

**Migración tecnológica y automatización para el sistema de cambio de Reels (Turnup) en el
molino 4 de Smurfit WestRock**

Gustavo Adolfo Villota Londoño

Asesor

Bladimir Salas Quinchucua

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias básicas, Tecnología e ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Resumen

El presente trabajo describe el proceso de migración tecnológica y automatización del sistema Turnup en el Molino 4 de Smurfit WestRock, ubicado en el barrio Puerto Isaac del municipio de Yumbo en el departamento del valle del cauca. La necesidad de intervención surgió tras una parada anual de planta en 2023, cuando el controlador Micro820 y la HMI C300 de Allen-Bradley dejaron de funcionar, perdiéndose la programación original y obligando a operar el equipo en modo manual. Esta condición expuso a los operarios a riesgos adicionales y redujo significativamente la eficiencia en el cambio de Reels, un proceso crítico en la continuidad de la producción de papel. La estrategia de solución consistió en integrar el sistema Turnup al controlador principal de la máquina, un ControlLogix 1756-L72, utilizando el Micro820 como interfaz de entradas y salidas remotas (I/O remoto). Se realizó la actualización de firmware, la reconfiguración de su módulo de entradas rápidas para la lectura de un encoder, y el intercambio de datos mediante instrucciones de mensajería (MSG) sobre Ethernet/IP.

Los resultados obtenidos demuestran una mejora significativa en la operación: reducción del 90% en el tiempo requerido por los operarios para ejecutar el cambio de Reel, disminución del 90% en la exposición a zonas de riesgo, y tan solo un 10% de paradas generales de máquina atribuibles al sistema Turnup. Estos logros evidencian la pertinencia de la migración propuesta, consolidando una solución confiable y segura, alineada con los objetivos de productividad y seguridad industrial.

Palabras clave: Automatización, PLC, migración tecnológica, HMI, Ethernet/IP

Abstract

This research presents the technological migration and automation of the Turnup system in Smurfit WestRock's Mill 4, specifically in the Pope Reel section. The intervention became necessary after the 2023 annual plant shutdown, when the Micro820 controller and the Allen-Bradley C300 HMI failed, resulting in the complete loss of the original program. Consequently, the equipment had to be operated manually, exposing operators to greater risks and reducing the efficiency of the Reel change process, which is critical to continuous paper production. The proposed solution consisted of integrating the Turnup system into the machine's main controller, a ControlLogix 1756-L72, while reusing the Micro820 as a remote I/O interfaz. The implementation included firmware updating, configuration of its high-speed input module for encoder reading, and data exchange through Message (MSG) instructions over Ethernet/IP.

The results confirm a significant improvement: a 90% reduction in operator intervention time during Reel change, a 90% decrease in operator exposure to hazardous areas, and only 10% of overall machine downtime attributable to Turnup failures. These outcomes demonstrate the effectiveness of the migration strategy, delivering a reliable, safe, and efficient solution aligned with industrial productivity and safety requirements.

Keywords: Automation, PLC, technological migration, HMI, Ethernet/IP

Tabla de contenido

Introducción	8
Descripción del Problema	9
Planteamiento del Problema	9
Justificación	11
Objetivos	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos.....	13
Marco de Referencia	15
Estado del Arte.....	15
Marco Contextual.....	18
Marco teórico	22
Fundamento de Automatización	22
Sistemas Neumáticos y Electroneumáticos	23
Actuadores Neumáticos	23
Válvulas Neumáticas	25
Encoders.....	26
PLC	30
Comunicación maestro-esclavo con función MSG.....	34
Declaración y configuración de la función MSG	34
Tipo de mensaje	34
Path.	35
Tag de destino (Remote tag).....	35

Tamaño de datos.	35
Timeouts y retry.	35
Marco conceptual.....	36
Automatización Industrial.....	36
PLC (Controlador Lógico Programable).	36
HMI (Interfaz Hombre-Máquina).	36
Red de Control Industrial.....	36
I/O Remoto.....	36
Reel y Turnup.	36
Descripción técnica del funcionamiento del sistema Turnup	37
Marco normativo.....	39
Normas legales en Colombia	39
Normas internacionales de seguridad en máquinas	39
Metodología	41
Diagnóstico y recolección de información	41
Diseño y desarrollo de la solución	43
Validación experimental	47
Diseño de la nueva interfaz HMI	49
Resultados	51
Conclusiones	55
Referencias Bibliográficas	57

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 <i>Cilindro Neumático de Simple Efecto</i>	23
Ilustración 2 Cilindro Neumático de Doble Efecto	24
Ilustración 3 Motor de Accionamiento Neumático	24
Ilustración 4 Válvula Neumática de Accionamiento Manual	25
Ilustración 5 Electroválvula Neumática	26
Ilustración 6 Encoder Incremental	27
Ilustración 7 <i>Encoder Absoluto</i>	27
Ilustración 8 Encoder Óptico.....	28
Ilustración 9 Encoder Magnético	29
Ilustración 10 Encoder de Contacto	29
Ilustración 11 Encoder Lineal	30
Ilustración 12 PLC Micro820.....	32
Ilustración 13 PLC ControlLogix 1756-L72.....	34
Ilustración 14 <i>Ventana de Configuración de la Función MSG</i>	35
Ilustración 15 Sistema Turnup con Deterioro en HMI.....	42
Ilustración 16 <i>Upload al Micro820 en Diagnóstico de Falla</i>	43
Ilustración 17 Nueva Configuración de Red para el Micro820.....	44
Ilustración 18 Declaración de Variables a Nivel de Controlador en el Micro820	45
Ilustración 19 Rutina en PLC Máquina para Gestiona Mensajería hacia el Micro820...	46
Ilustración 20 Mapeo I/O desde el Micro820 hacia PLC Maquina.....	47
Ilustración 21 Programación Modulo HSC para Lectura de Encoder en Micro820	48
Ilustración 22 Diseño de Pantalla HMI de Reemplazo	50

Ilustración 23 Comparación Desempeño Distema Turnup	51
Ilustración 24 Comparación Efectividad Sistema Turnup	52

Introducción

La automatización industrial constituye uno de los pilares fundamentales para garantizar la continuidad, seguridad y eficiencia en los procesos productivos. En la industria papelera, donde la producción debe ser continua y con mínimas interrupciones, los sistemas de control y monitoreo juegan un papel decisivo para mantener la competitividad. La empresa Smurfit Westrock, conocida en Colombia como Cartón de Colombia, cuenta con cuatro molinos papeleros en su planta ubicada en Yumbo, Valle del Cauca. En particular, el Molino 4 posee la versatilidad de fabricar papel tipo liner, corrugado y papel de sacos para bolsas, productos estratégicos para la cadena de empaques.

Dentro de este molino, el área del Pope Reel cumple la función crítica de bobinar el papel producido en grandes carretes o reels. Para garantizar la continuidad de la operación, se utiliza un sistema denominado Turnup, encargado de facilitar el cambio de reels de manera automatizada. Sin embargo, el deterioro de la pantalla HMI por exposición al vapor, sumado a la pérdida de la programación del PLC Micro820 que controlaba el sistema, ocasionó que los cambios de reel deban realizarse manualmente. Esta situación expone a los operarios a riesgos mecánicos y térmicos, además de generar pérdidas de eficiencia y tiempos improductivos.

El presente proyecto se orienta a la migración y reconstrucción del sistema de control del Turnup, integrando el PLC Micro820 como un módulo de I/O remoto conectado a la red de control del Molino 4 y delegando la lógica principal al PLC ControlLogix 1756-L72 de la máquina. Con ello se busca restituir la automatización del proceso, recuperar la interfaz HMI y mejorar la seguridad operativa y la eficiencia productiva.

Descripción del Problema

Planteamiento del Problema

El problema identificado se centra en la pérdida de la automatización del sistema Turnup en el área del Pope Reel del Molino 4 de SmurfitWestrock. Este sistema, que anteriormente permitía realizar cambios de reel de forma semiautónoma mediante la inserción controlada de una cinta de papel, quedó inoperante tras la avería de la pantalla HMI y la pérdida de la programación en el controlador Micro820. En consecuencia, los operadores se ven obligados a recurrir a procedimientos manuales para completar el cambio de reels, exponiéndose a condiciones de riesgo y aumentando la probabilidad de errores en el proceso.

El problema se agrava porque el cambio de reels es una operación crítica para mantener la continuidad en la producción. Cada interrupción no planificada representa pérdidas de tiempo y productividad que afectan directamente los indicadores de eficiencia de la planta. Aunque no se dispone de cifras internas exactas, estudios en la industria papelera estiman que una parada de máquina en esta fase puede generar pérdidas superiores a USD 5.000 por hora (referencia general), lo que dimensiona el impacto económico de la situación.

Las causas principales del problema incluyen:

Deterioro físico de la HMI original por exposición continua al vapor.

Pérdida de la lógica de programación del PLC Micro820 tras un fallo eléctrico.

Falta de respaldo de software y documentación técnica, lo que dificulta la recuperación inmediata del sistema.

De no resolverse, esta situación prolongará la dependencia de métodos manuales poco confiables, con efectos adversos sobre la productividad, seguridad de los operarios y sostenibilidad del proceso. Ante este panorama, se plantea como solución la integración del

Micro820 como I/O remoto a través de la red de control del Molino 4, la reconstrucción de la lógica en el PLC ControlLogix y el desarrollo de nuevas interfaces gráficas en la HMI, de modo que el sistema Turnup recupere su operatividad y se logre una mayor eficiencia en la operación del Pope Reel.

Justificación

El presente proyecto aplicado en el área de la ingeniería electrónica busca dar solución a una problemática crítica que afecta directamente la eficiencia y la seguridad operativa en la empresa Smurfit West Rock, en el área del Molino 4, donde se lleva a cabo el proceso de enrollado de papel en el Pope Reel. La pérdida de la funcionalidad de la interfaz de control del sistema Turnup, junto con la pérdida de programación del PLC, ha generado ineficiencias operativas, aumento en los riesgos de accidentes laborales y una disminución considerable en la productividad. Estos factores justifican plenamente la necesidad de implementar una solución que permita restaurar y optimizar el proceso de cambio de Reel, mediante la migración de la automatización a la red de control principal del molino.

El Pope Reel es un área clave para garantizar la continuidad de la producción de papel. Un fallo o interrupción en esta etapa impacta directamente en la cadena de suministro, generando pérdidas económicas significativas y afectando la competitividad de la empresa en el mercado. Al integrar el PLC del Turnup como un I/O remoto controlado por el PLC principal del molino, al asegurar la operación continua, confiable y segura del proceso, se elimina la improvisación actual y se reduce el riesgo de errores humanos.

Los principales beneficiarios de esta solución son los operadores de la planta, quienes reciben un sistema automatizado, intuitivo y seguro para realizar el cambio de Reels. Además, la empresa se beneficia con el aumento de la eficiencia operativa, reducción de tiempos muertos, disminución de accidentes laborales y mejoras en la calidad del producto final. De forma indirecta, los clientes también se verán beneficiados, al presentar una producción estable y un cumplimiento eficiente de los tiempos de entrega.

Desde la perspectiva académica y disciplinaria, este proyecto de migración y automatización permite aplicar conocimientos avanzados de ingeniería electrónica en la solución de problemas reales de la industria. Se utilizan conceptos fundamentales como la integración de sistemas de control industrial, redes de comunicación industriales, programación de PLCs y diseño de interfaces hombre-máquina (HMI).

Socialmente, el proyecto contribuye a la mejora de las condiciones laborales de los operadores, al minimizar los riesgos asociados a maniobras manuales inseguras.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar e implementar una solución de conectividad y automatización del sistema Turnup en el Molino 4 de la división de molinos de Smurfit West Rock, mediante la migración del PLC a la red de control principal y la reprogramación de la lógica de control y de la interfaz HMI, para optimizar el proceso de cambio de Reels, mejorar la eficiencia operativa, garantizar la seguridad de los operadores y reducir el riesgo de errores y accidentes en el área de Pope Reel.

Objetivos Específicos

Diagnosticar el estado actual del sistema Turnup y del PLC Micro820 en el área de Pope Reel, para identificar las fallas y limitaciones que afectan el proceso de cambio de Reels en el Molino 4 de Smurfit West Rock.

Diseñar una solución de conectividad que permita integrar el PLC del sistema Turnup a la red de control del Molino 4, para establecer una comunicación eficiente y segura que facilite su automatización.

Programar la lógica de control y la interfaz HMI del Pope Reel, para garantizar un funcionamiento óptimo y mejorar la interacción de los operadores con el sistema durante el cambio de Reels.

Desarrollar la nueva configuración del PLC principal para gestionar el Turnup como I/O remoto, con el fin de centralizar el control del proceso y aumentar la eficiencia operativa en el área de producción.

Implementar la solución diseñada de integración y automatización del sistema Turnup, para optimizar el cambio de Reels, reducir tiempos muertos y minimizar riesgos de accidentes laborales.

Validar el funcionamiento del sistema migrado y automatizado mediante pruebas operativas, para asegurar la correcta ejecución del proceso de cambio de Reels y la mejora en la eficiencia y seguridad de las operaciones en el Molino 4.

Marco de Referencia

Estado del Arte

En el desarrollo de soluciones de automatización industrial, especialmente aquellas orientadas a la migración y actualización de sistemas de control, resulta fundamental revisar los antecedentes tecnológicos, los recursos disponibles por los fabricantes y las experiencias previas documentadas por otros investigadores e instituciones. El presente estado del arte contextualiza el proceso de migración del sistema Turnup en el Molino 4 de Smurfit West Rock, desde un enfoque aplicado de la ingeniería electrónica, y recopila los aportes más relevantes de proyectos y estudios que abordan la modernización de sistemas de control, la integración de PLCs y HMIs, y la comunicación industrial en procesos de la industria papelera.

Diversos estudios académicos han abordado la automatización de procesos de fabricación y conversión de papel, lo cual permite establecer paralelos con el presente proyecto. En el trabajo de Carriel Eras (2024) se desarrolla un diseño y simulación del proceso de fabricación de papel mediante PLC y HMI, empleando herramientas como TIA Portal y WinCC para la validación de la lógica de control y las pantallas de operación antes de la implementación física. Este proyecto demuestra que la simulación y validación previa de la programación permite reducir errores en la puesta en marcha y facilita la capacitación del personal operativo, un aspecto directamente aplicable a la reconstrucción de la lógica perdida del controlador Micro820 y al diseño de nuevas interfaces gráficas en FactoryTalk View para el sistema Turnup.

De manera complementaria, el proyecto desarrollado en el Instituto Politécnico Nacional por Pedroza Villarruel, Velázquez Pérez y Zamora Sánchez (2012) describe la automatización de un sistema de corte y enrollado de papel utilizando PLCs y diversas tecnologías de comunicación industrial. Este estudio analiza comparativamente protocolos como Modbus, Profibus y

DeviceNet, además de evaluar criterios de selección de hardware y estrategias para la conversión de programas entre diferentes familias de PLCs. Los resultados de este trabajo son de gran valor para proyectos de migración, ya que documentan la importancia de la integración de periféricos, la gestión de alarmas y la adaptación de lazos de control de tensión, aspectos que guardan relación directa con los desafíos enfrentados en la reconstrucción y calibración del sistema Turnup.

Desde la perspectiva industrial, Emerson (s. f.) presenta un enfoque integral para la automatización de plantas de pulpa y papel mediante sistemas distribuidos de control (DeltaV), que incluyen gestión de activos, monitoreo remoto y diagnóstico avanzado. Este enfoque industrial evidencia la importancia de las arquitecturas de control con redundancia, trazabilidad de variables y registro histórico de alarmas, principios que complementan las metodologías académicas al aplicarse en entornos productivos con altas exigencias de disponibilidad y seguridad, como el del Molino 4.

En la literatura técnica más reciente, Kaur y Singh (2017) documentan la modernización de una máquina de papel mediante la incorporación de un sistema de control basado en PLC, variadores de frecuencia (VFDs) y una interfaz HMI. Los autores reportan mejoras significativas en la precisión del corte y la eficiencia energética, destacando que la automatización del control de bobinado y corte reduce los tiempos de respuesta y los errores humanos. Este caso es particularmente relevante porque aborda un proceso similar al del sistema Turnup, validando la efectividad de integrar tecnologías PLC-HMI para optimizar el cambio de reels.

Asimismo, Langmann y Stiller (2019) proponen una visión más avanzada sobre el papel de los controladores lógicos programables dentro del paradigma de la Industria 4.0, describiéndolos como servicios inteligentes capaces de intercambiar información en tiempo real

mediante protocolos Ethernet/IP y estructuras modulares definidas en la norma IEC 61131-3.

Este enfoque resulta plenamente aplicable al proyecto, en el cual el PLC Micro820 fue reconfigurado para operar como una unidad de E/S remota dentro de la red del Molino 4. El trabajo de Langmann y Stiller refuerza la pertinencia de adoptar arquitecturas orientadas a la interoperabilidad y la integración distribuida, mejorando la confiabilidad operativa del sistema.

Finalmente, Seong, Ranjan, Kye y Lee (2023) analizan el rendimiento del protocolo Ethernet/IP en la comunicación entre dispositivos industriales y PLCs, concluyendo que la mensajería mediante Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) permite una sincronización eficiente de eventos en sistemas de control cooperativo. Este estudio es altamente relevante para el proyecto, pues valida la estrategia de comunicación implementada mediante la función MSG de Rockwell entre el PLC principal ControlLogix 1756-L72 y el controlador Micro820, optimizando el intercambio de variables, reduciendo la latencia y garantizando la consistencia de la información entre ambos sistemas.

Marco Contextual

Smurfit WestRock, mejor conocida en Colombia como Cartón de Colombia, es una empresa líder en la producción de papel a partir de fibras vírgenes y recicladas, ubicado en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca. Su papel es destinado principalmente a la fabricación de cajas y bolsas de papel, siendo parte fundamental del sector industrial de empaques sostenibles. En su planta principal, cuenta con cuatro molinos papeleros, entre los cuales el Molino 4 se destaca por su versatilidad, ya que puede producir tanto papel tipo liner o corrugado, como papel de sacos, insumo clave para la elaboración de bolsas de papel de alta resistencia.

Dentro del proceso productivo del Molino 4, se encuentra el área final de la máquina conocida como Pope Reel, donde se lleva a cabo la bobinación del papel generado. En esta sección opera el sistema Turnup, fabricado por la empresa JUD, el cual automatiza el proceso de cambio de Reel (bobina), permitiendo la continuidad operativa sin detener la máquina. Sin embargo, actualmente este sistema presenta una falla crítica: debido a una afectación eléctrica, se borró la programación del PLC Micro820 de Rockwell que lo controlaba, y adicionalmente, la HMI Component C300 quedó completamente inservible debido al deterioro causado por la cercanía al vapor expulsado en la zona.

Este sistema automatizado, cuando estaba funcional, permitía que el operador insertara una cinta de papel en la máquina y, al presionar el botón de inicio, el sistema realizaba una secuencia lógica de movimientos neumáticos y motorizados para ingresar la cinta, generar bucles de frenado e inyección, y preparar el disparo de cinta al nuevo spool. La secuencia implicaba la actuación de electroválvulas, cilindros neumáticos, un motor DC con encoder, y una estructura mecánica de guiado. Finalmente, mediante un sensor óptico y un motor neumático con

mecanismo de cremallera dentada, se lograba un disparo exitoso que enrollaba el papel en el nuevo spool y expulsaba el anterior hacia la línea de postprocesamiento.

La pérdida del sistema automático ha obligado a los operarios a realizar este proceso manual, exponiéndolos a riesgos mecánicos, altas temperaturas, y a ineficiencias operativas. El riesgo de atrapamiento con los mecanismos del Pope y la exposición al vapor representan un peligro permanente, además de que los métodos manuales no siempre logran un disparo acertado, lo que en muchas ocasiones implica detener el molino, generando pérdidas en la producción y en el rendimiento operativo.

Ante esta situación, el proyecto busca recuperar la automatización del sistema Turnup mediante la reconstrucción del código del controlador, utilizando como referencia los programas de otros molinos que operan con lógica similar. Adicionalmente, se pretende diseñar nuevas interfaces gráficas de operación desde una HMI moderna, que permitan monitorear y controlar cada etapa del proceso de manera segura y eficiente. Con esta intervención, se espera mejorar significativamente la efectividad en el cambio de Reel, reducir el tiempo perdido por paradas de máquina y, sobre todo, evitar que el personal tenga que acercarse a una zona de alto riesgo para realizar tareas que pueden y deben ser automatizadas.

Se pone en evidencia la necesidad de una solución desde la ingeniería electrónica, enfocándose en la automatización industrial, el control de procesos y la implementación de sistemas seguros que garanticen la continuidad operativa y la protección del recurso humano.

Uno de los primeros retos identificados fue la falta de conocimiento sobre cómo comunicar dos PLCs para compartir información de control. Esta situación es común en entornos donde la infraestructura original carece de documentación técnica o está desactualizada. Sin embargo, a través de la revisión de documentación oficial del fabricante Rockwell Automation,

se encontró que ambos controladores, al ser de la misma familia, podían intercambiar datos mediante una función nativa de mensajería (MSG), la cual permite el envío de paquetes de datos utilizando el protocolo Ethernet/IP. Esto permite establecer la conectividad necesaria entre el PLC Micro820 del sistema Turnup y el PLC principal del Molino 4.

Adicionalmente, teniendo en cuenta la pérdida total del programa original del Micro820 debido a un fallo eléctrico, se dificulta la utilización del módulo de entradas rápidas del controlador, requerido para interpretar las señales de un encoder. Ante el desconocimiento de su configuración y funcionamiento, se adoptó inicialmente una estrategia temporal basada en temporización digital para estimar el conteo de cinta durante el cambio de Reel. Al finalizar una serie de pruebas se determina que la temporización es ineficiente y se opta por investigar sobre la configuración del módulo. Este tipo de soluciones improvisadas, aunque viables en el corto plazo, demuestran la necesidad de fortalecer el conocimiento técnico sobre módulos especializados en el campo de la automatización.

Otra limitación importante fue la ausencia total de la interfaz gráfica original en la pantalla PanelView, la cual se averió por la exposición constante a vapor y humedad. Al no contar con respaldos visuales ni documentación funcional de las gráficas previas, se procedió a diseñar y programar nuevas pantallas HMI desde cero, basadas en el entendimiento del proceso observado directamente en campo. Esta reconstrucción desde el desconocimiento obligó a aplicar metodologías de ingeniería inversa, validando cada funcionalidad mediante pruebas repetitivas y análisis de operación junto al personal técnico.

En conjunto, este proyecto se diferencia de otros abordados en literatura técnica por su énfasis en la recuperación y rediseño funcional sin documentación previa, lo cual representa una situación frecuente en entornos industriales donde los sistemas envejecen sin mantenimiento

sistemático. A diferencia de estudios que presentan soluciones planificadas con datos completos, el presente caso demuestra la importancia de la adaptación práctica, el aprendizaje técnico autodirigido y la investigación aplicada en condiciones reales.

El estado del arte evidencia, entonces, no solo los avances posibles mediante herramientas proporcionadas por el fabricante, sino también la necesidad de competencias sólidas en automatización, redes industriales, programación de PLC y desarrollo de HMI, campos directamente relacionados con la ingeniería electrónica. La experiencia obtenida refuerza el valor del conocimiento disciplinar y aplicado para enfrentar situaciones inesperadas con soluciones efectivas y seguras.

Marco teórico

Fundamento de Automatización

La automatización industrial se define como el conjunto de tecnologías, metodologías y herramientas orientadas a sustituir o complementar la intervención humana en procesos industriales, mediante la integración de sistemas electrónicos, de control y computacionales que permiten operar, supervisar y optimizar dichos procesos de forma segura y continua.

Desde una perspectiva técnica, la automatización industrial implica la interconexión e interoperabilidad de múltiples dispositivos como controladores lógicos programables (PLCs), interfaces hombre-máquina (HMI), sensores, actuadores, y sistemas SCADA, todo esto soportado por arquitecturas de red industriales (como Ethernet/IP o Modbus TCP) que aseguran una comunicación robusta y en tiempo real entre los componentes del sistema.

Según Juan Manuel Escaño González (2019), la automatización industrial es un “proceso evolutivo basado en la integración funcional de los sistemas físicos, electrónicos y de control, donde los elementos mecánicos, eléctricos y digitales convergen para garantizar la eficiencia, la calidad y la continuidad del proceso productivo”. Este enfoque destaca no solo la implementación de tecnología, sino también la integración armónica de subsistemas autónomos que deben operar bajo una lógica de control predefinida y adaptable.

Además, la automatización industrial abarca diferentes niveles: desde la automatización de dispositivos (sensores y actuadores), pasando por el control de procesos (mediante PLCs y microcontroladores), hasta llegar al nivel de supervisión donde se gestionan datos operativos, se toman decisiones de producción y se ejecutan estrategias de mantenimiento predictivo.

Sistemas Neumáticos y Electroneumáticos

Según Antonio Creus Solé (2016), Los sistemas neumáticos utilizan aire comprimido como medio de energía para realizar trabajo mecánico. Son ampliamente utilizados en la automatización industrial por su sencillez, velocidad de respuesta, bajo costo y facilidad de mantenimiento. Los sistemas electroneumáticos, por su parte, integran elementos eléctricos (como sensores, relés, temporizadores y PLCs) con componentes neumáticos, lo que permite automatizar procesos complejos de forma precisa y programable.

Actuadores Neumáticos

Un sistema neumático básico está formado por una unidad de generación y tratamiento de aire, válvulas distribuidoras, actuadores lineales o rotativos y elementos de control y regulación, que permiten ejecutar secuencias lógicas de trabajo con gran fiabilidad (Creus Solé, 2016).

Ilustración 1 *Cilindro Neumático de Simple Efecto*



Nota. Poseen una única entrada de aire y utilizan un resorte interno para el retorno del vástago. Solo ejercen fuerza en un sentido (extensión o retracción) y son ideales para tareas de baja carga

o donde se requiera una posición de reposo segura (Creus Solé, 2016). Imagen tomada de Cilindro simple efecto neumático (Nelco México, 2020)

Ilustración 2 *Cilindro Neumático de Doble Efecto*



Nota. Tienen dos puertos de entrada de aire, uno para extender y otro para retraer el vástago. Permiten ejercer fuerza en ambas direcciones y son los más utilizados en procesos industriales donde se requiere control completo del movimiento (Creus Solé, 2016). Imagen tomada de *Cilindro de doble efecto neumático* (Nelco México, 2020).

Ilustración 3 *Motor de Accionamiento Neumático*



Nota. Los motores neumáticos rotativos convierten la energía del aire comprimido en movimiento giratorio. Se emplean en aplicaciones donde se necesita un par de torsión constante

sin riesgo de sobrecalentamiento, como en herramientas neumáticas o mecanismos de disparo mecánico (Creus Solé, 2016). Imagen tomada de *Motor neumático de paletas* (Aircontrol, s. f.).

Válvulas Neumáticas

Los sistemas electroneumáticos integran el control eléctrico mediante relés o PLC con la actuación neumática, lo que permite una mayor precisión en la sincronización y supervisión de procesos automatizados (Creus Solé, 2016).

Ilustración 4 *Válvula Neumática de Accionamiento Manual*



Nota. Son dispositivos que controlan el paso del aire comprimido mediante una acción humana directa, como una palanca, botón o pedal. Se usan frecuentemente en operaciones de emergencia, mantenimiento o pruebas (Creus Solé, 2016). Imagen tomada de *Válvula neumática manual* (Pneumatig, s. f.)

Ilustración 5 *Electroválvula Neumática*



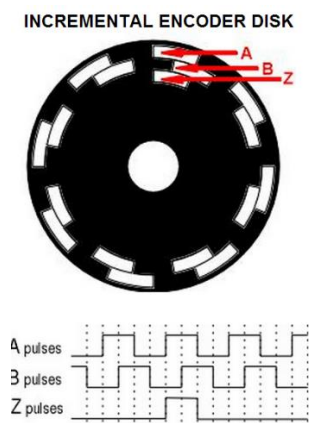
Nota. Son válvulas controladas eléctricamente mediante un solenoide. Permiten ser accionadas por señales digitales o analógicas desde PLCs o sistemas de control, lo que posibilita la automatización de los actuadores neumáticos (Creus Solé, 2016). Imagen tomada de *electroválvula neumática 3 vías y 2 posiciones tipo 3V210-08* (Romeco Industrial, s. f.).

Encoders

Los encoders son dispositivos electromecánicos que convierten el movimiento mecánico (rotativo o lineal) en señales eléctricas digitales o analógicas, las cuales representan la posición, velocidad, dirección o desplazamiento de un eje. En sistemas de control de motores, los encoders son esenciales para el control de lazo cerrado, ya que proporcionan retroalimentación al controlador o PLC sobre el estado real del movimiento.

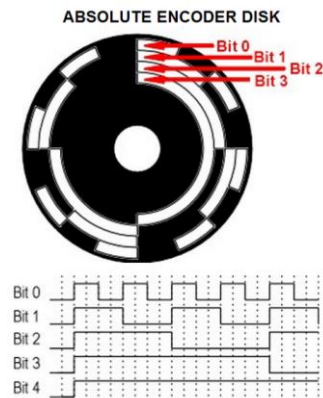
El principio básico de funcionamiento consiste en un sensor que detecta el paso de marcas (ópticas, magnéticas o mecánicas) sobre un disco o cinta acoplada al eje del motor. Las señales generadas se interpretan para calcular variables como posición angular, velocidad de rotación y sentido de giro (Creus Solé, 2016).

Ilustración 6 *Encoder Incremental*



Nota. Generan una serie de pulsos en función del desplazamiento del eje. No proporcionan información absoluta de posición; requieren un punto de referencia (homing) para determinar la posición inicial. Sus principales parámetros son la resolución (pulsos por vuelta – PPR) y la frecuencia máxima de salida. Son usados en control de velocidad, conteo de revoluciones, sincronización de ejes. Son simples, robustos y económicos, pero pierden la referencia de posición ante cortes de energía. Imagen tomada de *Encoders incrementales – disco codificador* (dscs, s. f.).

Ilustración 7 *Encoder Absoluto*



Nota. Proporcionan un valor único de posición para cada ángulo del eje. No requieren homing después de un apagado, ya que cada posición tiene un código único.

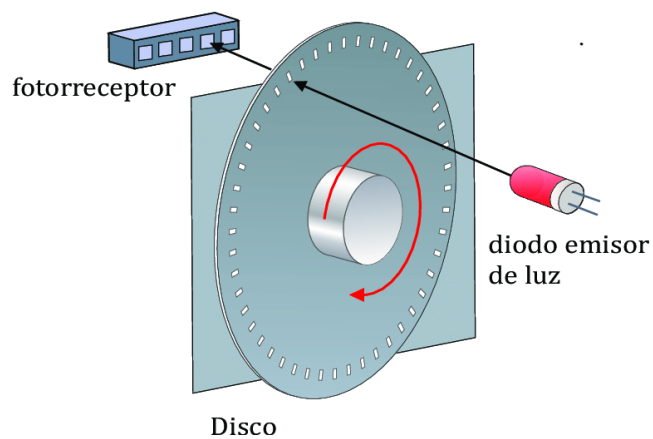
Se dividen en: De un solo giro (single-turn) los cuales detectan la posición dentro de una vuelta completa. Multigiro (multi-turn), detectan posición en múltiples vueltas mediante engranajes o contadores internos.

Aplicaciones: Posicionamiento preciso en robótica, servomotores, máquinas CNC.

Ventaja: No pierden datos de posición.

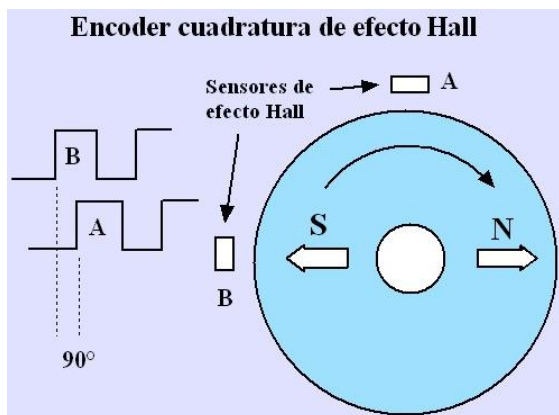
Desventaja: Más costosos y complejos que los incrementales. Imagen tomada de *Encoder absoluto – disco codificado* (dscs, s. f.).

Ilustración 8 Encoder Óptico



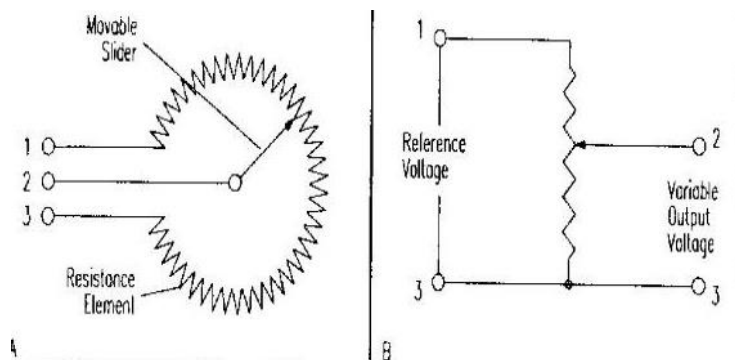
Nota. Utilizan un disco transparente con marcas opacas y un sensor óptico (LED + fotodetector) para generar pulsos. Ofrecen alta resolución y precisión. Sensibles a polvo y suciedad. Imagen tomada de la Figura 2.1 del capítulo 2 (“Sistemas de medición de variables del robot”) del documento Diseño de un robot auto balanceado (Concepción Álvarez, 2019)

Ilustración 9 Encoder Magnético



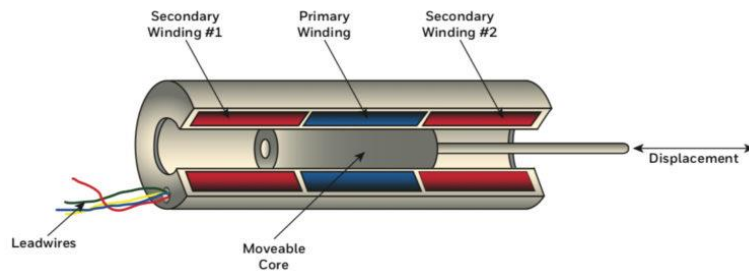
Nota. Usan imanes y sensores Hall para detectar la posición. Resistentes a ambientes con polvo, humedad o vibraciones. Generalmente ofrecen menor resolución que los ópticos, pero mayor robustez. Imagen tomada de *Funcionamiento encoder cuadratura / efecto Hall* (Punto Flotante, s. f.).

Ilustración 10 Encoder de Contacto



Nota. hay un potenciómetro mecánico para medir el desplazamiento angular. Generan una señal analógica proporcional a la posición. Adecuados para aplicaciones de bajo costo y poca velocidad. Imagen tomada de *Encoder absoluto usando un potenciómetro* (ccc Inaoep, s. f.).

Ilustración 11 *Encoder Lineal*



Nota. Miden desplazamientos lineales en lugar de rotativos. Basados en escalas ópticas o magnéticas y un cabezal lector. Comunes en máquinas CNC y sistemas de medición de precisión. Imagen tomada de *How is an LVDT similar to a resolver – cutaway view of LVDT* (Linearmotiontips.com, s. f.)

PLC

Un Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo electrónico industrial diseñado para automatizar procesos mediante la ejecución de una secuencia lógica de operaciones programadas. Está construido para operar en ambientes industriales hostiles, y reemplaza circuitos de control cableados rígidamente por soluciones flexibles basadas en programación.

De acuerdo con Petruzella (2017), un PLC es un equipo especializado que monitorea el estado de los dispositivos de entrada, toma decisiones lógicas en función de su programación interna y controla dispositivos de salida para automatizar procesos secuenciales o combinacionales. Se destaca por su alta fiabilidad, modularidad, capacidad de expansión y resistencia al ruido electromagnético.

Un PLC básico está compuesto por:

Unidad Central de Procesamiento (CPU): Interpreta el programa del usuario, procesa las señales de entrada y genera las salidas correspondientes.

Módulos de Entrada: Reciben señales digitales o analógicas desde sensores o dispositivos de campo.

Módulos de Salida: Envían señales para accionar actuadores, motores, válvulas, etc.

Memoria: Donde se almacena el programa del usuario y los datos de operación.

Fuente de alimentación: Suministra energía al sistema.

Interfaces de comunicación: Permiten el intercambio de datos con otros dispositivos o sistemas, como otros PLCs, HMIs o redes SCADA.

El Micro820 es parte de la serie Micro800 de Rockwell Automation, diseñado para aplicaciones pequeñas y medianas. El modelo 2080-LC20-20QWB cuenta con:

12 entradas digitales y 8 salidas digitales tipo relé.

Entradas y salidas configurables para módulos de expansión (E/S).

Puertos integrados de comunicación serial y Ethernet.

Soporte para EtherNet/IP, facilitando la integración con redes industriales.

Capacidad para control secuencial básico y tareas lógicas programables en lenguaje Ladder, Function Block y Structured Text.

Programación mediante el software Connected Components Workbench (CCW).

Este controlador es ideal como nodo de control local o como I/O remoto, lo cual es especialmente útil cuando se busca conectarlo a un PLC principal en una arquitectura distribuida.

Ilustración 12 PLC Micro820



Nota. Controlador de gama media usado en el sistema Turnup el cual actúa como I/O remoto.

Imagen tomada de *Micro820 PLC 2080-LC20-20QBB/W* (Rockwell Automation, s.f).

El ControlLogix 1756-L72, también de Rockwell Automation, es un controlador de gama alta orientado a procesos complejos y redes de automatización avanzadas. Sus características incluyen:

- Alta velocidad de procesamiento y capacidad de memoria (16 MB).

- Modularidad para aplicaciones a gran escala.

- Compatibilidad total con EtherNet/IP, ControlNet y DeviceNet.

- Capacidad de ejecución de múltiples tareas y programas en tiempo real.

- Soporte para redundancia y control distribuido.

- Integración directa con sistemas de supervisión y control SCADA.

Se programa mediante el software RSLogix 5000, y es comúnmente utilizado como controlador maestro en aplicaciones que requieren alta disponibilidad, procesamiento complejo y gran número de dispositivos en red.

En el control secuencial, los PLCs ejecutan procesos basados en una lógica paso a paso, en la que ciertas condiciones deben cumplirse antes de avanzar al siguiente estado o acción. Este tipo de control es ideal para procesos de producción como líneas de ensamblaje, manejo de materiales, entre otros.

El PLC supervisa sensores y dispositivos de entrada, evalúa condiciones lógicas, y ejecuta salidas para accionar componentes en secuencia. Esto permite un control eficiente, repetible y seguro del proceso industrial.

Una característica avanzada de los controladores de Rockwell Automation es su capacidad para comunicarse entre sí mediante Ethernet/IP, utilizando funciones de mensajería. Esto permite enviar y recibir datos entre diferentes controladores en forma de paquetes de datos (tags o estructuras) sin necesidad de cableado adicional de I/O.

Mediante instrucciones en Studio 5000, o las funciones integradas en CCW para Micro820, se pueden establecer conexiones punto a punto o de broadcast. Esta funcionalidad permite que un PLC actúe como maestro, solicitando o recibiendo datos de otros PLCs configurados como esclavos o remotos.

Esta función permite que el Micro820 se comunique como esclavo o módulo de E/S remoto con el 1756-L72, compartiendo información crítica como conteos de encoder, señales de sensores y estados de actuadores, para que un proceso completo sea gestionado desde un solo sistema centralizado.

Ilustración 13 *PLC ControlLogix 1756-L72*



Nota. Controlador principal o PLC de la maquina en el cual se encuentra la programación principal de la maquina incluyendo el sistema Turnup. Imagen tomada de *ControlLogix 1756-L72 controller module* (Allen-Bradley, s. f.).

Comunicación maestro-esclavo con función MSG

La instrucción MSG (Message) en los PLC ControlLogix de Rockwell Automation permite la transmisión de datos entre controladores a través de una red industrial como EtherNet/IP, soportando tanto lectura como escritura de información. Esta función es fundamental en arquitecturas distribuidas donde uno o más dispositivos actúan como esclavos de un controlador central.

En una configuración donde el PLC 1756-L72 es el maestro y el Micro820 (2080-LC20-20QWB) es el esclavo, la comunicación se configura únicamente desde el L72, dado que los controladores Micro820 solamente responderá a ella (modo pasivo o esclavo).

Declaración y configuración de la función MSG

Tipo de mensaje. Se debe configurar la instrucción MSG como:

Communication Service Type: CIP Generic

Service. Dependerá de la operación:

0x4C (CIP Read Data) para lectura

0x4D (CIP Write Data) para escritura

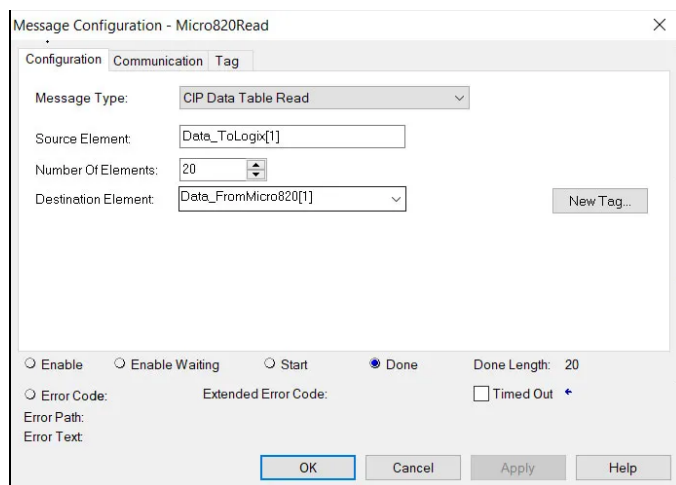
Path. Se especifica la ruta lógica hacia el controlador esclavo, generalmente incluyendo el número de ranura (en caso del L72) y la dirección IP del Micro820.

Tag de destino (Remote tag). Se debe especificar el nombre del tag en el Micro820 a leer o escribir, el cual debe estar declararse variable global (Variable de acceso público).

Tamaño de datos. Se define la cantidad de datos (en bytes) a transferir.

Timeouts y retry. Se puede configurar cuánto tiempo espera el maestro por una respuesta antes de intentar de nuevo.

Ilustración 14 Ventana de Configuración de la Función MSG



Nota. En la ventana de configuración se define el tipo de mensaje que se quiere ejecutar, la variable a leer o escribir y su variable de destino, además, del tamaño de la variable. Fuente

Elaboración propia (2025).

Marco conceptual

Automatización Industrial. Aplicación de tecnologías electrónicas y de control para operar maquinaria y procesos de forma automática.

PLC (Controlador Lógico Programable). Dispositivo de control usado para la ejecución de procesos secuenciales mediante programación.

HMI (Interfaz Hombre-Máquina). Herramienta gráfica que permite la interacción entre el operador y el sistema automatizado.

Red de Control Industrial. Infraestructura de comunicación que permite la interconexión de dispositivos de automatización.

I/O Remoto. Método por el cual un PLC actúa como una unidad de entrada/salida controlada remotamente por un PLC maestro.

Reel y Turnup. En la industria papelera, el Reel es el carrete que recoge el papel producido, mientras que el sistema Turnup automatiza el cambio entre carretes llenos y vacíos.

Descripción técnica del funcionamiento del sistema Turnup

El sistema Turnup del área del Pope Reel está diseñado para automatizar el proceso de inserción y disparo de la cinta de empalme que permite realizar el cambio de reel. Su funcionamiento se desarrolla de manera secuencial y depende de la coordinación entre cilindros neumáticos, válvulas, sensores y el accionamiento de un motor eléctrico.

El ciclo inicia con la inserción manual de la cinta de papel especial en el sistema. El operador presiona el pulsador START, lo que activa un cilindro neumático de doble efecto encargado de posicionar un tope mecánico, el cual define la distancia inicial de la cinta. Una vez la cinta ha sido insertada hasta este tope, el operador vuelve a presionar el pulsador START; en ese momento, una electroválvula acciona un segundo cilindro neumático que baja un pisador mecánico, garantizando el NIP entre la cinta y el volante motorizado (JUD GmbH, 2021).

Cuando el pisador confirma su posición, el sistema envía la orden de RUN al motor eléctrico, el cual impulsa la cinta transversalmente a través del ancho de la máquina. La cinta debe sobresalir al menos una pulgada más allá del riel guía, lo que se controla mediante el conteo de pulsos del encoder acoplado al motor. Al alcanzar esta distancia, se activan dos cilindros neumáticos adicionales: uno que cumple la función de freno y otro que acciona una guía de bucle, forzando a la cinta a descender y formando lo que se denomina el bucle de frenado.

Tras completar los conteos correspondientes a este primer bucle, los cilindros de frenado se desactivan y entran en operación otros dos cilindros, encargados de generar el bucle de inyección. El motor avanza nuevamente hasta que la cinta alcanza la longitud configurada, completando el segundo bucle. A continuación, otro cilindro neumático desplaza una cuchilla que corta la cinta, lo cual deja al sistema preparado para el disparo en el momento del cambio de reel.

Cuando llega este momento, el operador baja los brazos primarios del Pope Reel, provocando que el spool vacío haga nip con el rodillo principal. Un sensor óptico detecta la posición del spool y envía la señal para ejecutar el disparo de la cinta. En esta secuencia, los cilindros de retención liberan la cinta y se activan otros dos cilindros: uno que asegura el nip de la cinta en el extremo de recorrido y otro que acciona un motor neumático con cremallera dentada, el cual expulsa la cinta hacia la zona de contacto con el papel en curso. De esta manera, el papel en proceso se enreda en el nuevo spool, completando el cambio de reel y expulsando el carrete lleno hacia la siguiente etapa productiva.

Marco normativo

El desarrollo de un sistema automatizado en el sector industrial no solo implica consideraciones técnicas, sino también la observancia de un conjunto de normas y regulaciones que garantizan la seguridad, calidad y sostenibilidad de los procesos. En este contexto, el presente proyecto de automatización del sistema Turnup en el molino 4 de la empresa SmurfitWestrock se enmarca en disposiciones legales, técnicas y sectoriales que regulan tanto la operación de maquinaria como la protección de los trabajadores y la estandarización de los sistemas de control.

Normas legales en Colombia

Resolución 2400 de 1979: Normas sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. Establece medidas obligatorias para prevenir riesgos laborales en entornos industriales, aplicables al área del Pope Reel, donde existe riesgo mecánico y térmico.

Decreto 1072 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. Reglamenta el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), el cual obliga a implementar medidas de prevención frente a riesgos mecánicos, eléctricos y de atrapamiento.

Resolución 0312 de 2019: Establece los estándares mínimos del SG-SST que las empresas deben cumplir en Colombia.

Normas internacionales de seguridad en máquinas

ISO 12100 de 2010: Seguridad de las máquinas, Principios generales de diseño, Evaluación del riesgo y reducción del riesgo. Aplica al rediseño y reconstrucción del sistema Turnup, considerando los peligros de atrapamiento y exposición a partes móviles.

ISO 13849-1:2015: Seguridad de las máquinas, Partes de los sistemas de control relativas a la seguridad. Define los requisitos de seguridad en los sistemas de control que incluyen PLCs y dispositivos de parada de emergencia.

ISO 14120:2015: Requisitos generales para resguardos de máquinas. Normativa relevante por la necesidad de implementar protecciones físicas y evitar el acceso directo de los operarios a la zona de riesgo del Pope Reel.

IEC 61131-3: Estándar internacional para la programación de controladores lógicos programables (PLC). Aplica directamente a la reconstrucción del programa en el Micro820 (2080-LC20-20QWB) y en el ControlLogix 1756-L72, asegurando buenas prácticas en programación estructurada y modular.

IEEE 802.3 (Ethernet): Estándar que regula la comunicación entre controladores a través de Ethernet/IP, utilizado en la función de mensajería MSG entre los PLCs de Rockwell.

NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery. Norma aplicable a la seguridad eléctrica en maquinaria industrial, importante en la integración del nuevo sistema de control y en la instalación de la HMI.

Metodología

El desarrollo metodológico del proyecto se organizó en tres fases principales que permitieron abordar el problema de manera sistemática: diagnóstico y recolección de información, diseño y desarrollo de la solución, y validación experimental.

Diagnóstico y recolección de información

En esta etapa se identificó la pérdida completa de la programación del controlador Micro820 y la inoperancia de la pantalla HMI CP100, lo que imposibilitaba el control automático del sistema Turnup. El diagnóstico incluyó la verificación del estado de los componentes de hardware (PLC, encoder, electroválvulas y sensores) y la recopilación de información de referencia a partir de manuales del fabricante y programas de control empleados en otros molinos con equipos similares. Además, se realizaron entrevistas con los operarios, quienes aportaron información sobre el comportamiento del sistema antes de la falla y señalaron dificultades recurrentes del diseño anterior, las cuales se tomaron en cuenta para proponer mejoras.

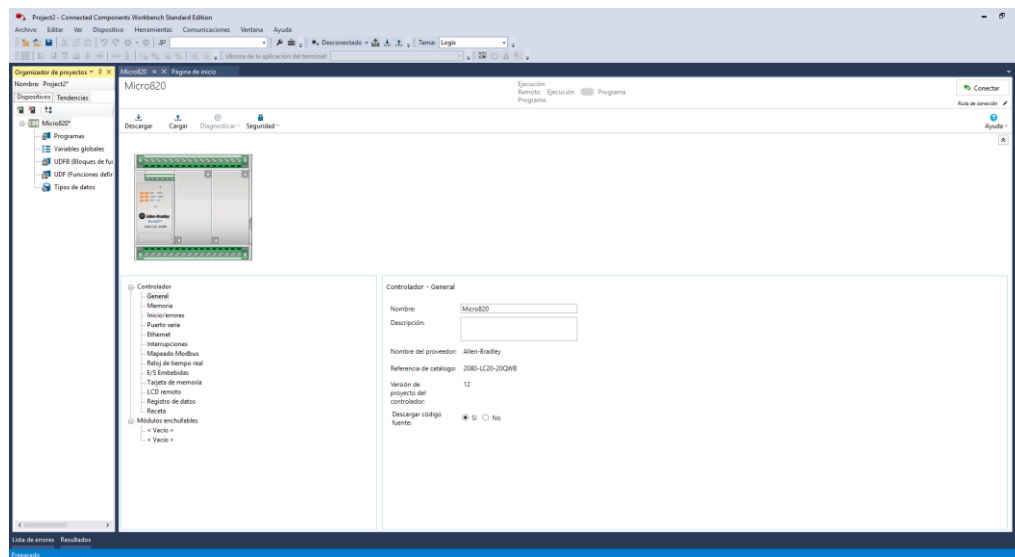
Ilustración 15 Sistema Turnup con Deterioro en HMI



Nota. La consola del sistema Turnup inicialmente contaba con una HMI CP100 la cual su electrónica dejo de funcionar debido a la alta humedad del vapor cercano al área donde se

encuentra instalado el equipo, además, el teclado físico de esta HMI sufrió daño dejándola totalmente inservible. Fuente *Elaboración propia* (2025).

Ilustración 16 *Upload al Micro820 en Diagnóstico de Falla*

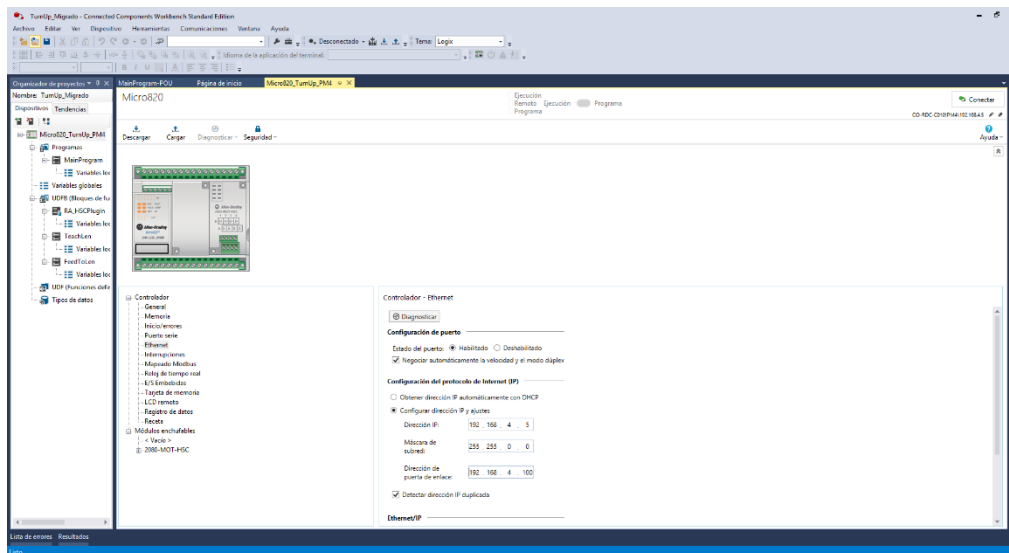


Nota. Se usa el software CCW para intentar recuperar la programación del PLC, pero sin éxito, se crea un proyecto en blanco con el mismo controlador para poder hacer upload del controlador, pero no se obtiene ninguna lógica. Fuente *Elaboración propia* (2025).

Diseño y desarrollo de la solución

Con base en la información obtenida, se estableció la estrategia de integrar el Micro820 como un módulo de I/O remoto, evitando la necesidad de instalar un sistema Flex I/O que representaba mayores costos y requería espacio adicional en el gabinete. Para ello, el Micro820 fue conectado punto a punto a un PC portátil utilizando el software Connected Components Workbench (CCW), desde donde se actualizó el firmware, se habilitaron nuevas funciones y se configuró una dirección IP dentro del rango de la red de control de la planta.

Ilustración 17 Nueva Configuración de Red para el Micro820



Nota. Al no poder recuperar el código se inició con la modificación del procesador para la adaptación como I/O remote, se asigna una dirección IP dentro del segmento de red del PLC de máquina para garantizar que ambos equipos se comuniquen. Fuente *Elaboración propia (2025)*.

Posteriormente, se creó un conjunto de variables tipo arreglo, destinadas a almacenar los conteos del encoder y las señales de entradas y salidas digitales. Con el fin de optimizar la mensajería, se empleó una palabra DINT de 32 bits, desglosada en bits individuales para representar hasta 32 señales discretas, reduciendo así la necesidad de transmitir cada bit por separado y aumentando la eficiencia de la comunicación.

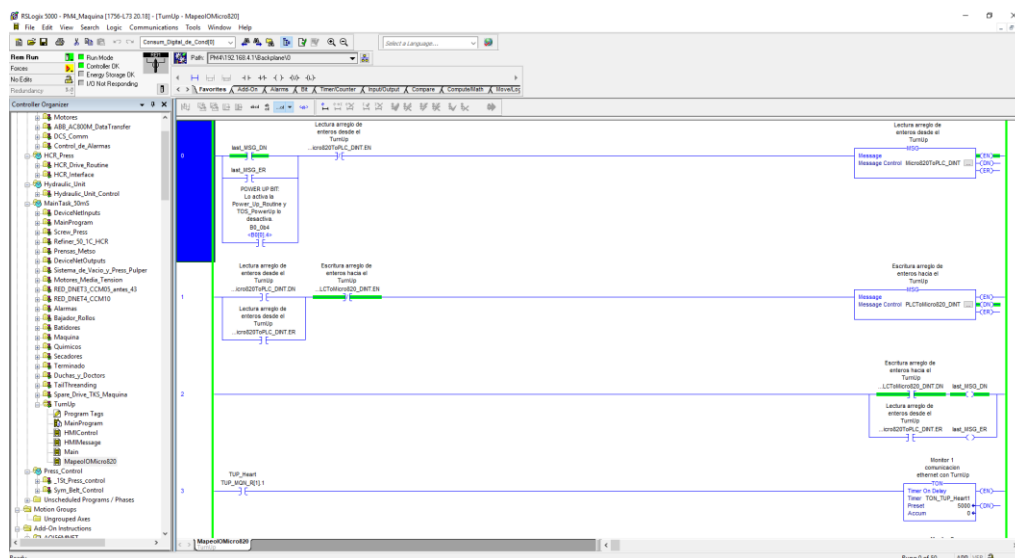
Ilustración 18 Declaración de Variables a Nivel de Controlador en el Micro820

Nombre	Alias	Tipo de datos	Dimensiones	Valor del par	Valor inicial	Comentario	No volátil	Tamaño de la cadena
TUP_MQLS		INT		(0..1)				
TUP_MQNS(0)		INT						
TUP_MQNS(1)		INT						
TUP_MQNS(2)		INT						
TUP_MQNS(3)		INT						
TUP_MQNS(4)		INT						
TUP_MQNS(5)		INT						
TUP_MQNS(6)		INT						
TUP_MQNS(7)		INT						
TUP_MQNS(8)		INT						
MON_TUP_R		INT		(0..7)				
MON_TUP_R(0)		INT						
MON_TUP_R(1)		INT						
MON_TUP_R(2)		INT						
MON_TUP_R(3)		INT						
MON_TUP_R(4)		INT						
MON_TUP_R(5)		INT						
MON_TUP_R(6)		INT						
MON_TUP_R(7)		INT						
SYSAL_CYCLESTATE		TIME				Contador de ciclo		
SYSAL_JOBERR		BOOL				Marcador de tiempo al inicio del ciclo		
SYSAL_JOBERR		BOOL				Error de producción de vehículo de		
SYSAL_JOBERR		BOOL				Error de consumo de vehículo de via		
SYSAL_JOBERR		BOOL				Número del recurso energético usado		
SYSAL_JOBERR		DINT				Contador de accionamiento de entrada		
SYSAL_JOBERR		TIME				Tiempo de ciclo programado		
SYSAL_JOBERR		TIME				Tiempo de ciclo actual		
SYSAL_JOBERR		TIME				Tiempo de ciclo máximo desde el ciclo		
SYSAL_JOBERR		DINT				Número de exceso de ciclo		
SYSAL_JOBERR		DINT				Modo de operación de recursos		
SYSAL_JOBERR		BOOL				Igualar un ciclo cuando la aplicación		
SYSAL_JOBERR		BOOL			FALSE	Estado remoto		

Nota. Para optimizar la comunicación se crea un arreglo de 9 variables tipo entero los cuales van a enviar información hacia el PLC máquina, además, se crea un arreglo de 7 enteros para recibir información que nos comunica el PLC máquina. Fuente *Elaboración propia* (2025).

Paralelamente, en el PLC de máquina ControlLogix 1756-L72, se desarrolló una nueva subrutina exclusiva para el sistema Turnup. Dicha programación se cargó durante una parada programada de planta, ya que implicaba reasignar la ejecución del procesador. Dentro de la subrutina se implementaron instrucciones MSG (Message) configuradas en modos de lectura (READ) y escritura (WRITE), con el fin de intercambiar datos con el Micro820.

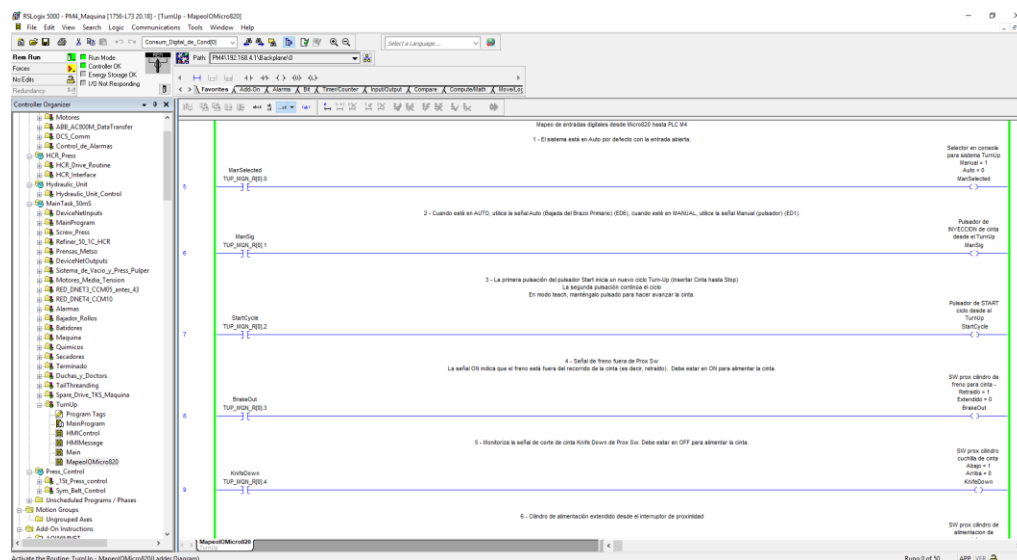
Ilustración 19 Rutina en PLC Máquina para Gestiona Mensajería hacia el Micro820



Nota. Se adiciona subrutina dedica para el sistema Turnup en el PLC de la maquina donde se tiene el mapeo IO, en el cual se gestiona en qué momento se leen las entradas y se escriben las salidas en el micro820. Fuente *Elaboración propia (2025)*.

Durante las pruebas iniciales se comprobó que los bloques de mensajería no presentaban errores y que las variables modificadas en el Micro820 se actualizaban correctamente en el ControlLogix, y viceversa, asegurando la comunicación bidireccional entre ambos controladores.

Ilustración 20 Mapeo I/O desde el Micro820 hacia PLC Maquina



Nota. Usando las palabras tipo INT se utilizan sus bits de forma independiente para leer y escribir las señales que provienen del Micro820, en este caso se toman los bits de las entradas y se conectan a las señales de la lógica donde se necesita su procesamiento. Fuente *Elaboración propia* (2025).

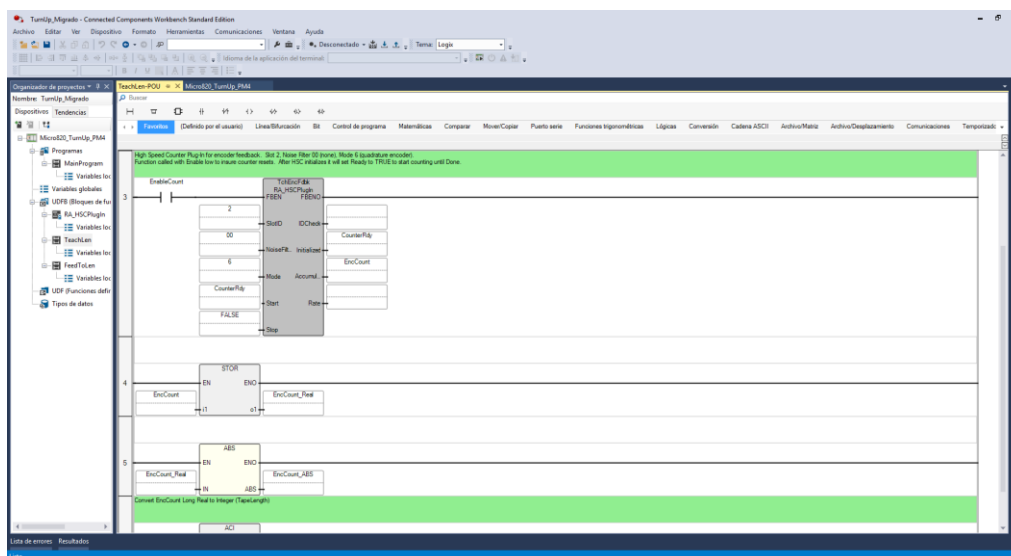
Validación experimental

Una vez establecida la comunicación, se realizaron pruebas en condiciones controladas para validar el desempeño del sistema. En la primera fase de validación se presentó una dificultad al intentar configurar el módulo de entradas rápidas del Micro820 para el conteo del encoder, lo que obligó a implementar temporalmente un método basado en temporización. Aunque este método permitió recuperar parcialmente la funcionalidad, presentó imprecisiones en la medición de distancia y ocasionó fallos en la secuencia de disparo de cinta.

Tras un análisis más detallado y pruebas adicionales, se logró habilitar el módulo de entradas rápidas y reprogramar el conteo con el encoder, lo que mejoró significativamente la

precisión del sistema. Sin embargo, se detectó latencia en la comunicación de mensajería Ethernet/IP, generando un retraso en la respuesta de paro del motor. Para mitigar esta limitación, se modificó la lógica del bloque de conteo, de manera que el paro se ejecutara por comparación directa de pulsos en el Micro820, aunque comandado por el ControlLogix. Esta corrección permitió compensar la latencia de red y garantizar la sincronización adecuada de los actuadores, consolidando la reconstrucción del sistema automatizado.

Ilustración 21 Programación Modulo HSC para Lectura de Encoder en Micro820



Nota. Una vez consultado la información técnica en la página de Rockwell Automation se logró configurar el módulo de HSC o entradas rápidas para el encoder 2080-MOT-HSC con lo cual se reciben los conteos del encoder por vuelta del volante del motor, una vez escalizar se logra tener los milímetros recorridos por el motor al inserta cinta. Fuente *Elaboración propia* (2025).

Diseño de la nueva interfaz HMI

Como parte fundamental de la reconstrucción del sistema de control del Turnup, se desarrolló una nueva interfaz gráfica de usuario mediante el software FactoryTalk View Machine Edition, reemplazando la HMI original que había quedado inoperante por deterioro físico. Este diseño contempló la creación de una pantalla específica para el manejo del sistema Turnup, integrada dentro del conjunto de pantallas del área del Pope Reel, lo que permitió centralizar el control y la supervisión en un único punto de operación confiable.

La pantalla fue diseñada para cumplir tres funciones principales:

Control operativo del sistema, mediante botones virtuales que permiten iniciar, detener y reiniciar secuencias del Turnup.

Supervisión del estado del proceso, con indicadores visuales que muestran el avance de la secuencia, la posición de actuadores y el estado de los sensores.

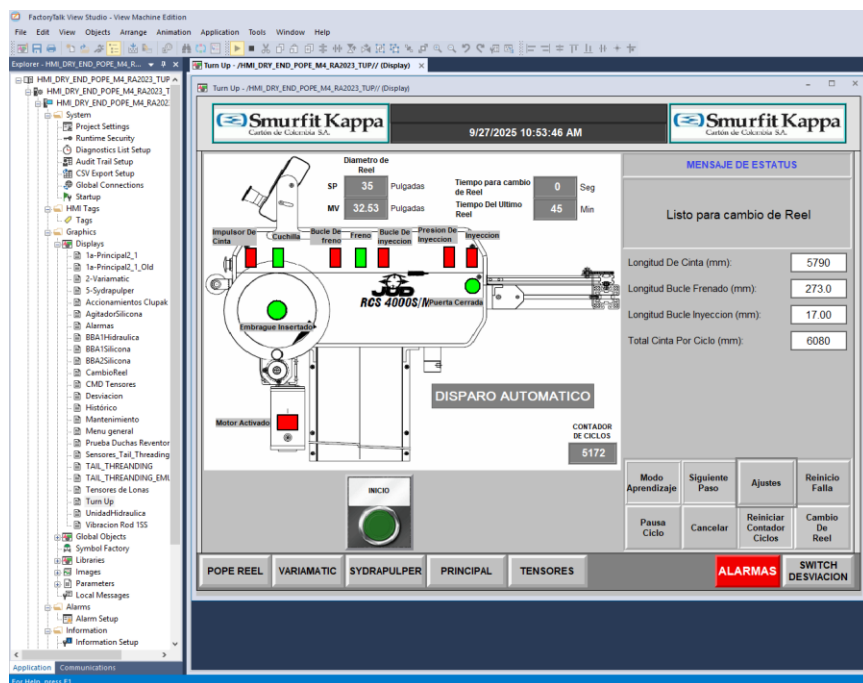
Gestión de alarmas y mensajes de falla, donde el operador puede identificar rápidamente el tipo de error y las acciones necesarias para su corrección.

Durante la fase de validación experimental, la nueva pantalla se conectó al PLC de máquina ControlLogix 1756-L72, el cual concentra la lógica del Turnup y recibe la información proveniente del Micro820. De esta forma, la HMI se comportó como la interfaz principal entre el operador y la lógica de control, logrando visualizar tanto las variables de proceso como las señales de diagnóstico en tiempo real.

Las pruebas realizadas en planta confirmaron la correcta integración de la HMI al sistema, verificando que los comandos enviados desde la pantalla se reflejaban en el accionamiento del hardware y que los estados y fallas del Turnup se reportaban oportunamente en la interfaz gráfica. Este resultado aseguró una recuperación completa de la capacidad de

operación automática, mejorando la seguridad de los operarios y reduciendo los tiempos de respuesta frente a fallas.

Ilustración 22 Diseño de Pantalla HMI de Reemplazo



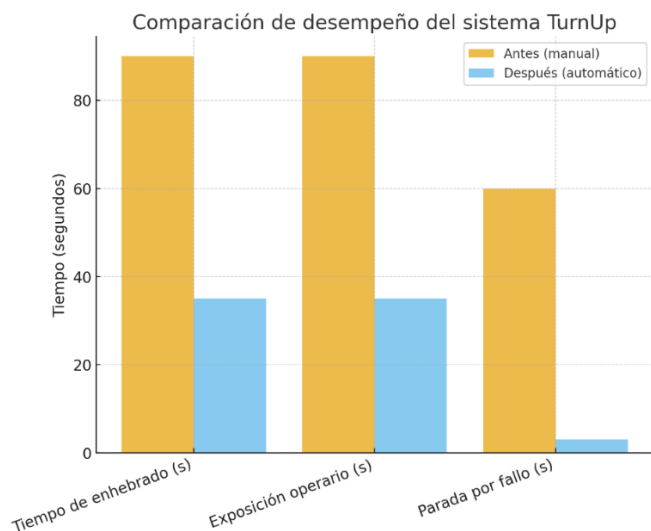
Nota. Se realiza diseño en el software Factory Talk View Machine Edition replicando la imagen del plano mecánico y ubicando relativamente los sensores y actuadores del sistema Turnup, adicional se programan ajustes desde HMI para modificar valores de operación. Fuente *Elaboración propia (2025).*

Resultados

La validación de la solución implementada permitió comparar el desempeño del sistema Turnup en condiciones manuales frente a su funcionamiento automático posterior a la migración tecnológica.

En la Ilustración 23 se observa una reducción significativa en los tiempos de operación. El enhebrado del sistema pasó de 90 segundos en modo manual a 35 segundos en modo automático, lo que representa una mejora superior al 60%. De igual manera, el tiempo de exposición del operario a la zona de riesgo disminuyó de 90 a 35 segundos, reforzando la seguridad del personal. Finalmente, el tiempo de respuesta ante un disparo fallido se redujo de 60 segundos a tan solo 3 segundos, lo que evita la necesidad de reiniciar el proceso de paso de cola y contribuye a una mayor continuidad operativa.

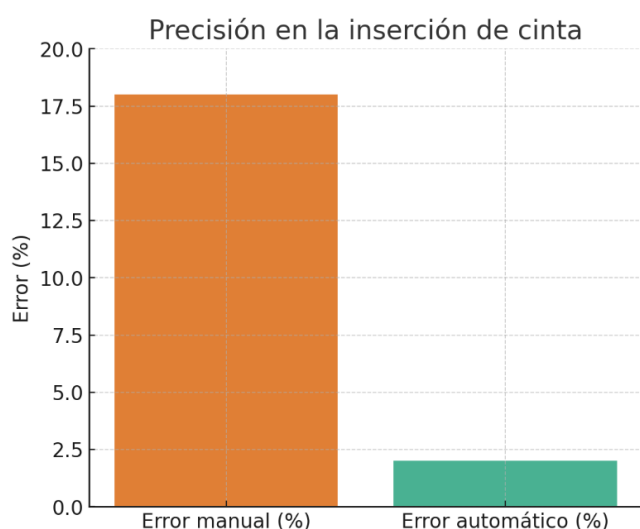
Ilustración 23 Comparación Desempeño Distema Turnup



Nota. Se realiza comparativa entre las condiciones antes de la migración, es decir, cuando el sistema se estaba operando de forma manual y como está en la actualidad operando de forma automática. Fuente *Elaboración propia* (2025).

Por otro lado, la precisión en la inserción de la cinta mostró una mejora sustancial. En el modo manual, el proceso dependía de la verificación visual del operario, con errores promedio estimados entre $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$. En contraste, el control por encoder implementado en el modo automático permitió reducir el error a $\pm 0-2\%$, garantizando uniformidad y confiabilidad en cada ciclo de disparo de cinta. La Ilustración 24 refleja esta mejora en la exactitud del proceso.

Ilustración 24 *Comparación Efectividad Sistema Turnup*



Nota. Se realiza una comparativa entre la efectividad del sistema Turnup antes de la migración, es decir, en modo manual donde se evidencia muchos fallos en la inserción y disparo de la cinta, por otro lado, se nota una mejoría considerable del sistema cuando este está trabajando de forma automática. Fuente *Elaboración propia (2025)*.

Los resultados obtenidos confirman la efectividad de la migración tecnológica realizada en el sistema Turnup del Molino 4, y pueden analizarse a la luz de los fundamentos técnicos y antecedentes descritos en el marco de referencia.

En primer lugar, la reducción de más del 60% en los tiempos de enhebrado y de exposición del operario concuerda con lo planteado por Petruzella (2017), quien señala que la automatización industrial incrementa la eficiencia al disminuir la dependencia de tareas manuales. En este caso, la integración del Micro820 como I/O remoto permitió transferir la gestión del proceso al ControlLogix 1756-L72, garantizando una secuencia más rápida y confiable que la lograda con el control manual.

En cuanto a la seguridad, los resultados obtenidos (disminución del 90% en el tiempo de exposición) respaldan la relevancia de las normativas internacionales como la ISO 12100 (2010), que promueven la reducción de riesgos por atrapamiento y contacto con partes móviles. La nueva lógica de control y el uso de la HMI centralizada minimizan la necesidad de que el operario permanezca en la zona de riesgo, alineándose con las exigencias de la normativa en materia de seguridad laboral.

Respecto a la precisión, la transición de un control temporizado hacia un control basado en encoder representa un avance significativo. Inicialmente, la estrategia con temporizadores evidenció limitaciones prácticas, ya que la variabilidad del peso de la cinta generaba errores en la longitud de inserción. Este hallazgo es coherente con lo expuesto por Escaño, García y Nuevo (2019), quienes resaltan que la fiabilidad de los sistemas de automatización depende de la selección adecuada de sensores y módulos de entrada. Al implementar el módulo de entradas rápidas del Micro820 y aprovechar la retroalimentación del encoder, se logró una precisión del $\pm 2\%$, superando los márgenes de error del método manual ($\pm 15\text{--}20\%$).

Finalmente, la reducción a tan solo un 10% de paradas generales de máquina atribuibles al Turnup pone en evidencia la importancia de la migración tecnológica no solo desde la perspectiva operativa, sino también económica. Estudios previos en la literatura sobre migración

de controladores en procesos industriales (Rockwell Automation, 2023) destacan que el uso de funciones de mensajería (MSG) mediante Ethernet/IP permite un intercambio de datos ágil y confiable, lo cual se comprobó en las pruebas realizadas en este proyecto.

En síntesis, los hallazgos no solo validan la pertinencia técnica de la solución implementada, sino que además la posicionan como una alternativa replicable en otros equipos de la planta, aportando evidencia empírica a lo discutido en el estado del arte sobre la necesidad de modernizar arquitecturas de control obsoletas en la industria papelera.

Conclusiones

El diagnóstico inicial permitió comprender en profundidad el estado del sistema Turnup y del controlador PLC Micro820. A través del análisis técnico y la observación directa se identificaron las causas que limitaban el funcionamiento del sistema, entre ellas la pérdida total de la programación del PLC y el daño estructural de la HMI original. Este proceso de evaluación fue determinante para establecer el alcance real de la falla, definir los recursos disponibles y plantear una estrategia de recuperación viable, sustentada en la reutilización de los componentes existentes y la integración de nuevas funciones de control.

A partir de los resultados del diagnóstico, se diseñó una arquitectura de comunicación que permitió incorporar el PLC Micro820 a la red de control del Molino 4 como un nodo remoto. Este diseño de conectividad, basado en el protocolo Ethernet/IP, garantizó una comunicación estable con el PLC principal (ControlLogix 1756-L72). La implementación de la función MSG de Rockwell Automation demostró la viabilidad de transferir información en tiempo real entre ambos controladores, optimizando la transmisión de señales y reduciendo los tiempos de respuesta en las operaciones automáticas del sistema Turnup.

En la etapa de programación y desarrollo de la nueva lógica de control, se reconstruyó el funcionamiento del sistema de forma estructurada, integrando las subrutinas a la programación general del Molino. Asimismo, se diseñó una nueva interfaz HMI en FactoryTalk View Machine Edition, que permitió a los operadores visualizar el estado del sistema, recibir mensajes de diagnóstico y controlar de forma intuitiva cada etapa del ciclo automatizado. Con ello se logró restablecer las funciones de supervisión, control y diagnóstico que se habían perdido, mejorando la interacción entre los operadores y el sistema automatizado.

La implementación de la solución diseñada consolidó la integración completa entre el Micro820 y el PLC principal, configurando el primero como módulo de entradas y salidas remotas. Esta arquitectura permitió centralizar el control del proceso y coordinar en tiempo real las señales provenientes de sensores, válvulas neumáticas, motor y el encoder del sistema. Como resultado, el proceso de cambio de Reel se volvió más confiable, reduciendo los tiempos de parada del molino y asegurando una operación más continua y estable.

En la etapa de ejecución práctica se llevó a cabo la implementación física y funcional de la solución, instalando los enlaces de comunicación, descargando las rutinas programadas y realizando las pruebas de integración entre los controladores. Estas pruebas permitieron verificar la sincronización de señales, el comportamiento de los actuadores neumáticos y la respuesta del sistema de control ante distintos escenarios operativos. La automatización lograda optimizó los tiempos de cambio de Reel, disminuyó la intervención manual y contribuyó directamente a la reducción de riesgos de atrapamiento y exposición térmica de los operarios.

Finalmente, se realizó la validación experimental del sistema migrado, verificando su desempeño en condiciones reales de operación. Se comprobó que el nuevo diseño mantiene la estabilidad de la comunicación entre PLCs, ofrece una mayor precisión en el conteo de pulsos del encoder y mejora la respuesta del control del motor en la inserción de la cinta. Estas pruebas confirmaron que el sistema cumple con los requisitos de desempeño y seguridad establecidos, evidenciando una mejora significativa en la productividad del proceso y en la confiabilidad general del sistema Turnup.

Referencias Bibliográficas

Aircontrol. (s. f.). Motor neumático de paletas [Imagen]. Aircontrol.

<https://www.aircontrol.es/es/motores-neumaticos-de-paletas/>

Allen-Bradley. (s. f.). ControlLogix 1756-L72 controller module [Imagen]. Recuperado de

<https://plccompare.com/wp-content/uploads/2011/01/Rockwell-ControlLogix.pdf>

Carriel Eras, F. J. (2024). Diseño y simulación del proceso de fabricación de papel mediante

PLC y HMI (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27752/1/UPS-GT005238.pdf>

ccc Inaoep. (s. f.). Encoder absoluto usando un potenciómetro [Imagen]. ccc Inaoep.

<https://ccc.inaoep.mx/~esucar/Clases-rob/Sensores/img47.htm>

Concepción Álvarez, J. A. (2019). Diseño de un robot autobalanceado [Tesis de grado,

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”]. ResearchGate.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25263.46242>

Creus Solé, A. (2016). *Neumática e hidráulica* (6.ª ed.). Marcombo.

https://www.academia.edu/37145190/Neum%C3%A1tica_e_Hidr%C3%A1ulica_Antonio_Creus_Sol%C3%A9_LIBROSVIRTUAL

dscs. (s. f.). Encoder absoluto – disco codificado [Imagen]. dscs.

<https://dscs.webcindario.com/posicion/encoder%20absoluto.htm>

dscs. (s. f.). Encoders incrementales – disco codificador [Imagen]. dscs.

<https://dscs.webcindario.com/posicion/Encoder%20Incremental/encoders%20incrementales.htm>

- Emerson. (s. f.). Control systems and solutions for the pulp and paper industry — DeltaV
[Página web]. Emerson. <https://www.emerson.com/es-es/automation/operations-business-management/deltav/control-systems-and-solutions-for-the-pulp-and-paper-industry>
- Escaño Gonzales, J.M., García, J., Nuevo A. (2019). *Integración De Sistemas De Automatización Industrial*. Paraninfo S.A.
<https://books.google.com.co/books?id=gj2dDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). IEEE Std 802.3™-2018 — IEEE Standard for Ethernet. IEEE. Recuperado de https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html
- International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 61131-3:2013 — Programmable controllers — Part 3: Programming languages. IEC. Recuperado de <https://webstore.iec.ch/publication/5703>
- International Organization for Standardization. (2010). ISO 12100:2010 — Safety of machinery: General principles for design — Risk assessment and risk reduction. ISO. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/51528.html>
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 13849-1:2015 — Safety of machinery: Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design. ISO. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/69883.html>

- International Organization for Standardization. (2015). ISO 14120:2015 — Safety of machinery: Guards — General requirements for the design and construction of fixed and movable guards. ISO. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/62036.html>
- JUD GmbH. (2021). Turnup RCS 4000 – automatic splicing system demonstration [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=7kBC2UI23tU>
- Kaur, A., & Singh, P. (2017). Paper Machine Automation using PLC, VFD's and HMI. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 6(05). <https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS050331>
- Langmann, R., & Stiller, M. (2019). The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems. Applied Sciences, 9(18), 3815. <https://doi.org/10.3390/app9183815>
- Linearmotiontips.com. (s. f.). How is an LVDT similar to a resolver – cutaway view of LVDT [Imagen]. Linearmotiontips.com. <https://www.linearmotiontips.com/how-is-an-lvdt-similar-to-a-resolver/>
- Ministerio de Trabajo de la República de Colombia. (1979). Resolución 2400 de 1979: Normas sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. Diario Oficial de la República de Colombia. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=53565>
- Ministerio de Trabajo de la República de Colombia. (2015). Decreto 1072 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. Diario Oficial No. 49.523. Recuperado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=72173>
- Ministerio de Trabajo de la República de Colombia. (2019). Resolución 0312 de 2019: Estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). Diario Oficial de la República de Colombia. Recuperado de

<https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf>

Molina Araujo, M. J. (2018). *Automatización del sistema de control de la máquina empaquetadora de Blíster*. Revista Politécnica, 41(1), 25-28.

http://scielo.senescyt.gov.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292018000200025&lng=es&tlng=es.

National Fire Protection Association. (2018). NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery. NFPA. Recuperado de <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-79-standard-development/79>

Nelco México. (2020). Cilindro de doble efecto neumático [Imagen]. Nelco.

<https://www.nelco.mx/2020/05/08/cilindro-doble-efecto-neumatico/>

Nelco México. (2020). Cilindro simple efecto neumático [Imagen]. Nelco.

<https://www.nelco.mx/2020/05/15/cilindro-simple-efecto-neumatico/>

Pedroza Villarruel, J., Velázquez Pérez, L. E., & Zamora Sánchez, C. U. (2012). *Automatización de un sistema para el proceso de corte y enrollado de papel* (Trabajo de titulación). Instituto Politécnico Nacional.

<https://es.scribd.com/document/433632626/automatizacion-de-un-sistema-para-el-proceso-de-corte-y-enrollado-de-papel-pdf>

Petruzella, F. D. (2017). *Controladores lógicos programables* (5a ed.). McGraw-Hill.

<https://es.slideshare.net/slideshow/controladores-lgicos-programables-por-frank-d-petruzellapdf-251613584/251613584>

Pneumatig. (s. f.). Válvula neumática manual [Imagen]. Pneumatig.

<https://pneumatig.eu/es/valvulas-electrovalvulas/valvulas-neumaticas-accionamiento-mecanico-manual/valvula-neumatica-manual.html>

Punto Flotante. (s. f.). Funcionamiento encoder cuadratura / efecto Hall [Imagen]. Punto

Flotante. <https://www.puntoflotante.net/FUNCIONAMIENTO-ENCODER-CUADRATURA-EFECTO-HALL.htm>

Rockwell Automation. (2023). *Micro800 Embedded Ethernet/IP Messaging* (Documento Técnico N.º 2080-QS002-EN-EJ).

https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/qs/2080-qs002_-en-e.pdf

Rockwell Automation. (s. f.). Micro820 PLC 2080-LC20-20QBB/W [Imagen]. Rockwell

Automation. <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/programmable-controllers/micro820-controllers.html>

Romeco Industrial. (s. f.). 3V210-08 electroválvula neumática 3/2 [Imagen]. Romeco Industrial.

<https://www.romecoindustrial.com/producto/electrovalvula-neumatica-3v210-08/>

Seong, J., Ranjan, R., Kye, J., & Lee, S. (2023). Enhancing Industrial Communication with Ethernet/Internet Protocol: A Study and Analysis of Real-Time Cooperative Robot Communication and Automation via Transmission Control Protocol/Internet Protocol. *Sensors*, 23(20), 8580. <https://doi.org/10.3390/s23208580>