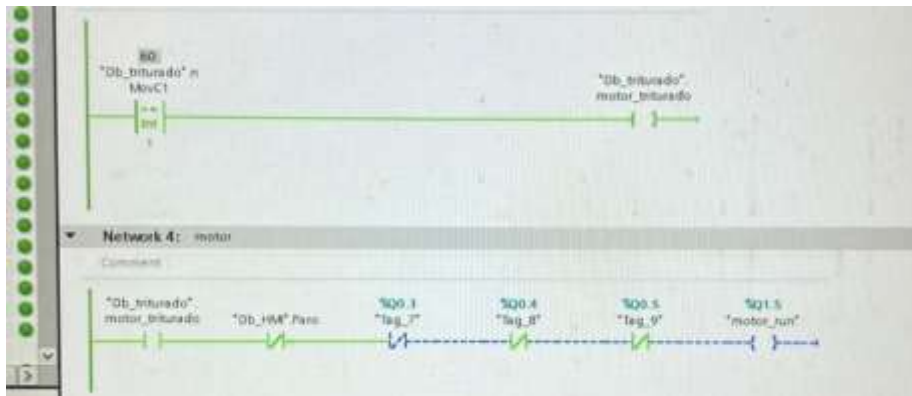


Nota. Primero se compila en el software para evitar daños al PLC si existe error.

Para la parte del encendido del motor en la etapa del triturado se observa que, al accionarse la banda, el motor recibe la señal y únicamente se acciona ahí. Además, al cambiar de etapa se apaga, como se observa en la figura 28.

Figura 28

Programa cargado en PLC



Nota. El motor solo funciona en el triturado.

5.1.1. Funcionamiento del HMI

Se carga el programa al HMI y se procede a observar su funcionamiento, como primer punto en la vista general del sistema, que para el caso se encuentra un resumen de los procesos, así como los botones para iniciar el proceso.

Figura 29

HMI pantalla principal

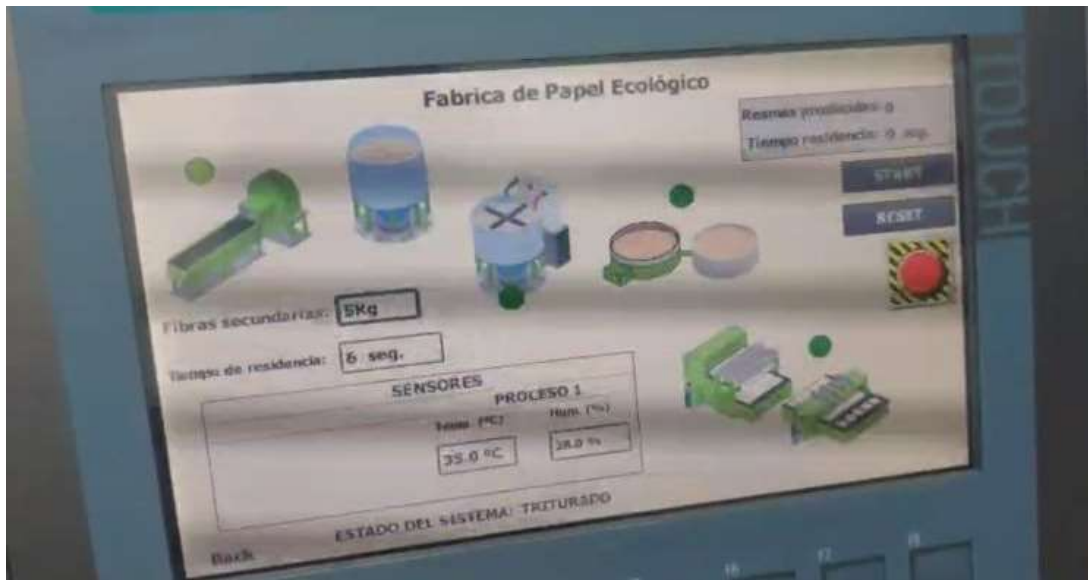


Nota. Se tiene un resumen del proceso completo

Para iniciar el proceso, se presiona el botón start mismo que emite un indicador en el cual se observa que inicio el primer proceso como se observa en la figura 30. Además, se observa en la parte inferior en donde se tiene el estado del sistema, es decir indica en etapa que se encuentra.

Figura 30

HMI pantalla principal



Nota. El indicador y el estado del sistema se muestran de acuerdo a la etapa en la que se encuentre.

Luego, se ingresa al primero subproceso que es el triturado, así se observa como a medida que los desechos van ingresando van siendo triturado y este a su vez va aumentando su temperatura hasta llegar a la ideal y volver a bajar hasta el ingreso de nuevo material.

Figura 31

Etapa de triturado HMI



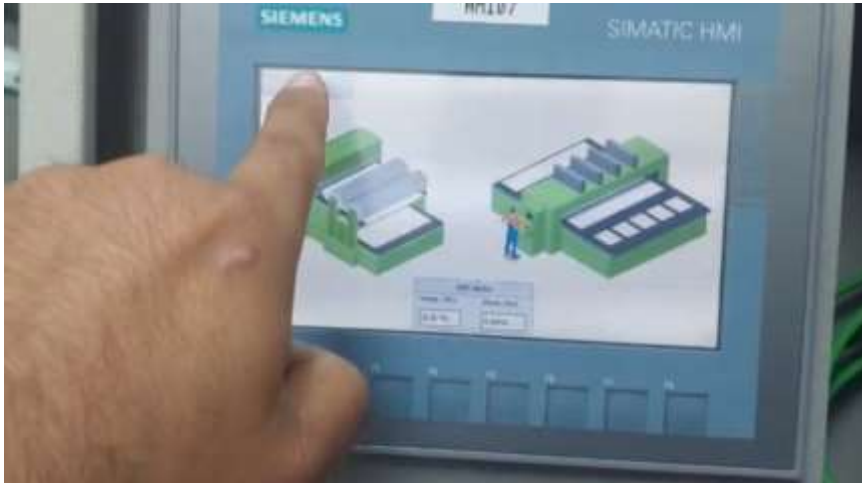
Nota. A medida que ingresa el material la temperatura sube.

Una vez que se cumplió ese proceso, se tienen los demás. Estos van pasando a medida que se va cumpliendo uno a uno hasta llegar al de la etapa de secado que es el final como se muestra en la figura 32.

Figura 32

Subprocesos de la fabricación de papel ecológico





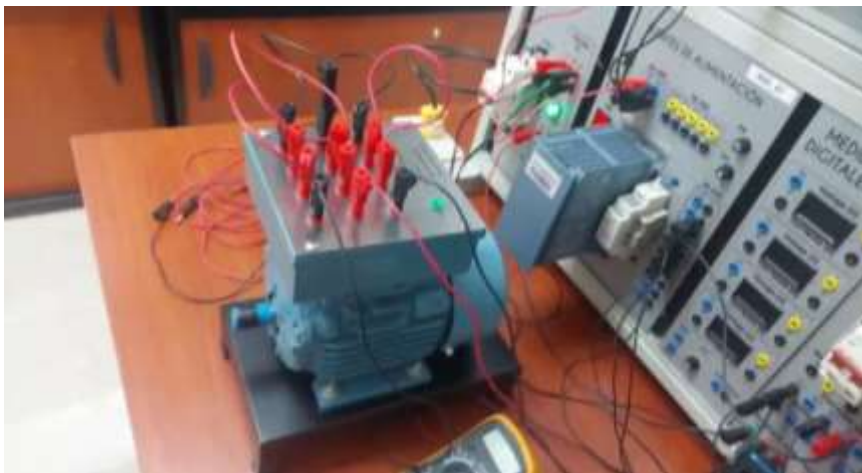
Nota. En las figuras se tiene los procesos uno a uno.

5.1.1. Movimiento del motor

Se utiliza un motor trifásico con un variador, el mismo que está conectado al PLC, este se acciona cuando se encuentra en la etapa del triturado, es decir que al pasar la materia prima por la banda existe un tanque en donde son descompuestos a través del movimiento.

Figura 33

Movimiento del motor trifásico real



Nota. Se utiliza un variador que mueva el motor.

Cuando el sistema se inicia este permanece parado, pero al momento de presionar start como se inicia la etapa de triturado y al mismo tiempo la banda el motor comienza a girar simulando el movimiento del tanque que desintegra la materia prima.

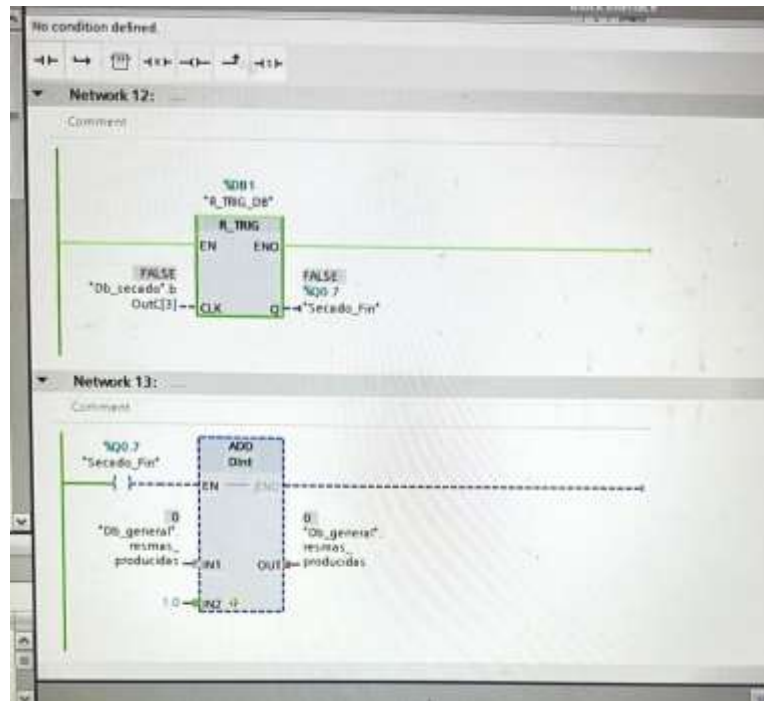
5.1.2. Resmas producidas

Al terminar el proceso de secado, se genera las resmas producidas. Es decir, cuando se termina uno completo, sale una resma y este se repite hasta obtener las 16 resmas que genera la fábrica como se observa en la figura 34. Estas resmas son acumulativas, es decir que tienen que estar todas completas para que el sistema se apague y se puede recoger.

Para volver a iniciar el sistema, es necesario volver a ingresar la cantidad de materia prima que es 40 kg que soporta la máquina y el tiempo de residencia que es lo que demora en llegar a la primera etapa.

Figura 34

Resmas producidas



Nota. Las resmas totales que genera el sistema son de 16.

6. CRONOGRAMA

El presente cronograma detalla las actividades desarrolladas durante los cinco meses de duración del proyecto, abarcando desde la investigación preliminar hasta la Redacción, revisión y corrección del documento final de titulación.

Tabla 1

Cronograma del proyecto

Actividades	Meses	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				
	Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Elección del tema, definición de objetivos y planteamiento del problema.		X	X																			
Estudio de fundamentos teóricos y metodológicos.				X	X																	
Desarrollo de la programación en el PLC (S7-1500) en el TIA Portal.						X	X	X	X	X	X											
Diseño de la interfaz HMI para la visualización de cada etapa.												X	X	X	X							
Ensamblaje físico del prototipo e integración de hardware.																X	X	X				
Simulación, sintonización PID y pruebas finales del sistema automatizado.																				X	X	
Redacción, revisión y corrección del documento final de titulación.																					X	X

Nota. Para el desarrollo del cronograma se considera un tiempo de 5 meses.

7. PRESUPUESTO

El presupuesto estimado refleja los costos directos e indirectos asociados al desarrollo del prototipo. Cabe destacar que los equipos industriales de mayor valor pertenecen al Laboratorio de Automatización Industrial II de la Universidad Politécnica Salesiana, por lo que su costo no se asume.

Tabla 2

Presupuesto del proyecto

Ítem / Descripción de la Actividad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Insumos eléctricos (Cables de red, cables de control, terminales, conectores)	1	\$60,00	\$ 60,00
Movilización y transporte (Visitas al laboratorio durante 5 meses)	1	\$55,00	\$ 55,00
Investigación, diseño lógico y levantamiento de información	25 horas	\$5,75 / hr	\$ 143,75
Programación y estructuración de bloques en PLC (TIA Portal)	45 horas	\$5,75 / hr	\$ 258,75
Diseño de interfaces gráficas y variables en HMI	20 horas	\$5,75 / hr	\$ 115,00
Conexión físico, ensamblaje de módulos y pruebas	20 horas	\$5,75 / hr	\$ 115,00
Simulación, sintonización del control PID y depuración de errores	30 horas	\$5,75 / hr	\$ 172,50
TOTAL PRESUPUESTO ESTIMADO			\$ 919,50

Nota. Para la estructuración del presupuesto se considera que los módulos y accesorios son de parte de la universidad y solo se considera la mano de obra.

8. CONCLUSIONES

La validación del proceso en un entorno de laboratorio permitió comprobar la correcta interacción entre las etapas automatizadas, evidenciando que el sistema es funcional, escalable y aplicable como base para una futura implementación en entornos productivos reales.

La programación del PLC permitió automatizar de manera secuencial las etapas de trituración, mezclado, prensado y secado, garantizando un flujo ordenado y controlado del proceso. El uso de bloques lógicos, contadores y temporizadores facilitó la transición entre etapas, asegurando que cada proceso se ejecute bajo las condiciones previamente definidas, lo que demostró la efectividad del PLC como herramienta de control industrial.

La implementación del HMI permitió visualizar el estado del proceso en tiempo real, proporcionando al operador información clara sobre cada etapa de producción. Además, se logró integrar el control de arranque y paro, así como el ajuste de parámetros operativos, mejorando la interacción hombre-máquina y aumentando la seguridad y facilidad de operación del sistema.

El desarrollo del prototipo académico permitió realizar pruebas controladas que validaron el correcto funcionamiento del sistema automatizado. Este prototipo constituyó una herramienta didáctica que facilitó la comprensión de procesos industriales automatizados, integrando control lógico, supervisión y accionamiento de motores mediante variadores de frecuencia.

La implementación del sistema en el módulo del Laboratorio de Automatización Industrial II confirmó la viabilidad del proyecto en un entorno educativo real. La integración del PLC, HMI, variador de frecuencia y motor trifásico permitió comprobar la correcta comunicación entre los dispositivos y validar la robustez de la programación desarrollada.

9. RECOMENDACIONES

Es pertinente complementar el prototipo con sensores reales de temperatura y humedad en la etapa de secado, lo que permitiría implementar un control PID más representativo del proceso físico y mejorar la precisión del sistema en futuras aplicaciones industriales.

Se sugiere optimizar la programación del PLC mediante el uso de bloques de función (FB) con memoria, lo que facilitaría la reutilización del código, el mantenimiento del sistema y la ampliación del proceso hacia nuevas etapas o funciones adicionales.

De igual manera resulta conveniente ampliar la interfaz HMI incorporando alarmas visuales, históricos de variables y gráficas de tendencia, lo cual permitiría un mejor seguimiento del proceso y una mayor capacidad de análisis operativo y educativo.

Se recomienda realizar pruebas adicionales con diferentes parámetros, como el tiempo de operación y la velocidad del motor, para analizar el comportamiento del sistema y optimizar el proceso de producción de papel ecológico mediante el control PID. Además, se recomienda utilizar el prototipo como herramienta de aprendizaje permanente en el laboratorio, permitiendo a los estudiantes realizar modificaciones y simulaciones, fortaleciendo así sus habilidades en automatización industrial, sistemas de control y programación de PLC.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A. I. Alsarawi, A. A.-M.-F. (2019). *An IoT-based Health Monitoring System Using Raspberry Pi and Wireless Body Area Network*. International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-5.
- Abushammala, H., Aljazzar, S., & Zubaidi, A. (2023). Sustainable paper recycling and circular economy. *412*, 137024.
- Acosta, A. (2024). *Papel reciclado: ¿cómo se produce y cuál es su proceso de reciclaje?* BBVA.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD. (2015). *Human Machine Interfaces for*.
- Armendariz, A., & Poznyak, Y. (2001). Sistema de Información Científica. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 13-32.
- Asanza, A., & Segovia, F. (2021). *Papel reciclado diseño y medidas*. Machala: UTM.
- Bednarek, M. (2012). *Serial Peripheral Interface (SPI) - Communication Interface of Microcontrollers*. Advanced Microcontroller Systems, InTech.
- Cruz, J. (2023). *Implementación de un sistema Scada en el ámbito de la Industria 4.0 IoT*. Ambato: UTA.
- Diez, N. (2024). *Reciclaje de papel con estrategias biotecnológicas: ¿Una solución al cambio climático?*. Quito: Espol.
- Elvins, A. (2009). *Un análisis de la detección de Patrones de Color RGB (CRGPD)*. Estudio de Ingeniería de la Universidad de Florida, Gainesville.
- Ferrara, C., & Defeo, G. (2021). Comparative environmental analysis of paper recycling. *4(164)*, 105-115.
- Furber, S. (2010). *Embedded Systems: Architecture, Programming, and Design*. CRC Press.
- García Chang, M. E. (2019). *Diseño e implementación de una herramienta de detección facial*.

- H. Rahman, N. I. (2019). *Development of a smart irrigation system using Raspberry Pi*. 2019 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEEICT.2019.8765224.
- Jain, K. (2011). *Embedded Systems: A Contemporary Design Tool*. International Journal of Computer Applications, vol. 38, no. 9.
- Jirarotepinyo, S. (2024). Advances in eco-friendly paper production. 2(34), 155-168.
- Kumar, R., Singh, P., & Patel, A. (2022). Data analytics in smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 28(1), 100-112.
- Liu, Y. (2017). *An Overview of Embedded Systems*. Journal of Computer Science, vol. 3, no. 5.
- Naranjo, M., & Romero, C. (2021). *DESARROLLO DE SOFTWARE HMI SCADA E IMPLEMENTACIÓN SOBRE UN MÓDULO DIDÁCTICO AUTÓNOMO PARA VENTAS DE LA EMPRESA ECUAINSETEC CÍA. LTDA*. Quito: UPS.
- Negnevitsky, M. (2016). *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Pearson Education.
- Ortiz, G. B. (2019). *APLICACION DE DEEP LEARNING USANDO TENSORFLOW PARA ANALISIS DE LA CALIDAD DE SOFTWARE DESARROLLADO EN IBM RPG*.
- Pérez, A., & Freire, R. (2021). *Variable frequency drives in industrial applications*. International Journal of Electrical Engineering.
- Qazi., M. A. (2016). *Raspberry Pi: A Comprehensive Study*. Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence, 8(2), pp. 93-101.
- Reyes, A., Pellegrini, N., & Gil, R. (2024). *El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta*. Venezuela: UPEL.
- Sánchez, Toapanta, T., & Mellichamp, D. (2021). *Process dynamics and control*. Wiley.

Seborg, D., Edgar, T., Mellichamp, D., & Doyle, F. (2021). *Process dynamics and control*. Wiley.

Serrano Arenas, J. S. (2020). *Prototipo de aplicación móvil para la identificación de mazorcas de cacao enfermas haciendo uso de visión por computadora y aprendizaje de máquina*.

Siemens. (2021). *SIMATIC S7-1500 automation system*. Siemens AG.

Sparkfun. (2018). *serial-peripheral-interface-spi*. Obtenido de Sparkfun: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>

Zhang, Y. L. (2018). *Color-pattern recognition based on fuzzy neural network and its applications to image segmentation*. IEEE Access, 6, 8169-8179.