



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



TESIS

**Diseño de un sistema de control y supervisión con industria 4.0
para un molino de cal en una minera en Ica**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborada por:

Bach. Ramirez Cortez Angel Junior
Bach. Cabanillas Reaño Jhonler Smith

Asesor:

Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly

Fecha de sustentación: 03/03/2026

LAMBAYEQUE – PERÚ

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Diseño de un sistema de control y supervisión con industria
4.0 para un molino de cal en una minera en Ica

Autor:



Bach. Ramirez Cortez Angel Junior



Bach. Cabanillas Reaño Jhonler Smith

Asesor:



Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly

LAMBAYEQUE - PERÚ

2026

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño de un sistema de control y supervisión con industria
4.0 para un molino de cal en una minera en Ica**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

Sustentado y aprobado ante los siguientes miembros del jurado:



Dr. Ing. Frank Richard Rodriguez Chirinos.
Presidente



Dr. Ing Sandra Lisette Aznarán Guevara
Secretario



Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
Vocal

Lambayeque-Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria – Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCION DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 26.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 7:30 am del día 03 de Marzo del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y SUPERVISIÓN CON INDUSTRIA 4.0 PARA UN MOLINO DE CAL EN UNA MINERA EN ICA

Designados por Resolución N° 736 - 2025 D/FACFyM de fecha 13 de Agosto de 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<u>DR. ING. FRANK RICHARD RODRIGUEZ CHIRINOS</u>	Presidente
<u>DRA. ING. SANDRA LISETTE AZNARAN GUEVARA</u>	Secretario
<u>HG. ING. MARTIN AUGUSTO NOMBREA LOSSIO</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) HG. ING. OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ nombrado por Resolución N° 736 - 2025 D/FACFyM de fecha 13 de Agosto de 2025


El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 164 - 2026 D/FACFyM de fecha 26 de Febrero de 2026.

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): RAMIREZ CORTEZ ANGEL JUNIOR Y CRANILLAS RIAZO JHONLER SHITH y tuvo una duración de 40 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de DIECIOCHO (18) en la escala vigesimal, mención (MUY BUENO).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de INGENIERO ELECTRONICO, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 8:45 am se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.


DR. ING. FRANK RICHARD RODRIGUEZ CHIRINOS
 Presidente


DRA. ING. SANDRA LISETTE AZNARAN GUEVARA
 Secretario


HG. ING. MARTIN AUGUSTO NOMBREA LOSSIO
 Vocal


DR. ING. OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ
 Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **Romero Cortez Oscar Uchelly** usuario revisor de:

Tesis

Trabajo de Suficiencia Profesional

Trabajo Académico

Titulado **Diseño de un sistema de control y supervisión con industria 4.0 para un molino de cal en una minera en Ica**

Cuyo(s) autor(es) es(son):

Cabanillas Reaño Jhonler Smith DNI° **73822363**

Ramirez Cortez Angel Junior DNI° **73007964**,

declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud 5%, verificables en el Resumen del Reporte Automatizado de similitudes que se acompaña.

El(La/Los/Las) suscrito(a/s/as) analizó y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 06 de Marzo del 2026



Nombres y Apellidos: Oscar Uchelly Romero Cortez

DNI°: 41812294

ASESOR

Defina la modalidad con [X]

Adjuntar

- *Reporte Automatizado de similitudes*
- *Recibo Digital*

Diseño de un sistema de control y supervisión con industria 4.0 para un molino de cal en una minera en Ica

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

1%

2

renati.sunedu.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

3

repositorio.ulp.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

4

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

5

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1%

6

repositorio.unsaac.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

8

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1%

9

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

10

polodelconocimiento.com

Fuente de Internet

<1%

11

1library.co

Fuente de Internet

<1%

Nombres y Apellidos: Oscar Uchelly Romero Cortez

DNI: 41812294
ASESOR

12	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	journal.uvm.edu.ve Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1 %
16	dialnet.unirioja.es Fuente de Internet	<1 %
17	ptdocz.com Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1 %
19	superior.ipl.edu.do Fuente de Internet	<1 %
20	Submitted to Universidad de Deusto Trabajo del estudiante	<1 %
21	repositorio.udch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.uts.edu.co:8080 Fuente de Internet	<1 %
23	www.mapfre.com Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD Trabajo del estudiante	<1 %
25	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

26	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	Acha, Mario Zoser Mena. "Diseno De Un Sistema De Control Predictivo Generalizado Multivariable Para El Control De Siete Niveles De Pulpa De Un Banco De Celdas De Flotacion De Minerales De Cobre De Una Planta De Procesamiento De Minerales.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
28	Submitted to Universidad Abierta para Adultos Trabajo del estudiante	<1 %
29	repositorio.unapiquitos.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
31	repositorio.unife.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	www.nedcc.org Fuente de Internet	<1 %
34	betalarm.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

Nombres y Apellidos:  Oscar Uchelly Romero Cortez

DNI: 41812294
ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Ángel Junior Ramírez Cortez
Título del ejercicio:	Tesis EPIE Pre-Grado 2025
Título de la entrega:	Diseño de un sistema de control y supervisión con industria 4...
Nombre del archivo:	INFORME_FINAL_-_CABANILLAS_Y_RAMIREZ.docx
Tamaño del archivo:	14.97M
Total páginas:	102
Total de palabras:	18,934
Total de caracteres:	107,922
Fecha de entrega:	22-dic-2025 11:58a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2850668098



DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, ante todo, a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para lograr superar todos los obstáculos que se presentaron a lo largo de mi formación profesional.

A mis padres, Walter y Yesenia, por su gran apoyo, esfuerzo y valores inculcados, los cuales han sido fundamentales para alcanzar esta meta. Especialmente a mi abuela Eusebia, por su cariño, comprensión y motivación durante todo este proceso, siendo un pilar importante en cada etapa de mi vida y desarrollo profesional.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de una u otra manera, apoyaron y contribuyeron a que este objetivo se haga realidad.

*Bach. Ramirez Cortez Angel Junior
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026*

Dedico la presente tesis a mis padres Santos y Esther, por su amor incondicional, apoyo permanente y esfuerzo incansable. Gracias por los valores que me han inculcado, por su confianza y por acompañarme con paciencia y sacrificio durante todo este proceso académico. Este logro es también fruto de su dedicación.

A mis abuelos que hoy descansan en el cielo, cuyo ejemplo de vida, enseñanzas y recuerdos permanecen presentes y siguen siendo una fuente de inspiración y motivación constante.

Finalmente a mis hermanas, sobrinos y a toda mi familia en general por su comprensión, respaldo moral y palabras de aliento en los momentos más exigentes de esta etapa, siendo un pilar fundamental para la culminación de este trabajo.

*Bach. Cabanillas Reaño Jhonler Smith
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026*

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad, Facultad y especialmente a la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, por brindarme los conocimientos y herramientas necesarias para mi formación profesional.

De manera especial, agradezco a mi asesor, por su orientación durante el desarrollo del presente trabajo, agradezco sus valiosas recomendaciones que permitieron mejorar la calidad de esta investigación.

Agradezco también a los docentes, compañeros y amigos por aportar conocimientos, sugerencias y apoyo moral durante el desarrollo de esta tesis.

*Bach. Ramirez Cortez Angel Junior
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026*

Agradezco a la Universidad, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica por haberme brindado la oportunidad de formarme académica y profesionalmente.

A mi asesor por su guía constante y disposición para orientarnos a lo largo de todo el procedimiento de investigación, así como por sus valiosos aportes que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

A mis docentes, por compartir sus conocimientos, experiencia y vocación de enseñanza, los cuales han sido fundamentales en mi formación universitaria.

Finalmente a mis compañeros de la universidad por todo el apoyo mutuo que nos brindamos, el compañerismo y el trabajo en equipo durante todas las etapas, así como por los aprendizajes y experiencias compartidas.

*Bach. Cabanillas Reaño Jhonler Smith
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Situación Problemática	12
1.2. Formulación del Problema de Investigación.....	13
1.3. Hipótesis	13
1.4. Objetivos	13
II. DISEÑO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes	14
2.2. Bases Teóricas	18
2.2.1. Control y Automatización.....	18
2.2.2. Instrumentación Industrial	20
2.2.3. Industria 4.0	21
2.2.4. Software para Sistemas Industriales de Gestión.....	22
2.2.5. Sistemas en Nube.....	23
2.2.6. Control PID.....	23
2.2.7. Protocolo MQTT Y OPC UA.....	24
2.2.8. Molinos industriales y dosificación de cal.....	25
2.3. Bases conceptuales.....	27
III. DISEÑO METODOLÓGICO	28
3.1. Procedimiento de la investigación	28
3.2. Población y Muestra	28
3.2.1. Población	28
3.2.2. Muestra	29
3.3. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales.....	29

IV. RESULTADOS	30
4.1. Diagnosticar el proceso actual de operación manual del molino de cal con el fin de identificar los requerimientos de automatización	30
4.2. Diseñar la lógica de control necesaria para la supervisión y operación en tiempo real, utilizando una interfaz HMI.....	33
4.2.1. Arquitectura general del sistema	33
4.2.2. Objetivos de la lógica de control	34
4.2.3. Estructura del programa en TIA Portal.....	34
4.3. Implementar un control PID en un entorno simulado, para regular la dosificación de cal en función de la concentración de sólidos.....	49
4.3.1. Determinación Experimental de Parámetros	49
4.3.2. Sintonización del Controlador PID (Método de Cohen-Coon)50	
4.4. Configurar un sistema SCADA virtual que permita la supervisión remota del proceso a través de la nube.....	55
4.5. Validar el funcionamiento del sistema automatizado propuesto mediante pruebas en un entorno simulado	74
V. DISCUSIÓN.....	84
VI. CONCLUSIONES	86
VII.	
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88
ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	27
Tabla 2. Requerimientos de la automatización	31
Tabla 3. Sensores de medición elegidos para el sistema.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista de frente y posterior del tablero actual.....	30
Figura 2. Parte interna del tablero y vista general del molino	32
Figura 3. Selección de PLC y módulos necesarios	34
Figura 4. Configuración de comunicación entre el HMI y PLC.....	35
Figura 5. Creación de bloques	36
Figura 6. Lectura de señales analógicas y activación de alertas	37
Figura 7. Lectura de señales	38
Figura 8. Condiciones para la presión de lubricación.....	39
Figura 9. Condiciones para el nivel de lubricación.....	39
Figura 10. Condiciones para la temperatura de rodamiento	40
Figura 11. Condiciones para la temperatura del estator.....	40
Figura 12. Condiciones para la temperatura del chute	41
Figura 13. Condiciones para la vibración del motor principal	42
Figura 14. Condiciones para arranque	42
Figura 15. Encendido y apagado del motor	43
Figura 16. Presión o nivel de lubricación muy alto o bajo	44
Figura 17. Temperaturas altas en estator o rodamiento	44
Figura 18. Sobre corrientes en motores auxiliares.....	45
Figura 19. Pantalla de inicio	46
Figura 20. Diseño del molino	46
Figura 21. Pantalla para el operador	47
Figura 22. Pantalla de encendido y apago de motores.....	48
Figura 23. Configuración inicial.....	52
Figura 24. Algoritmo de Simulación del Controlador PID con Retardo y Filtro Suave	53
Figura 25. Código para la Generación de Gráficas del Proceso Controlado	54
Figura 26. Resultados de la Simulación del Control PID del % de Sólidos en el Molino SAG	54
Figura 27. Conexión OPC.....	55
Figura 28. Creación del proyecto.....	56
Figura 29. Llenado de los aportados.....	56
Figura 30. Sección OPC UA > Device Connections	57

Figura 31. Selección del tipo de PLC	58
Figura 32. Colocación de la IP del PLC	58
Figura 33. Descarga desde Gateway de Ignition	59
Figura 34. Agregar el Tag Browser	60
Figura 35. Creación del folder	61
Figura 36. Agregado del Display	62
Figura 37. Agregar todas las variables.....	62
Figura 38. Dirección de las variables.....	63
Figura 39. Diseño de la pantalla principal del molino desde Ignition	64
Figura 40. Diseño de pantalla de condiciones desde Ignition.....	65
Figura 41. Diseño de pantalla de encendido y apagado de motores auxiliares desde Ignition.....	66
Figura 42. Diseño de la pantalla de alarmas desde Ignition	66
Figura 43. Aplicación Vision Cliente Launcher de Ignition.....	67
Figura 44. Instalación de node-red	68
Figura 45. Incorporación del PLC	68
Figura 46. Incorporación de variables	69
Figura 47. Adición del dispositivo propio	70
Figura 48. Generación de a etiqueta y token	70
Figura 49. Conexión de Ubidots a node-red.....	71
Figura 50. Creación de flujo en node-red	71
Figura 51. Visualización de variables desde los nodos.....	72
Figura 52. Creación del dashboard	73
Figura 53. Incorporación del Widget.....	73
Figura 54. Incorporación de valores referenciales en las variables	74
Figura 55. Temperatura de estatores A, B, C de motor principal	75
Figura 56. Temperatura de rodamiento 1, 2, 3	75
Figura 57. Nivel de tanque de lubricante.....	76
Figura 58. Presión de aceite de lubricación	76
Figura 59. Vibración.....	77
Figura 60. Encendido de motores auxiliares del sistema.....	77
Figura 61. Control de motores	78
Figura 62. Sensores dentro de los rangos	79

Figura 63. Condiciones de arranque	79
Figura 64. Rangos de las variables del molino de cal.....	80
Figura 65. Rangos de las variables de los motores secundarios	80
Figura 66. Advertencias	81
Figura 67. Conexión remota desde el Scada.....	81
Figura 68. Control de motores secundarios	82
Figura 69. Verificación de estado operativo	82
. Figura 70. Visualización desde la PC	83
. Figura 71. Visualización desde el móvil.....	83

RESUMEN

El proyecto tuvo como objetivo diseñar un sistema de control y supervisión basado en la Industria 4.0 para el mejorar el proceso del molino de cal en una minera de Ica. La metodología que se empleó fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo y de nivel explicativo. Los resultados fueron que el diagnóstico evidenció que la operación manual del molino de cal carece de monitoreo en tiempo real y control preciso, generando ineficiencias y riesgos operativos. La automatización propuesta permitió modelar el proceso mediante una planta FOPDT con parámetros $K = 0.5$, $\tau = 15$ s y $L = 3$ s, sobre la cual se implementó un controlador PID sintonizado con $K_p = 13.83$, $K_i = 2.03$ y $K_d = 14.52$, logrando un seguimiento adecuado del setpoint de concentración de sólidos. Finalmente se concluye que la integración de un sistema SCADA con supervisión remota y las pruebas en entorno simulado validaron la correcta lectura de variables críticas, el cumplimiento de las condiciones de arranque y una operación estable y segura del molino.

Palabras clave: Scada, Automatización, Molino, Industria 4.0, Monitoreo

ABSTRACT

The project aimed to design a control and monitoring system based on Industry 4.0 to improve the lime mill process at a mine in Ica, Peru. The methodology employed was applied, quantitative, and explanatory. The results showed that the diagnostic assessment revealed that the manual operation of the lime mill lacked real-time monitoring and precise control, leading to inefficiencies and operational risks. The proposed automation modeled the process using a FOPDT plant with parameters $K = 0.5$, $\tau = 15$ s, and $L = 3$ s. A PID controller tuned to $K_p = 13.83$, $K_i = 2.03$, and $K_d = 14.52$ was implemented on this model, achieving adequate monitoring of the solids concentration setpoint. Finally, it was concluded that the integration of a SCADA system with remote monitoring and testing in a simulated environment validated the correct reading of critical variables, compliance with startup conditions, and stable and safe operation of the mill.

Keywords: SCADA, Automation, Mill, Industry 4.0, Monitoring

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

La minería actual se apoya en procesos de conminución y molienda que permiten liberar minerales de interés a partir del material extraído. Aunque estas operaciones representan un paso clave para la cadena de valor, su impacto en términos de consumo energético y desgaste mecánico no puede pasarse por alto. La presión por mantener altos niveles de producción ha llevado a una dependencia significativa de sistemas que, en muchos casos, siguen funcionando con una eficiencia limitada. Esta situación plantea desafíos técnicos relevantes, tanto para el diseño de soluciones más sostenibles como para la integración de tecnologías que ayuda a gestionar mejor los recursos (Castillo et al., 2024).

La industria minera enfrenta importantes desafíos relacionados con la eficiencia energética y la modernización de sus procesos productivos. En particular, los sistemas de molienda, como los molinos de cal utilizados en plantas mineras, presentan limitaciones significativas cuando se intenta incrementar la producción. Estos equipos, intensivos en consumo energético, muestran una eficiencia operativa baja, ya que menos del 20 % de la energía que utilizan se emplea efectivamente en la fragmentación del material, mientras que lo demás se desperdicia en forma de calor, ruido y vibraciones (Da Cunha y Andrade, 2021). Esta situación no solo impacta negativamente en los costos de operación, sino que también limita la sostenibilidad del proceso en el tiempo.

Bajo este contexto, nace la urgencia de implementar soluciones tecnológicas avanzadas que permitan optimizar el rendimiento de estos equipos. La incorporación de herramientas propias de la Industria 4.0 como sensores inteligentes, sistemas de monitoreo en tiempo real, control automatizado y análisis de datos representa una alternativa viable para mejorar la eficiencia, reducir pérdidas energéticas y facilitar la supervisión remota de los procesos. Sin embargo, muchas plantas mineras, como las ubicadas en la región de Ica, aún no cuentan con sistemas de control y supervisión modernizados, lo que limita su competitividad y flexibilidad a las exigencias de un ámbito industrial progresivamente digitalizado.

Actualmente, en el área 550 de la empresa minera ubicada en Ica se cuenta con un molino de bolas de cal que opera mediante un sistema de control manual basado en contactores, sensores convencionales y la intervención directa del operario. Este tipo de

control limita la eficiencia del proceso, genera riesgos operativos y dificulta la recolección de información en tiempo real, lo que impide una toma de decisiones oportuna y precisa.

La falta de automatización y supervisión remota restringe el potencial productivo del molino, afectando directamente la calidad, continuidad y seguridad del proceso. Por esta razón se propuso realizar un diseño de un sistema moderno de control y supervisión bajo los estándares de la Industria 4.0, que permita monitorear, controlar y optimizar el funcionamiento del molino de manera remota, eficiente y segura, contribuyendo así al mejor desempeño operativo y al incremento de la producción.

1.2. Formulación del Problema de Investigación

¿Cómo diseñar un sistema de control y supervisión con industria 4.0 para un molino de cal en una minera en Ica?

1.3. Hipótesis

Mediante el diseño de un sistema de control y supervisión con industria 4.0 se podrá mejorar el desempeño operativo e incrementar la eficiencia del proceso del molino de cal.

1.4. Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de control y supervisión basado en la Industria 4.0 para el mejorar el proceso del molino de cal en una minera de Ica.

Objetivos Específicos:

- Diagnosticar el proceso actual de operación manual del molino de cal con el fin de identificar los requerimientos de automatización.
- Diseñar la lógica de control necesaria para la supervisión y operación en tiempo real, utilizando una interfaz HMI.
- Implementar un control PID en un entorno simulado, para regular la dosificación de cal en función de la concentración de sólidos.
- Configurar un sistema SCADA virtual que permita la supervisión remota del proceso a través de la nube.
- Validar el funcionamiento del sistema automatizado propuesto mediante pruebas en un entorno simulado.

II. DISEÑO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

A nivel internacional se encuentran Yantalema y Mayorga (2025) En su estudio donde la cal es clave en diversas industrias, pero la alta demanda de cal supera su oferta, generando un déficit. Su producción, presente en sectores como construcción, metalurgia, agricultura y química, implica riesgos laborales considerables. Este estudio se enfocó en gestionar dichos riesgos en la Asociación Cantera Shobol Central mediante un enfoque transversal, no experimental y descriptivo. Se trabajó con seis operarios de una planta de producción de cal, aplicando métodos cuantitativos y cualitativos para analizar e identificar los riesgos y proponer medidas de control. Entre los principales peligros detectados están las altas temperaturas, la exposición a polvo, atrapamiento en maquinaria y el sobreesfuerzo físico. Los resultados indicaron que el 50 % de los riesgos son importantes, el 35,75 % moderados y el 14,29 % aceptables. Se recomienda implementar EPP, ventilación localizada, capacitación y rotación de tareas para maximizar la seguridad, salud y eficiencia del proceso, promoviendo la sostenibilidad de la producción.

Castrillón y Zapata (2024) en su estudio sobre Industria 4.0 donde busca implementarse en las pymes del sector textil-confección en Itagüí, con el propósito de identificar de qué manera estas tecnologías pueden incrementar la eficiencia y competitividad empresarial. Se utilizó un enfoque metodológico mixto, que integró herramientas cuantitativas y cualitativas, tales como encuestas y entrevistas a expertos, para evaluar el nivel actual de adopción tecnológica y proponer un plan estratégico de implementación. Los hallazgos revelan que, a pesar del interés de las empresas en incorporar tecnologías de la Industria 4.0, existen barreras importantes como la escasez de recursos financieros, limitaciones en conocimientos técnicos y resistencia al cambio. Para evidenciar los beneficios de estas tecnologías, se desarrolló una simulación que demuestra su impacto positivo en el desempeño operativo. Finalmente, se sugieren estrategias concretas orientadas a superar estos desafíos, con el fin de fortalecer la eficiencia interna y mejorar la posición competitiva de estas pymes en el mercado.

Anshari y Hamdan (2022) en su investigación que busca desarrollar habilidades clave en las personas, brindando ventajas competitivas y asegurando la supervivencia organizacional Industrial. El objetivo del artículo es identificar competencias esenciales que permitan a los individuos mantener la competitividad e innovación ante los desafíos

actuales. La metodología combinó entrevistas grupales para explorar cómo la GC impulsa nuevas capacidades, con un análisis bibliográfico de más de una década de publicaciones académicas y sectoriales. Además, se destacan tendencias emergentes poco exploradas que requieren atención, como la brecha de habilidades en GC e Industria 4.0, el tecnoestrés, la interacción humano-máquina, la fluidez digital y la evolución de competencias. Estas áreas representan desafíos clave para la investigación futura y la formación profesional adaptada al entorno tecnológico cambiante.

López (2021) el principal objetivo en su investigación fue la implementación de un sistema de supervisión en una Mina. Se recopiló información relevante que permitió diseñar un sistema conforme a los parámetros de funcionamiento establecidos. Para su desarrollo, se incorporaron sensores fotoeléctricos, controladores y comunicación con la red, gestionable mediante una interfaz gráfica. La correcta ubicación de los sensores fue fundamental para garantizar la captación adecuada de luz, la cual es enviada al sistema para su procesamiento. Todos los componentes, incluyendo el cableado, fueron organizados en un tablero de control que permite reconocer fácilmente cada elemento. El sistema opera en tiempo real con datos analógicos procesados por los controladores, los cuales reflejan los cambios en la interfaz. Se logró una eficiencia del 100 % en la transmisión de datos, concluyéndose que su implementación mejora significativamente la supervisión y, contribuiría a la seguridad y apoyo del personal de mantenimiento.

Sánchez y López (2020) en su estudio se enfocó en examinar la implementación de tecnologías limpias como estrategia para impulsar la mejora continua de la gestión ambiental en la minería de sal en el departamento de La Guajira, Colombia. La investigación se realizó bajo un enfoque explicativo, con un diseño mixto, no experimental, de corte transversal y aplicado en el sector. La población incluyó a las empresas dedicadas a la explotación, producción y aprovechamiento de sal en dicha región, siendo la muestra tres compañías específicas: Procesadora Indusalca S.A.S., Big Group Salinas S.A.S. y Molinos Sales La Ye. Los resultados obtenidos abordan aspectos como las necesidades tecnológicas en materia ambiental, el monitoreo de tecnologías limpias, los impactos ambientales asociados a la actividad minera, las herramientas de gestión ambiental existentes y los lineamientos propuestos para incorporar tecnologías limpias en este sector. Se concluye que las empresas del rubro deben modificar sus procesos productivos, mejorar los sistemas de control y optimizar las prácticas operativas, con el fin de mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción de sal.

Basabe y Valecillos (2020) su propósito de su investigación fue desarrollar un sistema de gestión óptimo en el área de hornos de la empresa “Inversiones y Creaciones Pierantozzi C.A.”. La metodología empleada corresponde a un proyecto de tipo descriptivo con diseño de campo, el cual se enfoca en realidades concretas y se caracteriza por ofrecer una interpretación precisa sin modificar las variables, lo que respalda su factibilidad y relevancia para cumplir los objetivos establecidos y darle solución el problema identificado. La muestra estuvo compuesta por 24 trabajadores del área de hornos y 4 maquinarias seleccionadas como objetos de estudio. Como herramientas metodológicas se utilizó la Norma Venezolana COVENIN 2500-93, además de entrevistas no estructuradas y observación directa. Los resultados permitieron diagnosticar el estado operativo de los equipos y los tipos de fallas recurrentes, evidenciando la ausencia de registros históricos. Con base en esta información se formuló la propuesta de mejora correspondiente.

A nivel nacional Sánchez y Benavides (2021) en su investigación que tiene como objetivo principal de este proyecto fue diseñar e implementar un sistema automático para controlar de descarga de underflow en un modo experimental de espesador de relaves, con el propósito de eliminar los desbordes de lodos en superficie como el depósito excesivo de sólidos en el cono de salida de una nueva línea concentradora que pertenece a una reconocida unidad minera del país. Este sistema automatizado regula la descarga de underflow en función de los niveles mínimo y máximo de la cama de lodo (10% y 90%) y de la densidad de sólidos en las tuberías de salida (30% y 64%). El sistema tiene la capacidad de decidir si el underflow debe recircularse al tanque distribuidor para extraer más agua o enviarse a la presa de relaves para su disposición final. En las pruebas, el sistema impidió el arranque de las bombas cuando el nivel fue inferior al 10%, manteniendo la recirculación. Al superar el nivel máximo, el sistema cambió correctamente al estado de disposición final. Asimismo, se validó que el sistema mantiene la recirculación mientras la densidad de sólidos no supere el 64%, y cambia a disposición final cuando se alcanza o supera ese valor.

Infantes (2021) en su estudio tiene como propósito resolver dificultades operativas en un entorno hostil mediante la selección correcta de componentes, sensores y actuadores, con el objetivo de minimizar desbordes, pérdida de material y contaminación ambiental. Para las pruebas, se construyó un prototipo que replicó el funcionamiento de un sistema real sin modificar los silos originales. La investigación comenzó el

reconocimiento del problema y la verificación de antecedentes, lo que permitió definir objetivos y alcances. Luego, se recopiló la bibliografía necesaria para diseñar conceptualmente el sistema y seleccionar los componentes adecuados para su control y supervisión. Una vez definidos, se implementó el sistema físico y se obtuvieron los datos requeridos para elaborar la función de transferencia (FT) y diseñar el sistema de control. Finalmente, se validaron los resultados mediante el desarrollo del sistema de supervisión y control, dejándolo apto para su futura instalación en un entorno real, con mínimos ajustes necesarios.

Morante y Paucar (2020) Se plantea la propuesta de implementar un sistema de control particular en una empresa minera que se dedica a la extracción de cal, con el propósito de identificar los beneficios que este puede generar, así como la optimización en la gestión operativa. Se resalta la importancia del control particular como herramienta clave para alcanzar los objetivos empresariales y disminuir los riesgos a los que la organización está vulnerable. Para esta implementación, se utilizó como marco conceptual el enfoque COSO 2013, que se estructura en torno a tres objetivos esenciales: generación de información confiable, eficiencia operativa y cumplimiento normativo. Este modelo incluye cinco componentes esenciales: entorno de control, evaluación de riesgos, actividades de control, información y comunicación, y actividades de supervisión, desarrollados a través de diecisiete principios. La adopción de este sistema resulta esencial para fortalecer la gestión operativa y, en consecuencia, incrementar la rentabilidad de la empresa minera.

Zegarra (2021) proponen poner en marcha un sistema de control en una empresa minera que saca cal, para ver qué beneficios puede traer y cómo puede mejorar positivamente la forma en que manejan sus operaciones. Destacan que el control interno es un instrumento clave para alcanzar lo que la empresa se propone y reducir los riesgos a los que está expuesta. Para implementar esto, usaron como base el enfoque COSO 2013, que se organiza alrededor de tres objetivos principales: generar información confiable, ser eficientes en las operaciones y cumplir con las normas. Este modelo tiene cinco partes importantes: ambiente de control, evaluación de riesgos, actividades de control, información y comunicación, y actividades de supervisión, desarrolladas a través de diecisiete principios. Adoptar este sistema es esencial para fortalecer cómo manejan las operaciones y, como resultado, aumentar las ganancias de la empresa minera.

Quiroz (2024) se propuso diseñar una e mejora en el mantenimiento del área de trituración para que hubiera más equipos disponibles en una planta procesadora de cobre. Con un enfoque cuantitativo y descriptivo, el estudio mostró, usando indicadores, que las fallas en las fuentes de alimentación y descarga causan paradas inesperadas, afectando la confiabilidad y productividad de los equipos. Para solucionar esto, planteó optimizar el mantenimiento preventivo, correctivo y especializado, usando el indicador OEE (Efectividad General de Equipos) para evitar interrupciones no planificadas. La propuesta permitió equipos estén más disponibles, de un 94.65 % a 98.71 %. Además, el análisis de si era viable económicamente dio resultados favorables, con un Valor Actual Neto (VAN) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23.13 % superior a la tasa de descuento y un índice beneficio/costo (B/C) de 1.64, lo que indica una rentabilidad de 0.64 centavos por cada dólar invertido.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Control y Automatización

La automatización industrial es básicamente usar sistemas de control como computadoras, autómatas programables, robots y tecnología para manejar los procesos de producción y hacer funcionar las máquinas de las fábricas, para que los humanos tengan que intervenir lo menos posible y para reemplazar trabajos peligrosos con operaciones automáticas. Esta práctica es como una evolución de la mecanización, pero usando equipos con mucha capacidad de control para hacer procesos más eficientes (Anshari y Hamdan, 2022). Con los avances rápidos de la tecnología y el nacimiento de la Industria 4.0, los sistemas industriales han cambiado la forma de producir, dándole prioridad al control por computadora para mejorar la precisión, calidad y eficiencia de la producción. Este artículo se enfoca en examinar a fondo los componentes de los sistemas de automatización de procesos, los tipos más comunes y qué tan importantes son tanto en empresas que fabrican cosas como en las de servicios.

Automatización viene del griego: "auto" (por sí mismo) y "matos" (movimiento), y se refiere a cualquier sistema que funciona solo. Comparados con los métodos manuales, los sistemas automatizados son más precisos, rápidos y potentes. Estos controlan varias variables del proceso como temperatura, flujo, presión y niveles, usando microprocesadores y controladores que recolectan, procesan y supervisan datos. Además, usan hardware y software especializados, con una oferta cada vez mayor de diferentes

proveedores (Goger y Bisenberger, 2018). La automatización industrial opera a través de una estructura jerárquica que organiza sus funciones en tres niveles principales. Esta división permite entender mejor cómo interactúan los distintos componentes de un sistema automatizado (Bílková et al., 2018).

Nivel supervisor: Es el nivel superior y está compuesto por una computadora industrial (PC, panel de control o montaje en rack) equipada con un sistema operativo estándar y software especializado que permite supervisar, visualizar y configurar parámetros del proceso. La comunicación se realiza a través de redes industriales como Ethernet o WLAN (Choque, 2023).

Nivel de control: En este nivel intermedio se ejecutan los programas de automatización, generalmente mediante controladores lógicos programables (PLC). Estos dispositivos, basados en microcontroladores de 16 o 32 bits, operan en tiempo real y se conectan a múltiples entradas y salidas, además de comunicarse mediante protocolos industriales diversos (Frank et al., 2019).

Nivel de campo: Aquí se están los sensores (de presión, temperatura, ópticos, etc.) y actuadores (motores, válvulas, interruptores, entre otros), que se comunican con los PLC a través de buses de campo. Esta conexión, que puede ser cableada o inalámbrica, también permite diagnosticar y configurar los componentes (Frank et al., 2019).

Además, el sistema necesita fuentes de alimentación adaptadas a cada nivel (por ejemplo, PLC a 24V DC, motores a corriente alterna) y medidas de seguridad para proteger el software y evitar alteraciones no autorizadas. Así, un sistema básico de automatización industrial incluye estos tres niveles, junto con infraestructura energética y protocolos de protección adecuados (Frank et al., 2019).

Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA)

El sistema SCADA es una aplicación utilizada para recolectar información operativa de un proceso con el objetivo de supervisar y optimizar su funcionamiento. Este tipo de sistema se implementa en procesos industriales como la destilación petroquímica, la purificación de agua o la operación de compresores en redes de tuberías (Fobiri et al., 2022). En la actualidad, las organizaciones buscan mejorar el rendimiento de sus activos mediante una gestión operativa eficiente. Superar a la competencia implica adoptar métodos de trabajo más ágiles y efectivos (Fobiri et al., 2022).

Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC o autómatas programables, es un componente esencial en los sistemas de automatización. Permite gestionar distintos dispositivos y modificar los procesos de forma sencilla. Está construido para operar con múltiples entradas y salidas, y está diseñado para resistir condiciones ambientales adversas como altas temperaturas, vibraciones e impactos (Díaz y Llauce, 2023).

Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La HMI es básicamente lo que conecta al operador con el sistema automático. Está hecha de equipos electrónicos que te dejan ver cómo están las máquinas y controlarlas. Estas interfaces pueden ser desde unas simples luces que se prenden y se apagan hasta pantallas táctiles bien nítidas, lo que hace que sea más fácil trabajar con el sistema (Díaz y Llauce, 2023) (Díaz y Llauce, 2023).

Sistema de Control Distribuido (DCS)

El DCS se usa mucho en procesos industriales complicados y está formado por varios controladores repartidos por todo el sistema. Se usa bastante en plantas de energía, redes de semáforos, sistemas para tratar agua, ambientes controlados, refinerías, industrias químicas y farmacéuticas, barcos cisterna y redes de sensores, porque puede manejar procesos de manera descentralizada (Bushuyev et al., 2021).

2.2.2. Instrumentación Industrial

La instrumentación en el ámbito industrial se refiere al conjunto de métodos y herramientas empleadas para evaluar y regular diversas variables en los procesos de producción. Estas variables son gestionadas mediante diversos instrumentos específicos del entorno industrial (Fatimah et al., 2020). Para ejercer un control efectivo sobre cualquier variable, es indispensable realizar primero su medición. Una vez obtenida dicha medición, los datos se transmiten con el propósito de visualizar, analizar o controlar, ya sea de forma manual o automática (Ejsmont et al., 2020).

En los sistemas de control automatizados, la regulación de la variable medida se logra mediante una señal producida por la unidad central de procesamiento (CPU), la cual se envía a los actuadores correspondientes (Dantas et al., 2021). En la práctica, los sensores capturan datos del entorno como flujo, presión, vibraciones, desplazamiento, entre otros y los envían a los sistemas encargados de regular esas variables.

En el ámbito industrial, estas tareas de control son ejecutadas comúnmente por autómatas programables (PLC) o sistemas de control distribuidos (DCS) (Broccardo

et al., 2023). La instrumentación industrial es básicamente una materia que junta la ciencia de medir cosas con el control de sistemas automáticos. Se usa en muchos lugares, desde las fábricas hasta cosas que se usan todos los días, como el control de motores de los carros, los termostatos de las casas, el piloto automático, cuando hacen medicinas, las plantas de electricidad, las refinerías de petróleo y gas, y muchas otras cosas (Castrillón & Zapata, 2024).

Después de la medición, se genera una señal representativa del valor obtenido, la cual es enviada a un sistema PLC o DCS. A partir de allí, puede ejecutarse una acción de control ya sea de manera automática o por intervención humana (Infantes, 2021). Cuando el control es automático, el PLC o DCS emite una señal hacia un actuador, como podría ser una válvula, un motor o un calentador eléctrico, y este modifica la variable medida (Infantes, 2021). Estos elementos de control están conectados a los sensores a través de un sistema físico conocido como "proceso" (Infantes, 2021).

En la actualidad, muchas plantas industriales están altamente automatizadas para mejorar la eficiencia operativa. Bajo este contexto, se emplean microcontroladores y microprocesadores para tareas de conmutación y control programado. Por ejemplo, diversos sistemas embebidos permiten la automatización del uso energético dentro de las instalaciones industriales (Mena, 2020).

2.2.3. *Industria 4.0*

La Industria 4.0 implica la integración de tecnologías digitales de vanguardia en la producción y los procedimientos industriales. Este cambio abarca la implementación de Internet de las Cosas en el ámbito industrial, inteligencia artificial, procesamiento de grandes volúmenes de datos, automatización robótica y sistemas operativos automáticos.(Anumbe et al., 2022). El objetivo principal de esta revolución es lograr una producción más inteligente, flexible y eficiente, facilitando además decisiones más acertadas y una mayor personalización en toda la cadena de suministro (J. Sánchez & Benavides, 2021).

El concepto de Industria 4.0 está directamente relacionado con el término “Cuarta Revolución Industrial”, que representa una nueva etapa de cambio radical en la forma de producir y operar, siguiendo una línea de evolución tecnológica iniciada en el siglo XIX (Chen et al., 2019). La primera revolución industrial se inició a comienzos del siglo XIX con la creación de la máquina de vapor, lo que facilitó el reemplazo del esfuerzo humano

y animal por equipos mecánicos, señalando el comienzo de la industrialización contemporánea. (Allegrí et al., 2022).

Un siglo después inicio la Segunda Revolución industrial, la introducción de la electricidad y el petróleo posibilitó el uso de maquinaria más ligera. Este periodo fue impulsado por la producción en cantidad y las líneas de ensamblaje, técnicas que siguen vigentes en muchos procesos actuales (Burnes, 2005).

Tercera Revolución Industrial

A mediados del siglo XX se da origen la Tercera Revolución Industrial, la llegada de las computadoras trajo consigo el inicio de la automatización en las fábricas y el uso de robótica básica. Además, surgieron los primeros sistemas informáticos empresariales, destinados a gestionar y procesar datos (Javaid et al., 2022). En la actualidad la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0), la industria se encuentra inmersa en una revolución basada en la información. Se generan y procesan enormes volúmenes de datos en tiempo real, lo que permite a las organizaciones operar de manera más inteligente. En esta etapa, la inteligencia artificial se convierte en un elemento central, ya que posibilita no solo recopilar datos, sino también analizarlos, anticiparse a eventos, comprender patrones complejos y tomar decisiones basadas en datos.

2.2.4. Software para Sistemas Industriales de Gestión

Hoy en día, las fábricas necesitan herramientas digitales más avanzadas que les ayuden a juntar, automatizar y mejorar todo lo que hacen. Entre estas herramientas, se destacan programas especiales como los entornos de ingeniería y las plataformas en la nube, que permiten manejar todas las operaciones de la fábrica desde un solo lugar, de manera eficiente y que se pueda crecer fácilmente (Kwan & Alegre, 2024).

El TIA Portal es un programa que hizo Siemens para integrar completamente toda la automatización de una fábrica. Este entorno unificado hace más fácil diseñar, programar y configurar equipos como PLCs, HMIs, redes industriales y sistemas de control, todo desde una sola pantalla. Como está hecho de manera intuitiva, los ingenieros pueden reducir muchísimo el tiempo que se tardan en desarrollar proyectos, hacer que los procesos se entiendan mejor y que todo el sistema funcione más productivo (Hui & McLaughlin, 2018). Entre sus características más destacadas se encuentran:

- Programación centralizada de dispositivos Siemens.
- Diagnóstico eficiente de errores y simulación de procesos.
- Integración fluida de hardware, software y redes de comunicación.

2.2.5. *Sistemas en Nube*

Los servicios en la nube han transformado la forma en que se administran los recursos industriales. Con esta innovación, se puede guardar, procesar y acceder a información de forma remota, en tiempo real y desde cualquier ubicación. Esto facilita una vigilancia continua, mantenimiento anticipado, análisis exhaustivos de datos y una capacidad de expansión casi infinita. (Ortiz Clavijo et al., 2018). En el contexto industrial, la nube permite:

- Integración de sensores y dispositivos IoT para monitoreo continuo.
- Reducción de costos en infraestructura física.
- Respaldo y recuperación de datos de manera segura.
- Colaboración entre diferentes departamentos y plantas.

2.2.6. *Control PID*

Carpio y Garcés (2025) nos explican que controlar la temperatura en las fábricas es súper importante para que los productos salgan bien y todo funcione como debe ser. Desde que se inventó en los años 1920, el controlador PID (que significa Proporcional-Integral-Derivativo) se volvió el método más usado en la industria para controlar cosas. La gente lo usa mucho porque es sencillo, fácil de poner en marcha y se puede usar para muchas cosas diferentes. Pero tiene sus problemas: cuando los sistemas son muy complicados o cuando las condiciones cambian de repente, no funciona tan bien, y por eso hay que estar ajustándolo todo el tiempo para que siga funcionando bien. El controlador PID es una forma de controlar las máquinas que funciona en círculo cerrado, o sea que siempre está checando la diferencia entre lo que se quiere que pase y lo que realmente está pasando, y según eso ajusta las cosas (Quiroga, 2025). Su formulación general se define como:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

- **e(t)**: Representa el error en el instante t.
- **u(t)**: Corresponde a la señal de control generada por el PID.
- **K_p**: Ganancia proporcional.
- **K_i**: Ganancia integral.
- **K_d**: Ganancia derivativa.

La ganancia proporcional (K_p) define la intensidad con la que el sistema responde ante un error. Un valor elevado de K_p provoca una corrección más rápida, aunque puede ocasionar oscilaciones. La ganancia integral (K_i) se encarga de compensar el error acumulado a lo largo del tiempo, siendo útil para corregir desviaciones persistentes; sin embargo, un ajuste inadecuado puede generar inestabilidad. La ganancia derivativa (K_d) actúa considerando la tasa de variación del error, contribuyendo a disminuir el sobreimpulso y mejorar la estabilidad del control. En esta investigación, el controlador PID fue configurado con valores de $K_p=2.0$, $K_i=0.5$ y $K_d=$, los cuales fueron ajustados de manera empírica para lograr un rendimiento satisfactorio (Angulo et al., 2021).

2.2.7. Protocolo MQTT Y OPC UA

OPC UA (Unified Architecture) es un estándar más nuevo que creó la OPC Foundation. Básicamente es una versión mejorada del OPC tradicional que se usa mucho en las fábricas para que los equipos se puedan comunicar con los PLC (que son como los cerebros que controlan las máquinas). La idea es que OPC UA no solo conecte dispositivos, sino que también ayude a integrar todo a nivel de empresa (Fatimah et al., 2020). Este protocolo funciona como cliente y servidor, donde los clientes pueden conectarse, revisar, leer y escribir información en los equipos de la fábrica. OPC UA maneja toda la comunicación desde la aplicación hasta cómo se transportan los datos, lo que hace que equipos de diferentes marcas puedan trabajar juntos sin problemas (Fatimah et al., 2020). Además, es bastante seguro porque usa mensajes que van en ambas direcciones y están firmados y encriptado. Como OPC UA ya tiene una base fuerte en la industria, es perfecto para tomar datos de sensores y PLC y meterlos en sistemas que ya están funcionando, como los MES (sistemas que manejan la producción) y SCADA (sistemas que supervisan y controlan procesos), donde las tecnologías OPC y OPC UA ya están establecidas. Pero hay un problema: es bastante complicado técnicamente, y esto ha hecho que los equipos de informática no lo quieran mucho. Ellos ven OPC UA como algo más difícil que otros protocolos que normalmente usan (Angulo et al., 2021).

Recientemente, la OPC Foundation ha liberado el código del estándar para facilitar su acceso y fomentar una adopción más amplia. Actualmente, se recomienda utilizar OPC UA para obtener información de sensores y PLC dentro de soluciones MES y SCADA, y mantenerse atento a su progresiva integración en plataformas IoT y entornos de software abierto (Angulo et al., 2021). MQTT (Message Queuing Telemetry

Transport) es un protocolo de comunicación basado en el modelo publicar/suscribir, diseñado especialmente para sistemas SCADA y redes remotas. Se caracteriza por su encabezado mínimo (solo dos bytes) y por ofrecer comunicaciones confiables con una estructura muy sencilla. Al igual que HTTP, la carga útil de MQTT depende de la aplicación y, en la mayoría de los casos (Metayer et al., 2018).

Aunque no alcanza la misma extensión de uso que HTTP, MQTT mantiene una presencia significativa en el ámbito de las TIC, con múltiples implementaciones, proyectos y clientes/productores de código abierto disponibles en diversos lenguajes de programación (Metayer et al., 2018). De hecho, muchas plataformas IoT adoptan HTTP y MQTT como principales protocolos de ingreso de datos. Se recomienda el uso de MQTT en escenarios donde el ancho de banda es limitado y la infraestructura de red no está claramente definida. Es fundamental contar con un gestor MQTT proporcionado por el proveedor para la publicación de datos y asegurar siempre la comunicación mediante TLS (Transport Layer Security).

En caso de que la aplicación final no sea compatible con MQTT, existen herramientas de código abierto que permiten integrar los datos provenientes de MQTT en bases de datos u otros formatos como HTTP. Sin embargo, es importante considerar posibles problemas de interoperabilidad: el hecho de que dos aplicaciones admitan MQTT no garantiza su funcionamiento conjunto, ya que los tópicos y los formatos de mensajes (JSON) podrían requerir ajustes para lograr una comunicación efectiva (Metayer et al., 2018).

2.2.8. Molinos industriales y dosificación de cal

Molinos Industriales

Los molinos industriales son equipos utilizados para disminuir el tamaño de materias sólidas a través de métodos de triturado, molienda o pulverización. Estos dispositivos son fundamentales en múltiples sectores, como el minero, químico, alimentario y de construcción, ya que facilitan la obtención de partículas con tamaños específicos para las siguientes fases de producción. (Dikshit et al., 2024).

Tipos de molinos más utilizados

- **Molinos de bolas:** Usan bolas de acero o cerámica que impactan y muelen el material. Común en minería y producción de cemento.
- **Molinos de martillos:** Trituran mediante martillos giratorios, ideales para materiales frágiles.

- **Molinos de rodillos:** Aplastan el material entre rodillos giratorios, adecuados para molienda fina.
- **Molinos de discos:** Utilizan discos abrasivos para triturar granos y minerales.

Aplicaciones

- Preparación de materias primas para procesos químicos.
- Molienda de minerales metálicos y no metálicos.
- Producción de cemento y cal.

Dosificación de Cal

La cal (óxido de calcio o hidróxido de calcio) se utiliza ampliamente en procesos industriales, principalmente en la industria minera, tratamiento de aguas, siderurgia y producción de cemento (Quintero y Rodríguez, 2020). La dosificación consiste en agregar cal de manera controlada a un proceso para garantizar reacciones químicas eficientes y uniformes.

Importancia de la dosificación:

- Neutralización de ácidos en procesos metalúrgicos.
- Floculación y ajuste del pH en tratamiento de aguas.
- Mejora de la calidad del producto final en la fabricación de cemento y papel.

Sistemas de dosificación empleados

- **Dosificadores volumétricos:** Miden la cantidad de cal según el volumen del material desplazado.
- **Dosificadores gravimétricos:** Controlan la masa de cal agregada, ofreciendo mayor precisión.
- **Sistemas automáticos con control PID:** Permiten ajustar la cantidad de cal en función de variables del proceso (pH, flujo, concentración).

Integración con molinos

Iannacone y Molano (2018) en muchas plantas industriales, la cal se muele previamente en molinos (generalmente de bolas o rodillos) para obtener partículas finas que faciliten su disolución y reacción. Posteriormente, el sistema de dosificación la introduce de forma continua y regulada en el proceso, optimizando el consumo y reduciendo pérdidas.

2.3. Bases conceptuales

En la siguiente tabla se muestra la matriz de operacionalización de variables juntos con sus respectivas dimensiones e indicadores.

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Sistema de control y supervisión (Variable Independiente)	La automatización industrial usa tecnología para controlar procesos, minimizar intervención humana y aumentar eficiencia (Anshari y Hamdan, 2022).	Es la implementación de una arquitectura de automatización que permite el monitoreo y control del proceso del molino de cal mediante un PLC Siemens S7-1200, sensores de temperatura simulados, interfaz HMI y SCADA virtual desarrollado en Node-RED, comunicados a través de protocolo MQTT.	Automatización	Cantidad de variables medidas/controladas
			Supervisión remota	HMI/SCADA
			Comunicación industrial	Ethernet - Protocolo MQTT para el envío de datos
Gestión del Molino de Cal (Variable Dependiente)	La instrumentación industrial permite medir y controlar variables de procesos productivos mediante dispositivos especializados (Fatimah et al., 2020).	Es la operación integral del molino de cal en entorno simulado, evaluando su eficiencia mediante tiempo de funcionamiento sin fallos, capacidad de monitoreo continuo y respuesta ante fallas de sensores. Además, incluye un control automático tipo PID que regula la concentración de sólidos, evaluando su rendimiento mediante la precisión del control y el tiempo de estabilización.	Eficiencia operativa	Tiempo de operación sin fallos
			Monitoreo del proceso	Velocidad de lectura y actualización de variables
			Toma de decisiones	Tiempo de reacción ante eventos o alarma
			Control Automático	Precisión del control de la concentración de sólidos mediante el PID (error respecto al setpoint, tiempo de estabilización)

Nota. Elaboración propia

III. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Procedimiento de la investigación

La metodología adoptada en el presente estudio corresponde a un enfoque cuantitativo, dado que se contempla la recolección y el análisis de datos numéricos con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema de control y supervisión diseñado bajo los principios de la Industria 4.0, aplicado al proceso de un molino de cal en una minera ubicada en Ica. De acuerdo con lo expuesto por Arias y Covinos (2021), este tipo de enfoque se caracteriza por recurrir a mediciones objetivas y técnicas estadísticas, lo que permite identificar patrones, asociaciones y relaciones entre variables, y con ello obtener resultados precisos y susceptibles de generalización.

El tipo de investigación es aplicada, ya que busca la implementación de conocimientos teóricos en un entorno específico con la finalidad de mejorar el proceso productivo mediante un sistema automatizado. Según lo señalado por Hernández y Mendoza (2018), este tipo de investigación se orienta hacia la resolución de problemas concretos mediante la utilización del conocimiento científico, lo que implica una conexión directa entre teoría y práctica. El alcance del estudio es explicativo, en tanto se pretende determinar la influencia de variables específicas sobre el funcionamiento del sistema automatizado, permitiendo así comprender las causas de ciertos comportamientos en el proceso de control y supervisión.

En cuanto al diseño metodológico, se empleará un diseño experimental, de tipo preexperimental, dado que se implementará una intervención —el sistema automatizado— en un entorno controlado para evaluar su efecto sobre determinadas variables del proceso, sin contar con grupos de comparación o control. Este diseño resulta adecuado para validar el funcionamiento del sistema bajo condiciones reales, permitiendo establecer relaciones causales preliminares (Da Cunha y Andrade, 2021).

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

En el presente estudio, la población está conformada por el conjunto total de molinos industriales dedicados al procesamiento de cal en la región Ica. Estos equipos comparten características operativas y estructurales similares, lo que permite considerarlos como una unidad homogénea de análisis desde el punto de vista técnico.

Tal como señalan Arias y Covinos (2021), la población en una investigación se define como el conjunto de elementos que comparten características homogéneas y sobre los cuales se pretende obtener información organizada y pertinente para el estudio.

3.2.2. Muestra

La muestra seleccionada para esta investigación corresponde a un molino de cal específico, ubicado en una unidad minera de la región Ica. Este molino ha sido elegido mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a su accesibilidad y disponibilidad para llevar a cabo la recolección de datos y la implementación del sistema propuesto. Esta técnica de muestreo resulta adecuada cuando se requiere seleccionar unidades muestrales que estén al alcance del investigador, especialmente en estudios de tipo preexperimental, donde se busca intervenir directamente en un entorno real.

3.3. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales

La técnica principal que se usó para evaluar el proceso fue la observación y como herramienta una lista de verificación, que permitió hacer un análisis detallado de las variables que afectan el funcionamiento del molino de cal. Esta técnica consistió en una herramienta para recoger datos, en la cual se definieron una serie de puntos específicos a observar y evaluar en cada etapa del proceso. La lista de verificación se usó para obtener una evaluación precisa y objetiva de las condiciones de operación del molino, con el fin de identificar áreas que se pueden mejorar y evaluar el impacto de las soluciones implementadas. Para hacer las actividades de investigación, usé una computadora portátil con procesador RYZEN 5, 16 GB de memoria RAM y un disco duro sólido (SSD) de 1TB. Esta computadora me permitió hacer las simulaciones y procesar los grandes volúmenes de datos que se generaron durante todo el estudio. La capacidad de guardar archivos y la velocidad del procesador fueron muy importantes para manejar bien la información y poner en práctica las soluciones informáticas que necesitaba para diseñar el sistema de control y supervisión que propuse. Los materiales que usé para analizar e implementar el sistema de control fueron los que tenían que ver con la tecnología de la minera. Esto incluyó componentes electrónicos para conectar sensores y aparatos de control, además de programas especializados para supervisar a distancia y manejar datos. También usé manuales técnicos y documentos de operación del molino de cal, que me dieron información muy útil para hacer un buen diagnóstico y diseñar soluciones de mejora basadas en las tecnologías de Industria 4.0.

IV. RESULTADOS

4.1. Diagnosticar el proceso actual de operación manual del molino de cal con el fin de identificar los requerimientos de automatización.

Actualmente, el molino de cal opera de forma manual, lo que implica una alta dependencia de la intervención del operador. Esta condición conlleva tiempos de respuesta más lentos frente a variaciones del proceso o fallas, además de una mayor probabilidad de errores humanos, desajustes en la dosificación y paradas inesperadas del sistema. La operación se realiza en base a la experiencia del operador, quien debe observar variables como el flujo, la densidad de la lechada y la presión en las líneas para estimar manualmente la cantidad de cal que debe dosificarse. Esto introduce una serie de limitaciones en cuanto a consistencia, trazabilidad y eficiencia del proceso.

Figura 1.

Vista de frente y posterior del tablero actual



Nota. Elaboración propia

Entre las principales deficiencias identificadas se encuentran:

- **Retardos en la corrección del proceso:** Al no existir un sistema de monitoreo y control en tiempo real, las correcciones ante desviaciones o perturbaciones se realizan de forma tardía, afectando la estabilidad del sistema.
- **Dependencia del operador:** La experiencia del operador influye directamente en la eficiencia del proceso, lo cual representa un riesgo en caso de rotación de personal o errores de juicio.
- **Falta de monitoreo de variables críticas:** Actualmente no se monitorean en tiempo real variables fundamentales como la temperatura del motor, la presión y el nivel de aceite, ni las corrientes de las fases del motor eléctrico. La ausencia de este monitoreo impide detectar condiciones anómalas que podrían anticipar fallas graves.
- **Ausencia de un sistema de alarmas inteligente:** Ante una falla el operador no cuenta con un sistema de identificación automatizada de causas. La integración de alarmas mediante el PLC y el HMI permitiría identificar de forma rápida qué variable provocó la condición de falla, agilizando la respuesta y evitando pérdidas operativas.
- **Sobreconsumo de insumos:** La falta de control automatizado puede llevar a una sobredosificación de cal, generando desperdicio de material y aumento de costos operativos.

Tabla 2.

Requerimientos de la automatización

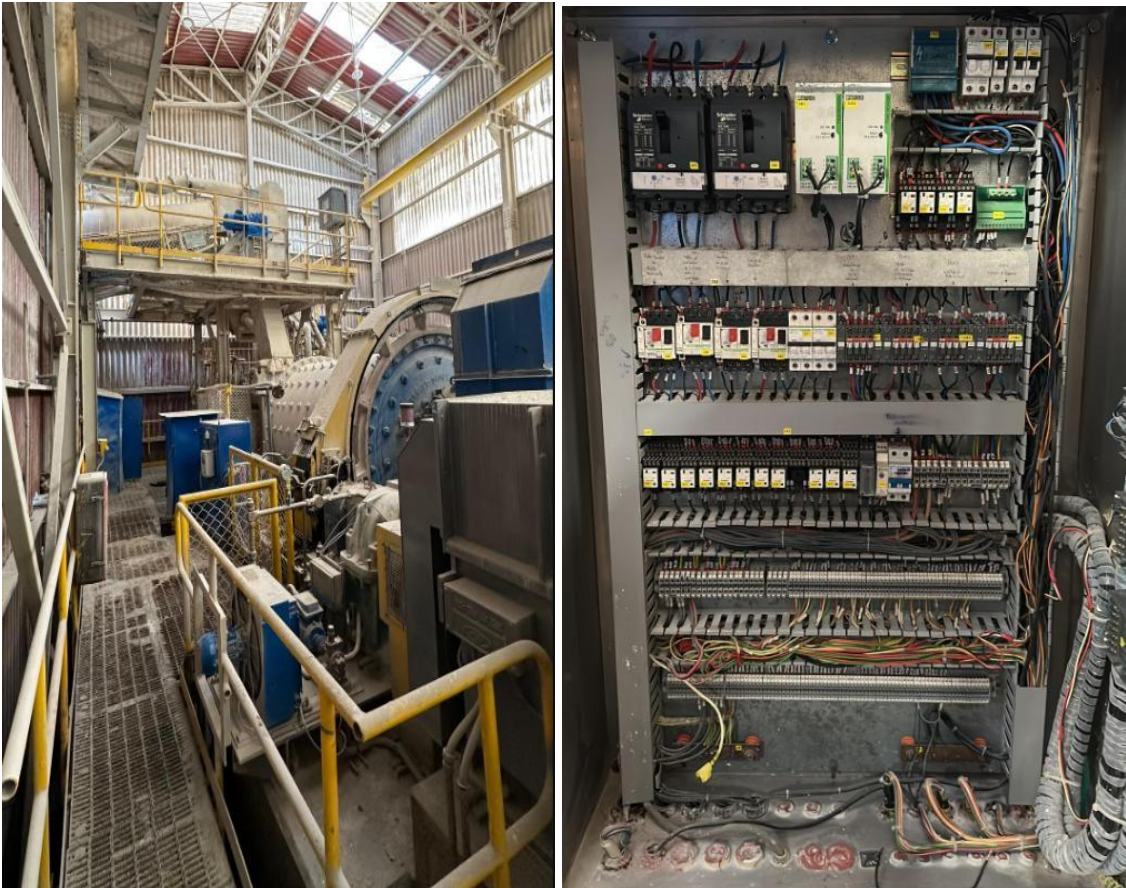
Aspecto	Sistema actual (manual)	Sistema propuesto (automatizado)
Operación	Manual, dependiente del operador	Automática, controlada por PLC
Monitoreo	No existe	HMI y SCADA
Alarmas	No existen	Alarmas en tiempo real
Eficiencia	Baja, con paradas intermitentes	Alta, con reducción de fallos
Acceso	Solo local	Local + remoto (Industria 4.0)

Nota. Elaboración propia

La Figura 2 muestra, a la izquierda, la vista general del molino de la planta industrial, donde se observan sus principales componentes mecánicos y estructurales, como el tambor giratorio, las barandas de seguridad y el entorno de trabajo metálico con pasarelas elevadas. A la derecha, se presenta la parte interna del tablero de control asociado al sistema del molino, evidenciando la disposición ordenada de componentes eléctricos como contactores, relés, breakers y borneras, los cuales permiten la gestión y protección del circuito de potencia y control del equipo. En conjunto, la figura ilustra la relación entre el sistema mecánico del molino y su sistema de control eléctrico, destacando la complejidad y la integración tecnológica necesaria para su operación segura y eficiente.

Figura 2.

Parte interna del tablero y vista general del molino



Nota. Elaboración propia

4.2. Diseñar la lógica de control necesaria para la supervisión y operación en tiempo real, utilizando una interfaz HMI.

El desarrollo de la lógica de control en el PLC corresponde a una etapa clave en el proceso de automatización de la dosificación de cal en el molino, puesto que dicha lógica se encarga de interpretar las señales del proceso, ejecutando algoritmos de control, supervisando condiciones críticas, y enviando comandos de actuación a los dispositivos de campo, siendo procesos que se ejecutan en tiempo real para garantizar una operación más estable, segura y eficiente.

4.2.1. Arquitectura general del sistema

La lógica de control se implementa en un PLC Siemens S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC, Firmware V4.6), que actúa como cerebro del sistema. A través de sus entradas y salidas digitales y analógicas, se conecta a:

- Sensores de temperatura del motor y rodamientos.
- Transmisores de presión y nivel del tanque de aceite.
- Sensores de concentración de sólidos en la salida del molino.
- Sensores de corriente para monitoreo trifásico del motor.
- Actuadores como válvulas neumáticas, contactores y motores vibratorios para dosificación.

Tabla 3.

Sensores de medición elegidos para el sistema

Variable	Sensor	Rango	Ubicación	Propósito
Temperatura (motor y rodamientos)	PT100 (RTD)	0 – 150 °C	3 en estator, 3 en rodamientos principales, 2 en rodamientos de entrada y salida	Monitorear sobrecalentamiento eléctrico y mecánico
Presión de lubricación	Transmisor piezorresistivo	0 – 150psi	Línea de aceite	Controlar presión del sistema de lubricación
Nivel de lubricante	Sensor ultrasónico/capacitivo	0 – 100 %	Tanque de aceite	Detectar bajo nivel y activar alarma preventiva
Flujo de agua	Caudalímetro electromagnético	0 – 200 m ³ /h	Tubería de ingreso de agua al molino	Monitorear y regular el caudal de agua para la preparación de la lechada
Frecuencia de motor vibrador	Señal de monitoreo del VFD	0 – 60 Hz	Motor vibrador alimentador	Regular y supervisar la cantidad de cal que ingresa a la faja
Corriente del motor	Sensor Hall (CT)	0 – 100 A	Motor principal	Detectar sobrecargas eléctricas
% de sólidos	Densímetro en línea	0 – 50 %	Salida de la lechada	Controlar calidad del producto final

Nota. Elaboración propia

4.2.2. *Objetivos de la lógica de control*

La lógica desarrollada cumple con los siguientes objetivos principales:

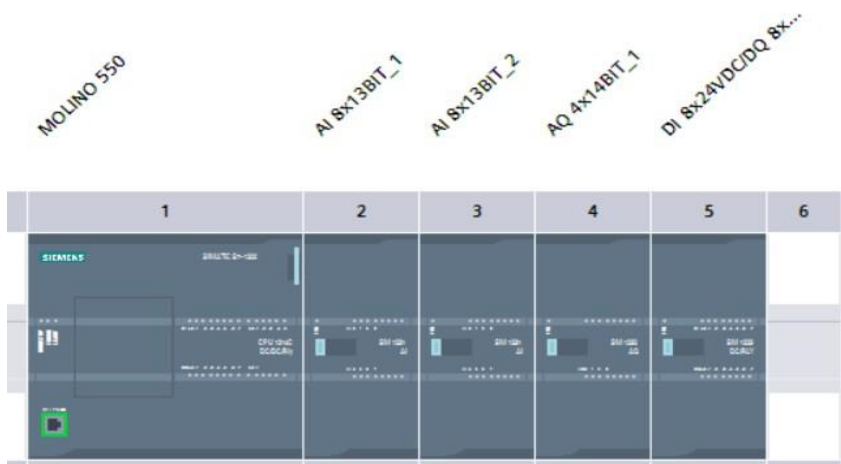
- Monitorear en tiempo real variables críticas del sistema (temperatura, presión, nivel, corriente, concentración).
- Activar alarmas automáticas en caso de valores fuera de rango.
- Ejecutar el control PID sobre la frecuencia del motor vibrador, en base al error entre setpoint y variable de proceso.
- Permitir al operador intervenir desde un HMI simulado (TP700 Comfort).
- Registrar las principales variables del proceso para análisis histórico y trazabilidad.

4.2.3. *Estructura del programa en TIA Portal*

La lógica fue desarrollada en el entorno TIA Portal V18, utilizando el lenguaje de programación estructurado combinado con bloques de funciones (FB) y diagramas LAD. La Figura 3 muestra la selección del PLC y los módulos necesarios para la automatización del sistema, empleando un controlador Siemens S7-1200 como unidad principal. En la imagen se aprecia la disposición modular del sistema, que incluye entradas y salidas analógicas (AI y AQ) y digitales (DI y DO), distribuidas en diferentes ranuras de la base. Cada módulo cumple una función específica dentro del control del proceso, permitiendo la adquisición de señales de campo, el procesamiento de datos y la ejecución de órdenes de salida hacia los actuadores. Esta configuración asegura una integración flexible y escalable, adecuada para el control eficiente de equipos industriales complejos.

Figura 3.

Selección de PLC y módulos necesarios

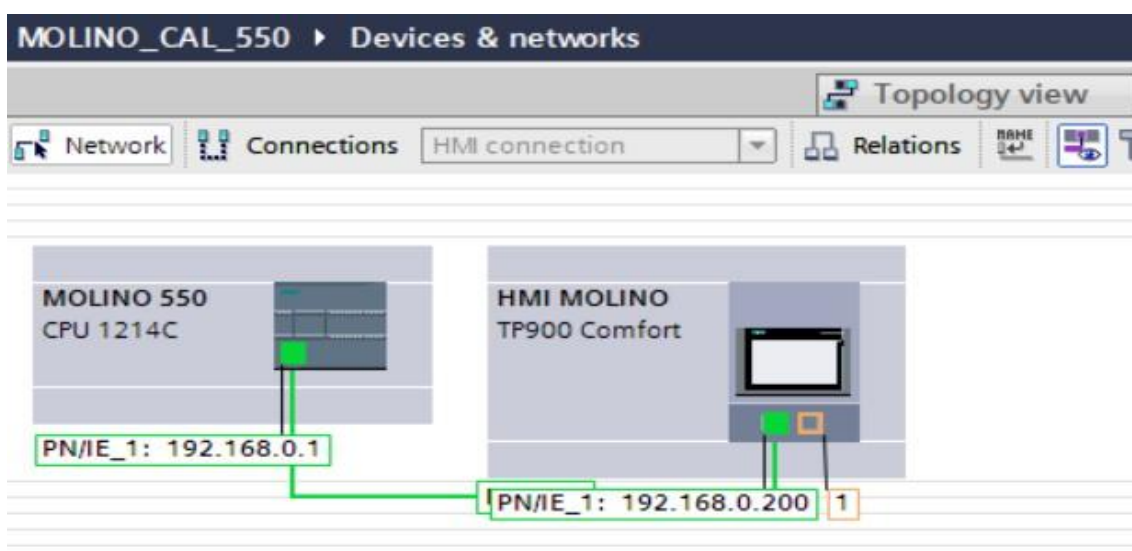


Nota. Elaboración propia

La Figura 4 muestra la configuración de comunicación entre el HMI y el PLC en el entorno de programación de Siemens TIA Portal. En ella se observa la interconexión entre el controlador PLC modelo CPU 1214C, identificado como “MOLINO 550”, y la interfaz HMI “TP900 Comfort”. Ambos dispositivos se comunican a través de una red Ethernet con direcciones IP asignadas: 192.168.0.1 para el PLC y 192.168.0.200 para el HMI. Esta configuración permite el intercambio de datos en tiempo real, de modo que el HMI pueda visualizar, supervisar y controlar las variables del proceso gestionado por el PLC, garantizando una operación eficiente y segura del sistema automatizado.

Figura 4.

Configuración de comunicación entre el HMI y PLC

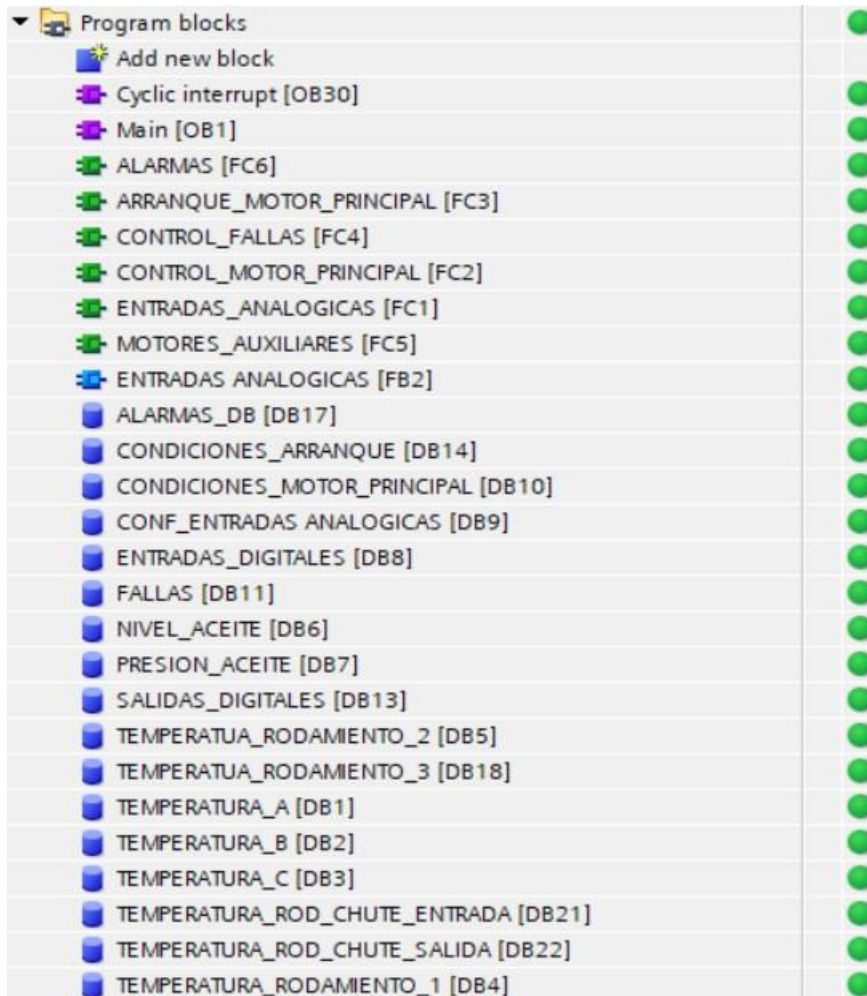


Nota. Elaboración propia

La Figura 5 muestra la estructura organizada del programa desarrollado en el entorno de automatización, donde se crearon diversos bloques funcionales con el propósito de mantener un orden lógico y facilitar la comprensión del proceso. Entre los principales bloques se incluyen los dedicados al arranque y control de motores, gestión de alarmas y fallas, así como la supervisión de variables analógicas y digitales. También se definieron bloques específicos para el monitoreo de condiciones de arranque, presión, nivel de aceite y temperatura en distintos componentes como rodamientos y chutes de entrada y salida. Esta organización modular permite una programación más eficiente, una rápida detección de errores y un mantenimiento más sencillo del sistema automatizado.

Figura 5.

Creación de bloques

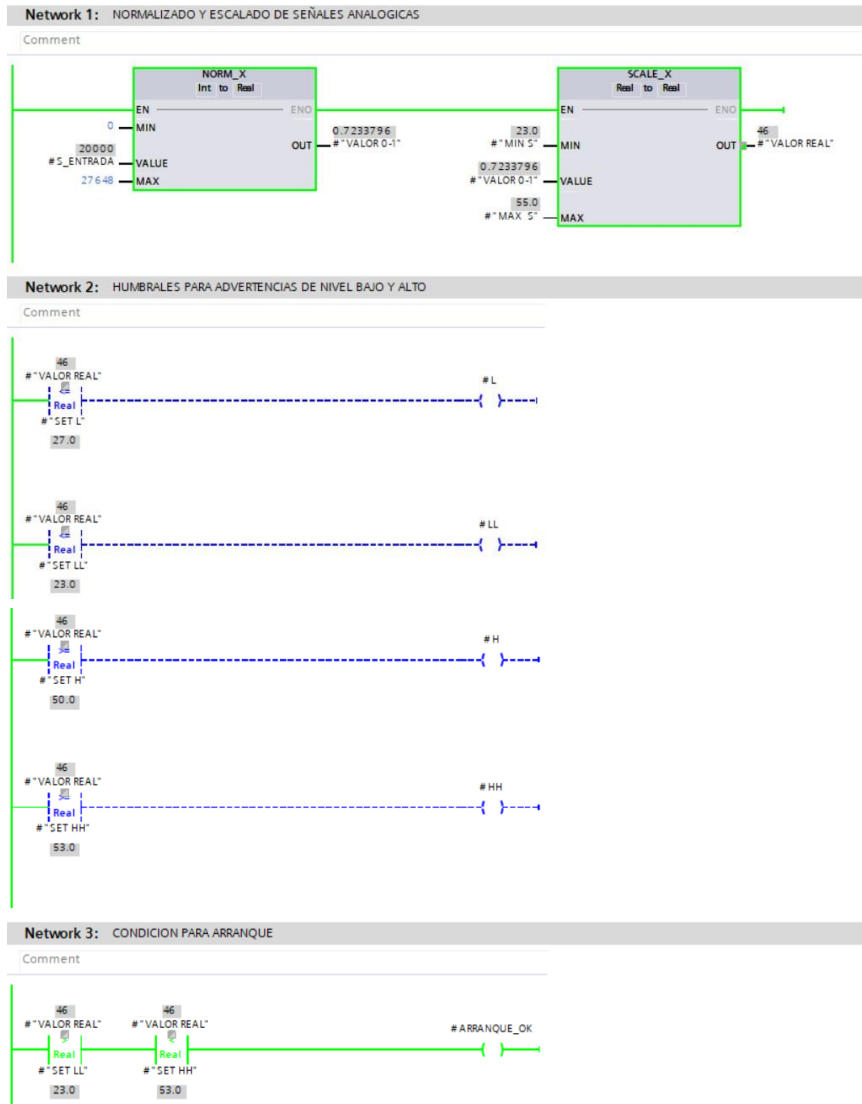


Nota. Elaboración propia

La Figura 6 muestra el bloque funcional principal (FB) diseñado para la lectura de señales analógicas y la activación de advertencias dentro del sistema automatizado. En la primera red se realiza la normalización y el escalado de las señales analógicas, convirtiendo los valores de entrada en magnitudes interpretables para el control del proceso. En la segunda red se establecen los umbrales de advertencia para niveles altos y bajos, lo que permite generar señales de alerta ante posibles condiciones anómalas. Finalmente, la tercera red define las condiciones necesarias para el arranque del sistema, asegurando que los parámetros medidos se encuentren dentro de los rangos permitidos antes de habilitar la operación. Este bloque garantiza un monitoreo continuo, una respuesta oportuna ante fallos y un control más seguro y confiable del sistema.

Figura 6.

Lectura de señales analógicas y activación de alertas

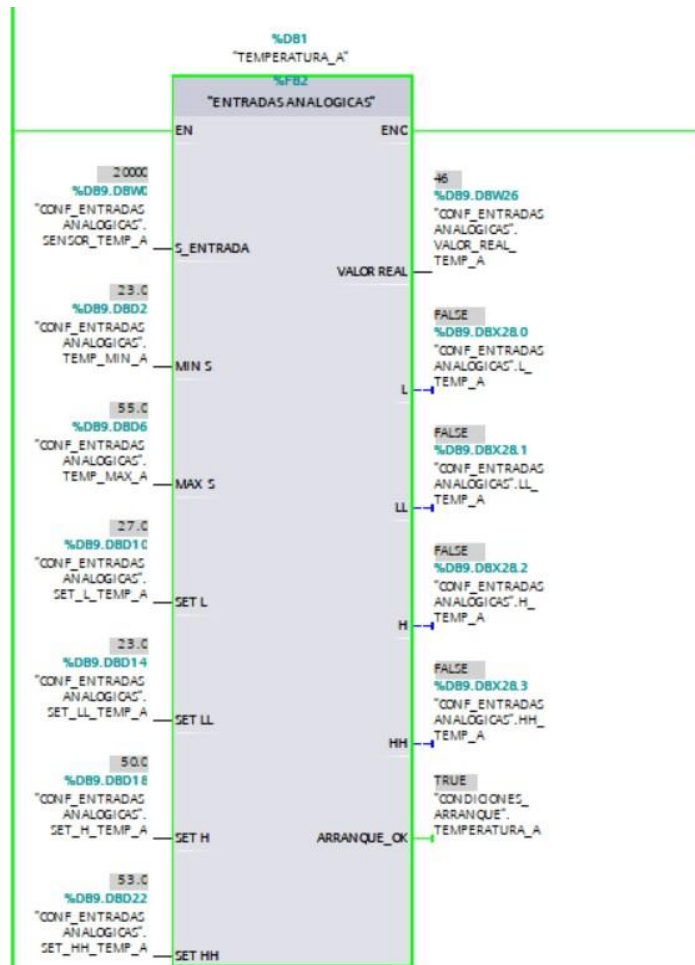


Nota. Elaboración propia

La Figura 7 muestra el bloque funcional (FB) operativo para la lectura de la señal de temperatura “A”, encargado de procesar los datos provenientes del sensor correspondiente. Este bloque permite escalar y adaptar las señales analógicas según los rangos específicos de trabajo definidos por el tipo de sensor utilizado. La programación está estructurada para que el mismo bloque pueda aplicarse a otras variables analógicas del sistema, modificando únicamente los parámetros de entrada y los límites de medición. De esta manera, se logra una estandarización en la lectura de señales, garantizando uniformidad en el tratamiento de datos y facilitando la calibración, supervisión y mantenimiento del sistema de control.

Figura 7.

Lectura de señales

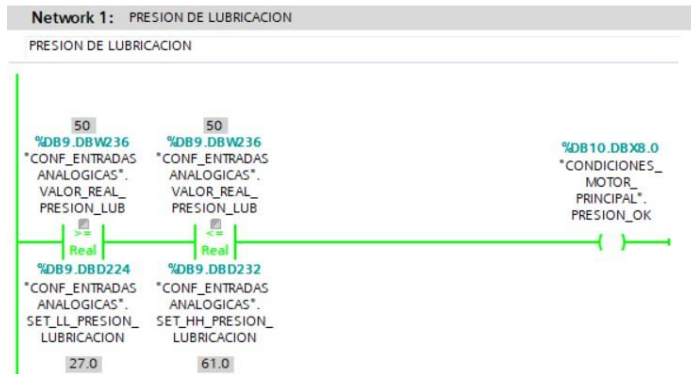


Nota. Elaboración propia

La Figura 8, correspondiente a la presión de lubricación, se muestra una red lógica del programa en lenguaje LADDER donde se verifica si la presión del sistema de lubricación está dentro del rango adecuado antes del arranque del motor principal. Se comparan los valores reales de presión, obtenidos de las entradas analógicas (DB9.DBW034 y DB9.DBW036), con los valores de referencia establecidos (DB9.DBW024 y DB9.DBW022). Si ambas condiciones se cumplen, el sistema activa la marca (%DB10.DBX8.0) denominada CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_PRESION_OK, indicando que la presión de lubricación es correcta para el funcionamiento del motor.

Figura 8.

Condiciones para la presión de lubricación



Nota. Elaboración propia

La Figura 9, representa el nivel de lubricación, se emplea una lógica similar para comprobar que el nivel de aceite sea el adecuado antes de permitir el arranque del motor. Los valores reales del nivel de lubricante (DB9.DBW006 y DB9.DBW026) se comparan con los valores de referencia configurados (DB9.DBW194 y DB9.DBW022). Cuando las condiciones son satisfactorias, se activa la marca (%DB10.DBX18.0) identificada como CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_NIVEL_OK, señalando que el nivel de lubricación se encuentra dentro del rango aceptable para operar de manera segura.

Figura 9.

Condiciones para el nivel de lubricación



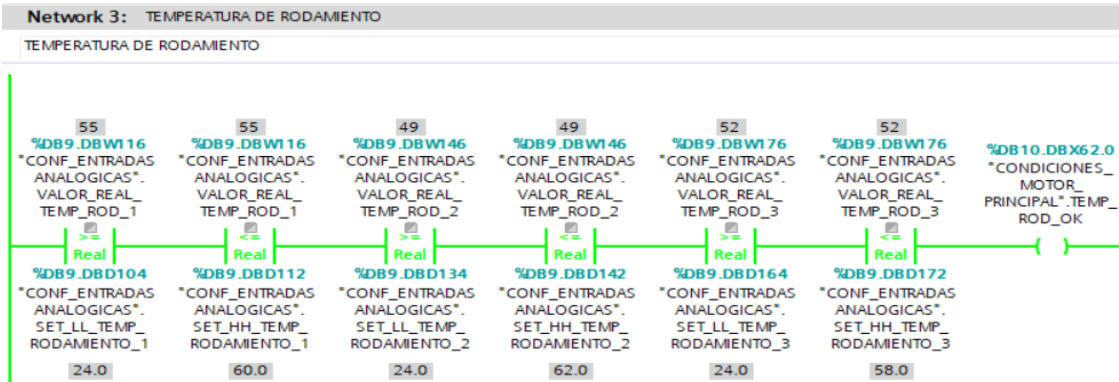
Nota. Elaboración propia

En la Figura 10, correspondiente a la temperatura de rodamiento, se observa una red de control que supervisa las condiciones térmicas de los tres rodamientos del motor principal antes de su puesta en marcha. Cada sensor de temperatura (DB9.DBW116, DB9.DBW146 y DB9.DBW176) registra los valores reales, los cuales son comparados con los límites de temperatura configurados en las direcciones de memoria (DB9.DBD104, DB9.DBD134, DB9.DBD164, entre otros). Si las tres temperaturas se

encuentran dentro de los rangos establecidos, es decir, no exceden los valores máximos permitidos, se activa la marca (%DB10.DBX62.0), identificada como `CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_TEMP_ROD_OK`, indicando que la temperatura de los rodamientos es segura para el funcionamiento del motor.

Figura 10.

Condiciones para la temperatura de rodamiento

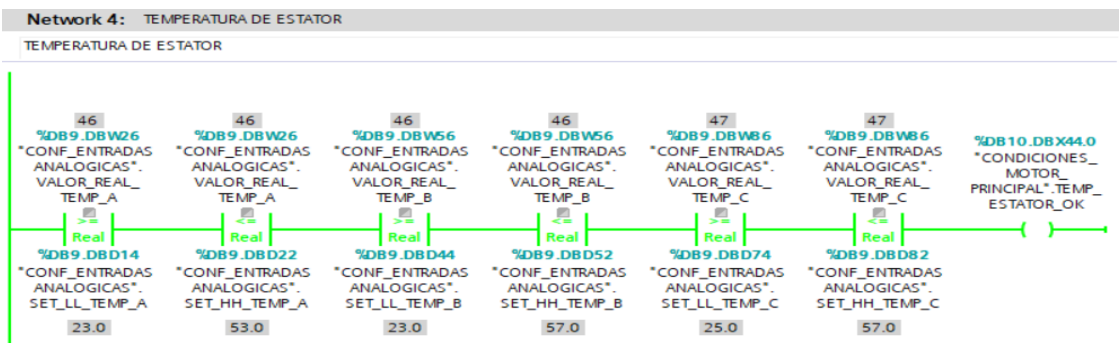


Nota. Elaboración propia

En la Figura 11, que representa la temperatura del estator, el sistema verifica que las temperaturas en las tres fases del estator (A, B y C) estén dentro de los límites normales antes de permitir la operación. Los valores reales de cada fase (DB9.DBW26, DB9.DBW56 y DB9.DBW86) se comparan con sus respectivos rangos mínimo y máximo configurados (DB9.DBD014, DB9.DBD032, DB9.DBD074, entre otros). Si todos los valores se encuentran dentro de los márgenes establecidos, el programa activa la marca (%DB10.DBX44.0), denominada `CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_TEMP_ESTATOR_OK`, que confirma que la temperatura del estator es adecuada para el arranque.

Figura 11.

Condiciones para la temperatura del estator

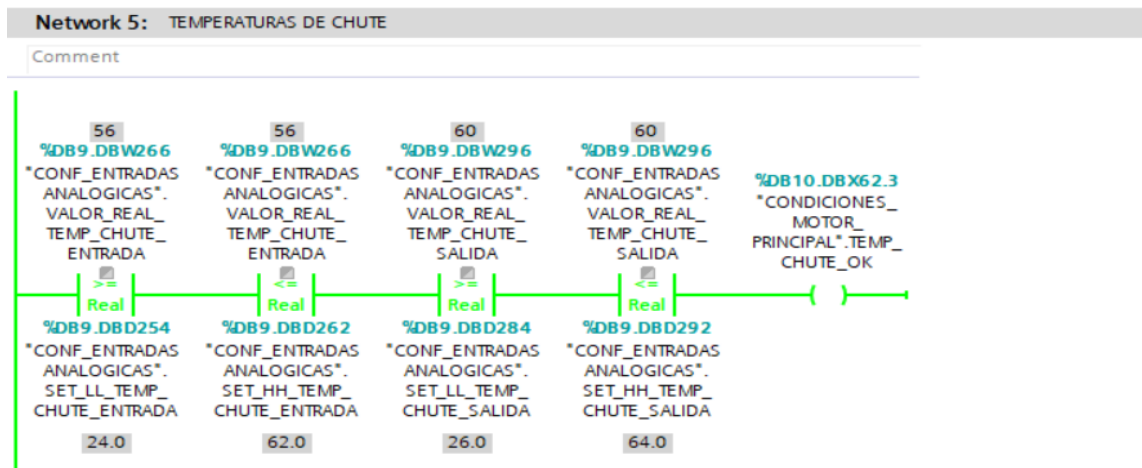


Nota. Elaboración propia

En la Figura 12, correspondiente a las temperaturas de chute, se muestra la supervisión de las temperaturas en los puntos de entrada y salida del chute, elemento por donde fluye el material en el sistema. Los valores reales medidos (DB9.DBW66, DB9.DBW96) se comparan con los límites configurados (DB9.DBD254, DB9.DBD262, DB9.DBD284, DB9.DBD292). Si las temperaturas se mantienen dentro de los rangos establecidos —es decir, no superan los límites altos ni bajan de los valores mínimos—, se activa la marca (%DB10.DBX62.3), identificada como `CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_TEMP_CHUTE_OK`, indicando que el chute opera a una temperatura segura para el proceso.

Figura 12.

Condiciones para la temperatura del chute

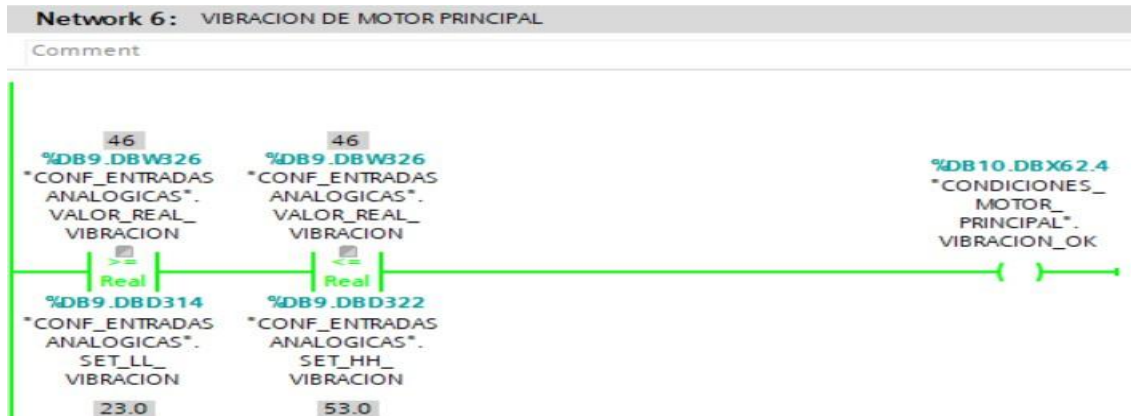


Nota. Elaboración propia

En la Figura 13, referente a la vibración del motor principal, se observa un control que monitorea el nivel de vibración del motor para prevenir daños mecánicos. El valor real de vibración (DB9.DBW26) se compara con los límites inferior y superior configurados (DB9.DBD314 y DB9.DBD322). Cuando el nivel de vibración se mantiene dentro del rango aceptable, se activa la marca (%DB10.DBX62.4), denominada `CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_VIBRACION_OK`, la cual confirma que el motor no presenta vibraciones anómalas y se encuentra en condiciones seguras de operación.

Figura 13.

Condiciones para la vibración del motor principal

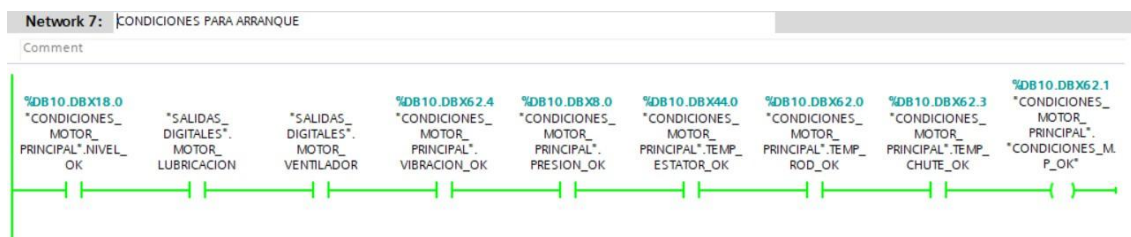


Nota. Elaboración propia

En la Figura 14, se integran todas las señales de verificación previas (presión de lubricación, nivel de lubricación, temperatura de rodamiento, temperatura de estator, temperatura de chute y vibración del motor). Estas marcas son evaluadas en conjunto y, si todas se encuentran activadas, se genera la salida (%DB10.DBX62.5), identificada como CONDICIONES_MOTOR_PRINCIPAL_OK, que autoriza el arranque del motor principal. Esta red garantiza que el sistema solo pueda ponerse en marcha cuando todas las variables críticas estén dentro de los parámetros normales de funcionamiento, evitando fallas o daños por condiciones inadecuadas.

Figura 14.

Condiciones para arranque



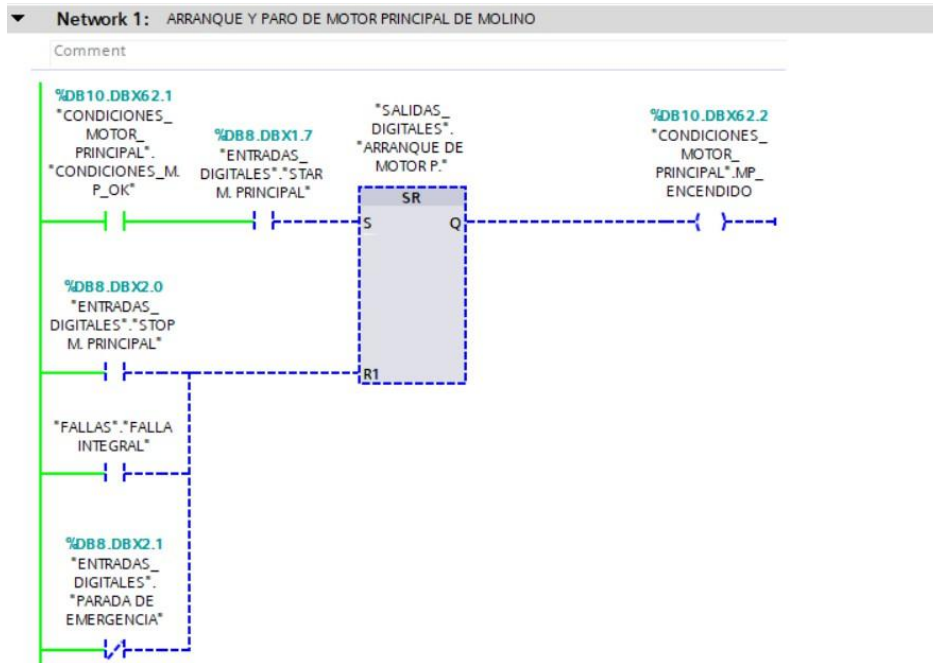
Nota. Elaboración propia

Una vez verificadas y cumplidas todas las condiciones de arranque, el sistema permite el pase automático al siguiente bloque de control, encargado de gestionar el encendido y apagado del motor. Este bloque actúa como una etapa de protección y supervisión dinámica, ya que mantiene un monitoreo continuo de las variables críticas durante el funcionamiento. Si en cualquier momento se detecta una anomalía o falla en alguna de las condiciones previamente validadas, el sistema ejecuta una orden de parada

automática del motor, evitando daños mecánicos, sobrecalentamientos o fallas eléctricas. De este modo, el control no solo garantiza un arranque seguro, sino también una operación confiable y eficiente, protegiendo tanto los equipos como la integridad del proceso productivo.

Figura 15.

Encendido y apagado del motor

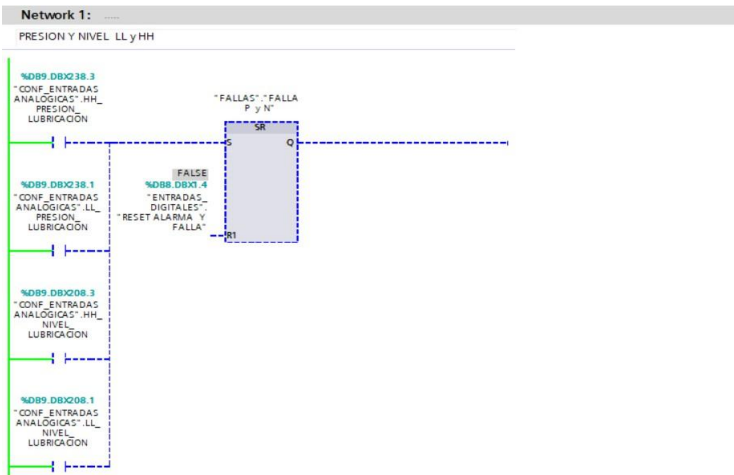


Nota. Elaboración propia

Se establecieron diversas condiciones de parada del molino que se activan de forma automática en caso de presentarse fallas o desviaciones críticas en los proceso de operación. Asimismo, una de las principales causas de detención corresponde al nivel de lubricación y precisión, los cuales deben permanecer en el rango seguro para garantizar el correcto funcionamiento de los componentes mecánicos. Si el sistema detecta una presión o nivel de lubricante demasiado alto o demasiado bajo, se interpreta como una anomalía que puede generar un fallo en los cojinetes, sobrecalentamiento o daños en el motor principal. Ante esta situación, el sistema de control envía una señal de parada inmediata del molino, protegiendo así la integridad del equipo y evitando posibles averías mayores o pérdidas en la producción.

Figura 16.

Presión o nivel de lubricación muy alto o bajo

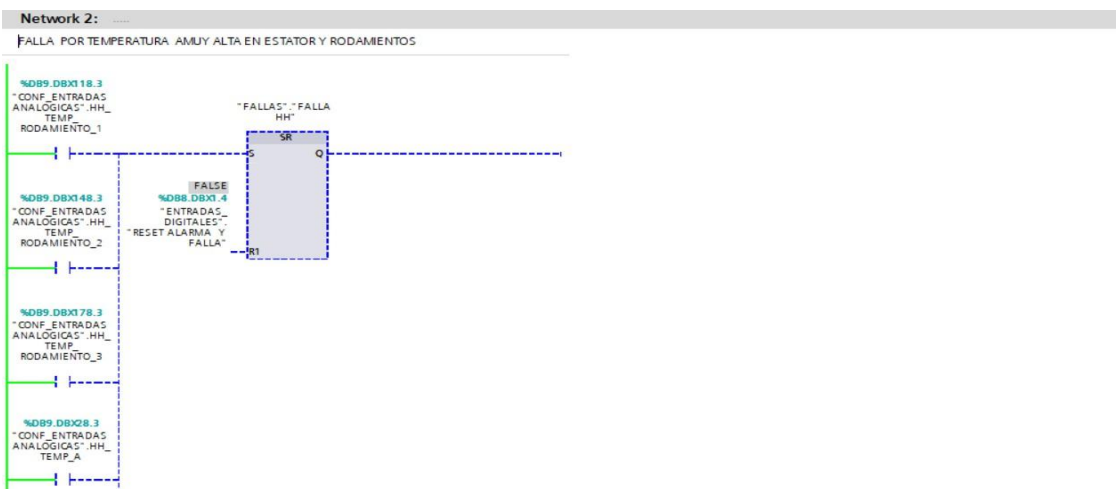


Nota. Elaboración propia

Otra condición crítica que genera la parada automática del molino es la elevada temperatura en el estator o en los rodamientos. Estos componentes son esenciales para el correcto funcionamiento del motor principal, por lo que un aumento excesivo de temperatura puede ser indicio de sobrecarga, fricción anormal, deficiencia en la lubricación o fallas eléctricas internas. Cuando los sensores registran valores superiores a los límites establecidos, el sistema de control interpreta la situación como una falla térmica y ejecuta de inmediato la orden de desconexión del motor, deteniendo el molino para evitar daños severos en los devanados del estator o el deterioro prematuro de los rodamientos.

Figura 17.

Temperaturas altas en estator o rodamiento

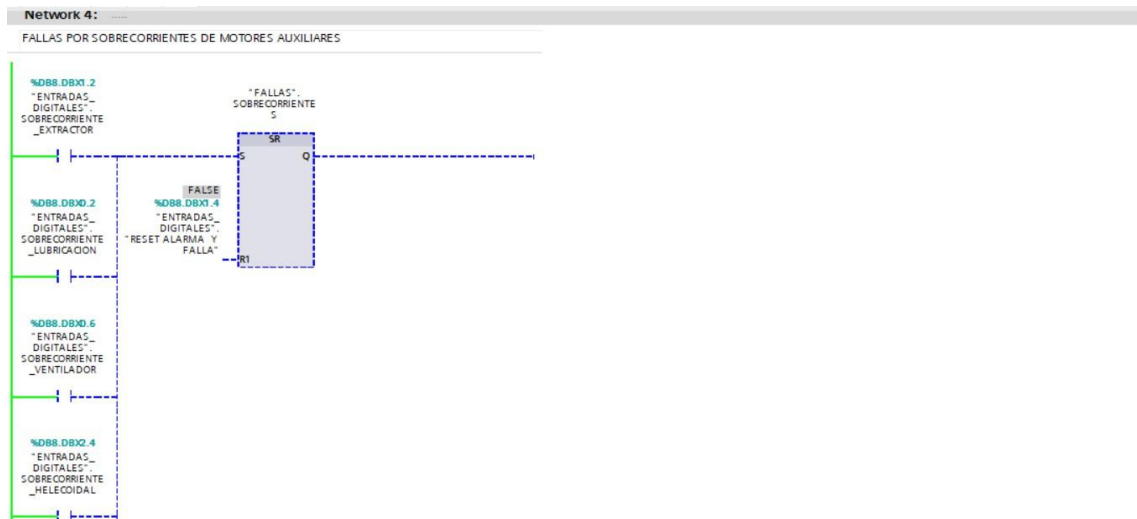


Nota. Elaboración propia

También se contemplan fallas por sobre corrientes en los motores auxiliares, las cuales constituyen una de las principales causas de parada preventiva del molino. Los motores auxiliares, encargados de funciones complementarias como el bombeo de lubricante o el accionamiento de ventiladores, deben operar dentro de un rango de corriente nominal establecido. Si el sistema detecta una corriente superior al valor permitido, se considera que existe una sobrecarga eléctrica, posiblemente causada por un bloqueo mecánico, un cortocircuito o un desgaste interno del motor. Ante esta condición, el sistema de control envía una señal de alarma y detención inmediata, desconectando tanto el motor afectado como el molino principal para evitar daños en los devanados, disparos de protecciones o fallas en cadena dentro del sistema eléctrico.

Figura 18.

Sobre corrientes en motores auxiliares

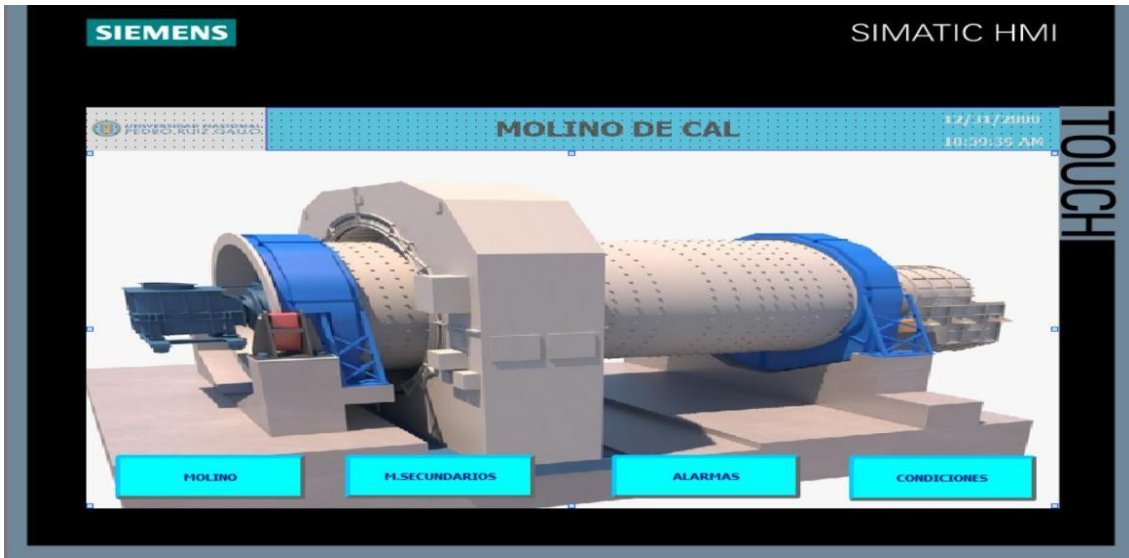


Nota. Elaboración propia

La Figura 19 muestra la pantalla de inicio del sistema HMI del molino de cal, desarrollada en la interfaz SIMATIC de Siemens. Visualizando una representación tridimensional del molino, la cual es acompañada del menú principal para acceder a diferentes apartados como los historizados, el monitoreo del molino, las alarmas y las condiciones de operación. Asimismo, el diseño facilita los procesos de navegación y el control, desarrollando una visión general de su entorno operativo y el equipo de manera clara y organizada.

Figura 19.

Pantalla de inicio

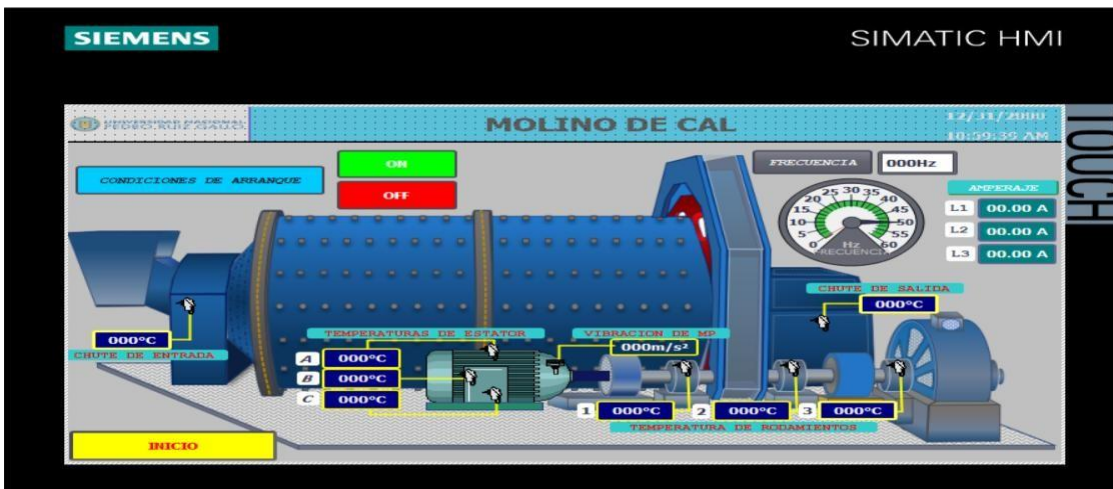


Nota. Elaboración propia

En la figura 20 se visualiza el diseño del molino de cal con la incorporación de sensores para el registro de las variables críticas, como son la vibración, temperatura, corriente y frecuencia. Asimismo a través de la interfaz se observa los hitos medición y cómo se distribuyen estratégicamente en las distintas zonas del molino para el monitoreo en tiempo real del estado del equipo, por lo cual se contribuye a la detección temprana de distintas fallas así como el mantenimiento preventivo, para cerciorar de que el equipo tenga un funcionamiento eficiente y sea seguro el sistema.

Figura 20.

Diseño del molino

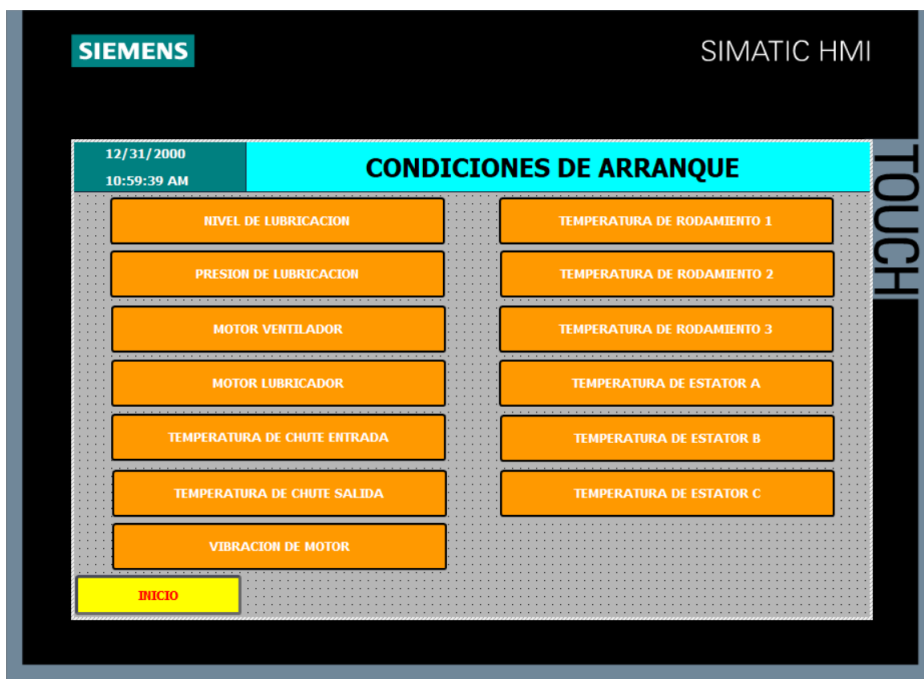


Nota. Elaboración propia

La Figura 21 representa una pantalla del sistema HMI destinada a la verificación de las condiciones de arranque del molino. En ella, el operador visualiza los parámetros que se encuentran en estado correcto, los cuales se señalan en verde, así como los parámetros incorrectos que se encuentran en naranja, como, vibración del motor, la presión y temperatura de lubricación además de la temperatura de los rodamientos y estatores. Reconociendo que el diseño permite tener un control previo al encendido del equipo para garantizar que todas las variables se dispongan dentro de los rangos admisibles para un inicio seguro y eficiente del proceso.

Figura 21.

Pantalla para el operador

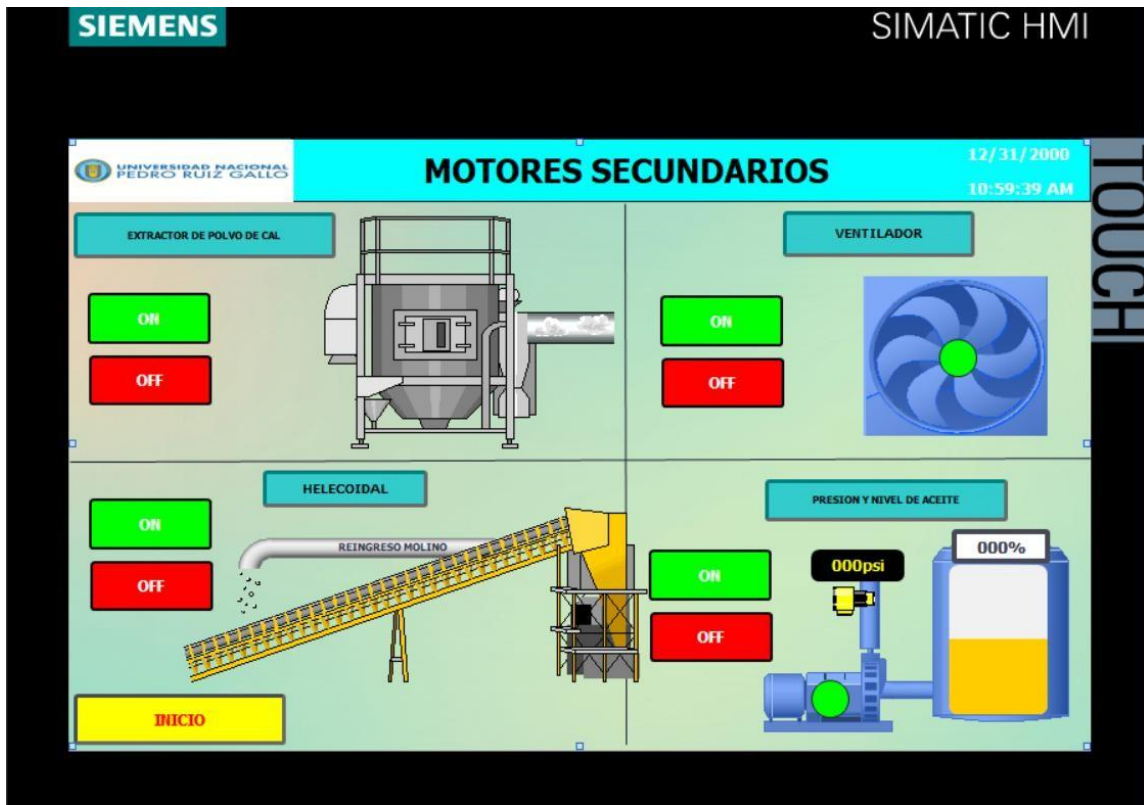


Nota. Elaboración propia

En la misma línea, en la Figura 22 se visualiza la interfaz de control para el encendido y apagado de los motores secundarios del sistema. La pantalla incluye botones de control (ON/OFF) asociados a diferentes componentes, como el extractor de polvo, ventilador, helicoidal y sistema de presión de aceite, los cuales se representan gráficamente para facilitar su identificación. Este diseño permite al operador gestionar de forma sencilla y visual el funcionamiento de los equipos auxiliares, optimizando las tareas de operación y asegurando una respuesta rápida ante cualquier eventualidad.

Figura 22.

Pantalla de encendido y apagado de motores



Nota. Elaboración propia

4.3. Implementar un control PID en un entorno simulado, para regular la dosificación de cal en función de la concentración de sólidos.

Para modelar la planta correspondiente al sistema de dosificación de cal en el molino de bolas, se utilizó un modelo de primer orden con retardo muerto, de acuerdo con el método descrito por Ogata (2002). Este tipo de modelo es apropiado para representar procesos donde existe una inercia natural en la respuesta y un retraso temporal desde la aplicación de una entrada hasta el inicio de la respuesta de la salida.

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}$$

4.3.1. Determinación Experimental de Parámetros

Se realizaron pruebas variando la frecuencia de vibración del alimentador de cal (variable manipulada), observando la respuesta en la concentración de sólidos en la salida del molino (variable controlada), medida en Tn/h. Los datos obtenidos fueron los siguientes:

- 28 Hz → 8.5 Tn/h
- 29 Hz → 9 Tn/h
- 30 Hz → 9.5 Tn/h
- 31Hz → 10 Tn/h

Cálculo de la Ganancia Estática (K)

La ganancia estática (K) representa la relación entre el cambio en la salida y el cambio en la entrada en estado estacionario:

$$K = \frac{10 - 8.5}{31 - 28} = \frac{1.5}{3} = 0.5 \text{ Tn/h por Hz}$$

Determinación del Retardo Muerto (L)

Se observó que la salida comenzó a variar 3 segundos después de aplicar el cambio en la frecuencia, debido al tiempo que tarda el material en desplazarse desde la tolva a la faja y luego hasta el molino. Esta medición se realizó usando sensores de peso ubicados cerca de la faja transportadora. Es importante mencionar que si se utilizara un densímetro ubicado más adelante como sensor principal de la variable controlada (concentración de

sólidos), el valor del retardo muerto podría ser diferente y mayor, ya que incluiría el tiempo adicional que tarda el material en llegar hasta dicho punto de medición. Por lo tanto, el retardo muerto (L) estimado es específico para el sistema de medición basado en sensores de peso:

$$L = 3 \text{ segundos}$$

Determinación de la Constante de Tiempo (τ)

La constante de tiempo se define como el tiempo necesario para alcanzar el 63.2% del cambio total, contado desde el final del retardo muerto. En este caso, se alcanzó dicho porcentaje a los 18 segundos del inicio, por lo tanto:

$$\tau = 18 - 3 = 15 \text{ segundos}$$

Función de Transferencia de la Planta

Con los parámetros obtenidos, se modela la planta como:

$$G(s) = \frac{0.5}{15s + 1} \cdot e^{-3s}$$

Este modelo se utilizará para el diseño del controlador PID que regula la dosificación de cal en función de la concentración de sólidos en la salida del molino.

4.3.2. Sintonización del Controlador PID (Método de Cohen-Coon)

Este método proporciona fórmulas empíricas para estimar los parámetros del controlador PID en función de los valores del modelo FOPDT:

$$K_p = \left(\frac{1}{K}\right) \cdot \left(\frac{T}{L}\right) \cdot \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T}\right)$$

$$T_i = L \cdot \left(\frac{32 + 6\left(\frac{L}{T}\right)}{13 + 8\left(\frac{L}{T}\right)}\right)$$

$$T_d = L \cdot \left(\frac{4}{11 + 2\left(\frac{L}{T}\right)}\right)$$

Sustitución de valores

Dado que:

- $K = 0.5$
- $T = 15 \text{ s}$

- $L = 3 \text{ s}$

Cálculo de K_p

$$K_p = \left(\frac{1}{0.5}\right) \cdot \left(\frac{15}{3}\right) \cdot \left(\frac{4}{3} + \frac{3}{4 \cdot 15}\right)$$

$$K_p = 2 \cdot 5 \cdot (1.333 + 0.05)$$

$$K_p = 10 \cdot (1.383)$$

$$K_p = 13.83$$

Cálculo de T_i

$$T_i = 3 \cdot \left(\frac{32 + 6 \cdot \left(\frac{3}{15}\right)}{13 + 8 \cdot \left(\frac{3}{15}\right)}\right)$$

$$T_i = 3 \cdot \left(\frac{33.2}{14.6}\right)$$

$$T_i = 6.82s$$

Cálculo de T_d

$$T_d = 3 \cdot \left(\frac{4}{11 + 2 \cdot \left(\frac{3}{15}\right)}\right)$$

$$T_d = 3 \cdot \left(\frac{4}{11.4}\right)$$

$$T_d = 1.05s$$

Conversión a parámetros estándar PID

A partir de los valores obtenidos, se calculan los coeficientes estándar:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{13.83}{8.82} = 2.03$$

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

$$K_d = 13.5 \cdot 1.05 = 14.52$$

Resultado final de los parámetros PID (Cohen-Coon)

$$K_p = 13.5$$

$$K_i = 2.03$$

$$K_d = 14.52$$

La Figura 23 muestra un fragmento de código en MATLAB que corresponde a la configuración inicial de un modelo de simulación de control PID aplicado a una planta tipo FOPDT (First Order Plus Dead Time). En la primera sección se definen los parámetros del proceso: ganancia $K=0.5$, tiempo de estabilización $T=15$ y retardo muerto $L=3$. Luego, se establece el tiempo de simulación con un paso de 0.1 segundos hasta un total de 300 segundos. Se definen además los puntos de consigna o setpoints, que cambian en momentos específicos para evaluar la respuesta del sistema ante variaciones del valor deseado. Posteriormente, se inicializan las variables de proceso (PV), de control (CV) y un buffer para el retardo. También se especifica el rango operativo del actuador y los parámetros del controlador PID “más agresivo” con constantes $K_p=13.83$, $K_i=2.03$ y $K_d=14.52$. Finalmente, se declaran variables internas del PID y un factor de suavizado ($\alpha=0.5$) para el filtrado de la señal de salida, con el objetivo de reducir fluctuaciones y mejorar la estabilidad del control.

Figura 23.

Configuración inicial

1	<code>clc; clear; close all;</code>
2	
3	<code>%% Parámetros de la planta (modelo FOPDT)</code>
4	<code>K = 0.5; % Nueva ganancia del proceso</code>
5	<code>T = 15; % Tiempo de estabilización</code>
6	<code>L = 3; % Retardo muerto</code>
7	
8	<code>%% Tiempo de simulación</code>
9	<code>dt = 0.1;</code>
10	<code>t_final = 300;</code>
11	<code>t = 0:dt:t_final;</code>
12	<code>N = length(t);</code>
13	
14	<code>%% Setpoints</code>
15	<code>SP = zeros(1, N);</code>
16	<code>SP(t >= 3) = 8; % Primer cambio al segundo 3</code>
17	<code>SP(t >= 60) = 10; % Segundo cambio</code>
18	<code>SP(t >= 120) = 7; % Tercer cambio</code>
19	<code>SP(t >= 180) = 3; % Cuarto cambio</code>
20	<code>SP(t >= 240) = 8; % Quinto cambio</code>
21	
22	<code>%% Inicialización de variables</code>
23	<code>PV = zeros(1, N); % Porcentaje de sólidos</code>
24	<code>CV = zeros(1, N); % Frecuencia del vibrador</code>
25	<code>u_delay = zeros(1, round(L/dt)+1); % Buffer para retardo muerto</code>
26	
27	<code>%% Rango del actuador</code>
28	<code>f_min = 0;</code>
29	<code>f_max = 45;</code>
30	
31	<code>%% PID - Más agresivo</code>
32	<code>Kp = 13.83;</code>
33	<code>Ki = 2.03;</code>
34	<code>Kd = 14.52;</code>
35	
36	<code>%% PID - Variables internas</code>
37	<code>e_prev = 0;</code>
38	<code>int_e = 0;</code>
39	
40	<code>%% Suavizado (filtro en salida del PID)</code>
41	<code>alpha = 0.5;</code>

Nota. Elaboración propia

En esta sección del código se desarrolla la simulación del controlador PID aplicado a una planta de primer orden con retardo. El bucle for recorre cada instante de tiempo, calculando el error entre el valor de referencia (SP) y la variable del proceso (PV). Luego, el controlador PID obtiene la acción de control (u) a partir de sus componentes proporcional, integral y derivativa. Se incluyen etapas clave: saturación para limitar la señal de salida, filtro suave para evitar oscilaciones bruscas, y retardo muerto para simular el retraso físico del sistema. Finalmente, se actualiza la salida de la planta, representando la evolución del proceso controlado.

Figura 24.

Algoritmo de Simulación del Controlador PID con Retardo y Filtro Suave

```

43     %% Simulación
44     for k = 2:N
45         if t(k) < L
46             CV(k) = 0;
47             PV(k) = 0;
48             continue
49         end
50
51         % Error y PID
52         e = SP(k) - PV(k-1);
53         int_e = int_e + e*dt;
54         der_e = (e - e_prev)/dt;
55         e_prev = e;
56
57         u = Kp*e + Ki*int_e + Kd*der_e;
58
59         % Saturación
60         u = max(min(u, f_max), f_min);
61
62         % Aplicar filtro suave
63         CV(k) = alpha * u + (1 - alpha) * CV(k-1);
64
65         % Retardo muerto
66         u_delay = [CV(k), u_delay(1:end-1)];
67         u_aplicado = u_delay(end);
68
69         % Modelo de planta de primer orden
70         dPV = (-PV(k-1) + K * u_aplicado) * dt / T;
71         PV(k) = PV(k-1) + dPV;
72     end
73

```

Nota. Elaboración propia

Este fragmento genera las gráficas de resultados de la simulación. La primera subgráfica muestra la comparación entre el setpoint (línea negra punteada) y la respuesta del proceso (línea azul), mientras que la segunda presenta la señal de control (línea roja) correspondiente a la acción del controlador PID. Los títulos, etiquetas y leyendas facilitan la interpretación de cómo el sistema responde ante los cambios del punto de consigna y cómo el controlador ajusta su salida para mantener la variable del proceso dentro de los valores deseados.

Figura 25.

Código para la Generación de Gráficas del Proceso Controlado

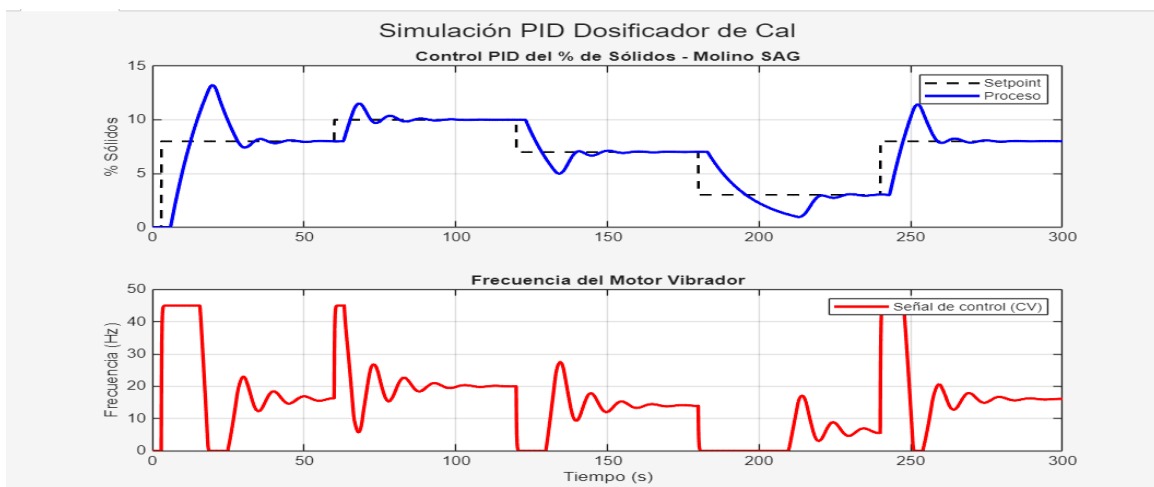
```
74     %% Gráficas
75     figure;
76
77     subplot(2,1,1)
78     plot(t, SP, '--k', 'LineWidth', 1.5); hold on;
79     plot(t, PV, 'b', 'LineWidth', 2);
80     ylabel('% Sólidos');
81     legend('Setpoint','Proceso');
82     title('Control PID del % de Sólidos - Molino SAG');
83     grid on;
84
85     subplot(2,1,2)
86     plot(t, CV, 'r', 'LineWidth', 2);
87     ylabel('Frecuencia (Hz)');
88     xlabel('Tiempo (s)');
89     legend('Señal de control (CV)');
90     title('Frecuencia del Motor Vibrador');
91     grid on;
92
93     sgtitle('Simulación PID Dosificador de Cal');
```

Nota. Elaboración propia

El gráfico superior evidencia que el control PID logra seguir el setpoint del porcentaje de sólidos en el molino SAG, aunque con cierta oscilación inicial y sobreimpulso, lo cual es característico de un ajuste de control agresivo o un retardo importante. A medida que avanza el tiempo, el sistema alcanza una estabilidad aceptable tras cada cambio de referencia. En la gráfica inferior, la señal de control (frecuencia del motor vibrador) muestra variaciones bruscas al inicio y picos de respuesta cuando se producen los cambios de setpoint, reflejando la acción correctiva del controlador. En conjunto, los resultados demuestran que el PID regula eficazmente el proceso, aunque podría optimizarse para reducir la oscilación y el esfuerzo de control.

Figura 26.

Resultados de la Simulación del Control PID del % de Sólidos en el Molino SAG



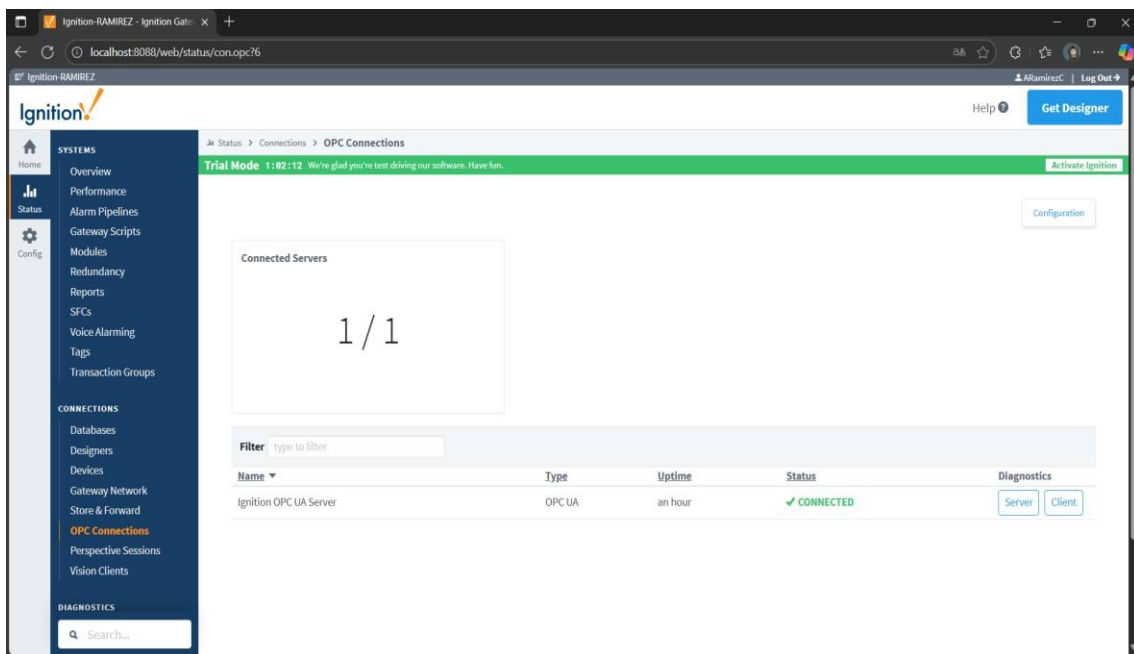
Nota. Elaboración propia

4.4. Configurar un sistema SCADA virtual que permita la supervisión remota del proceso a través de la nube.

Se utiliza la conexión OPC que se crea automáticamente durante la instalación de Ignition. Esta conexión se le conoce como "Ignition OPC UA Server" y permite generar una comunicación entre el servidor de Ignition y los controladores o dispositivos conectados, haciendo más fácil el intercambio de información en tiempo real. Por ello, la configuración predeterminada del sistema puede detectar y vincular las diferentes variables o etiquetas que provienen de los equipos de campo sin requerir crear una conexión manual desde cero, lo cual, a su vez, permite optimizar el proceso de integración dentro del entorno SCADA.

Figura 27.

Conexión OPC



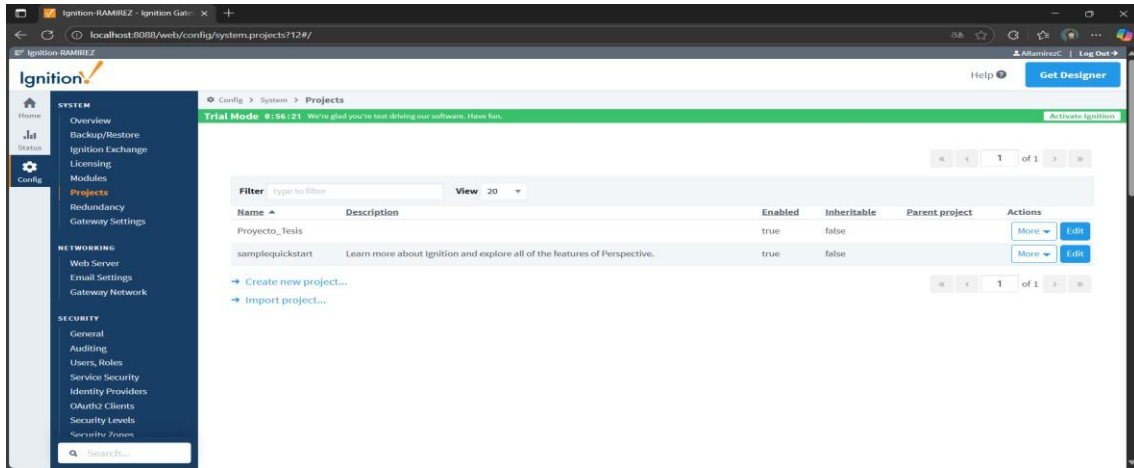
Nota. Elaboración propia

Posterior a ello, se redirigió el sistema al apartado Config > Systems > Projects dentro del panel del Ignition Gateway, siendo este el apartado donde se gestionan todos los proyectos del sistema, pues permite crear un nuevo proyecto para desarrollar y organizar el entorno SCADA. En esta etapa se definen el nombre, la descripción y otros parámetros básicos, como el diseño que se empleará y las configuraciones de acceso y seguridad. Siendo un paso es fundamental, pues los proyectos creados sirven como

espacio de trabajo donde se construyen las interfaces gráficas, se vinculan las variables del proceso y se implementan las funciones de supervisión y control del sistema.

Figura 28.

Creación del proyecto

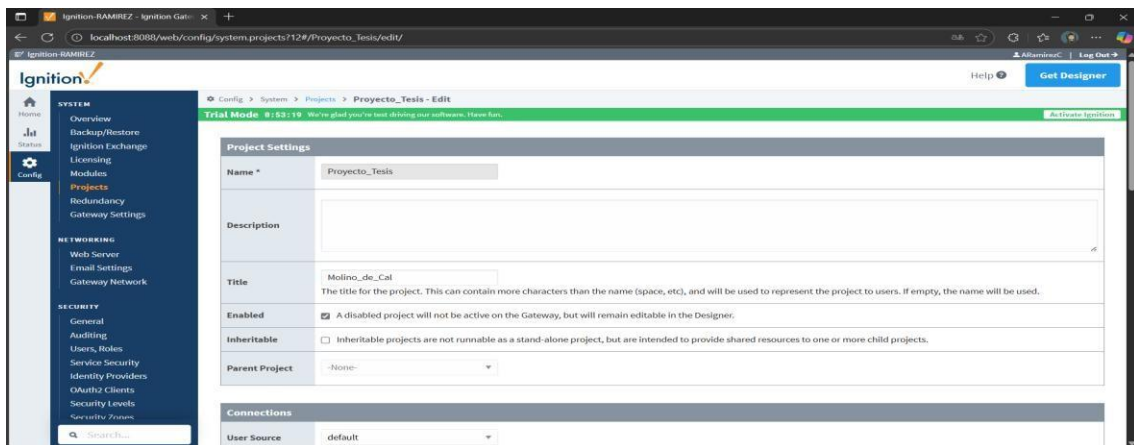


Nota. Elaboración propia

Asimismo, se realizó un clic en la opción “Create new project...” para dar inicio a la creación de un proyecto nuevo en Gateway de Ignition. Según ello, se desplegó un formulario en el que se completaron los campos requeridos, como el nombre del proyecto, su descripción, y el título que identificará el entorno SCADA. Asimismo, el resto parámetros se mantuvieron con sus valores predeterminados, pues están configurados para garantizar un funcionamiento básico y estable. Por ello, tras completar dicha información, se confirmó la creación del proyecto, el cual quedará disponible para ser editado y desarrollado en el entorno de diseño de Ignition.

Figura 29.

Llenado de los aportados

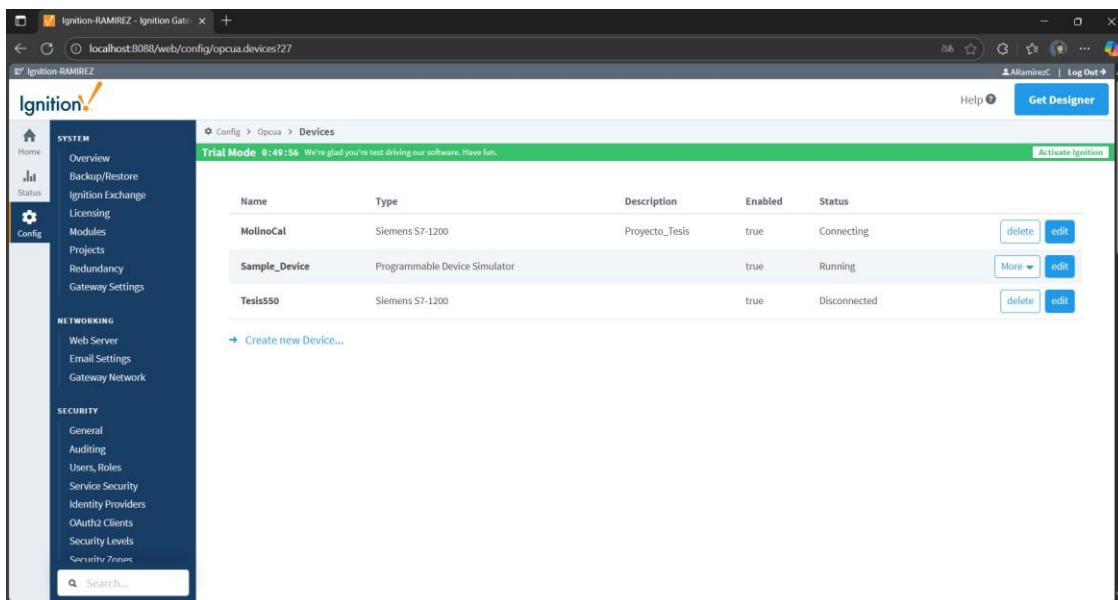


Nota. Elaboración propia

Luego, se dirige a la sección OPC UA > Device Connections dentro del panel de configuración del Gateway, donde se gestionan las conexiones entre Ignition y los dispositivos externos. En este apartado se seleccionó la opción para agregar un nuevo dispositivo (PLC), el cual corresponde al equipo con el que se trabajará en el sistema SCADA. Asimismo, al crear la conexión, se eligió el tipo de dispositivo según el fabricante o protocolo de comunicación ya sea por Siemens, Allen-Bradley, Modbus u otros y se configuraron los parámetros necesarios, como son la dirección IP las credenciales de acceso y el puerto de comunicación. Posterior al guardado de la configuración, se estableció la conexión, por lo cual el PLC quedó vinculado al servidor OPC UA de Ignition, permitiendo la lectura y escritura de datos en tiempo real.

Figura 30.

Sección OPC UA > Device Connections

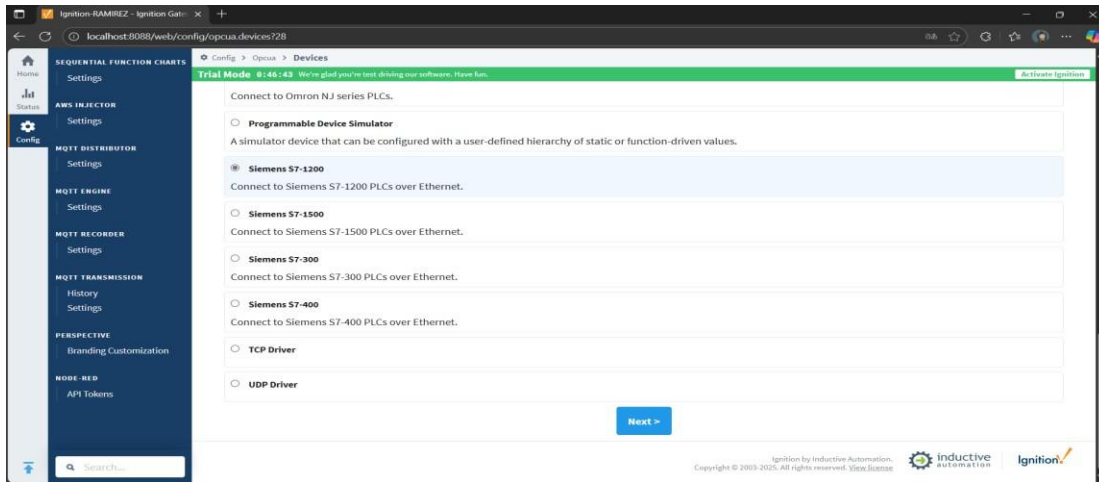


Nota. Elaboración propia

Asimismo, se dio clic en la opción de “Create new Device...” para dar inicio al proceso de vinculación de un nuevo dispositivo al servidor OPC UA de Ignition. A partir de ello, se desplegó un listado con los distintos PLC que son compatibles, organizados según su protocolo de comunicación o fabricante, por ejemplo, Allen-Bradley, Siemens, Modbus TCP, Omron, entre otros. En este contexto, se seleccionó el tipo de PLC correspondiente al equipo con el que se trabajó para que sea compatible y exista un correcto intercambio de datos. Además. Tras elegir el dispositivo se continuó con la configuración de sus parámetros de conexión, estableciendo aspectos como la dirección IP, el puerto y el nombre de identificación en el sistema.

Figura 31.

Selección del tipo de PLC

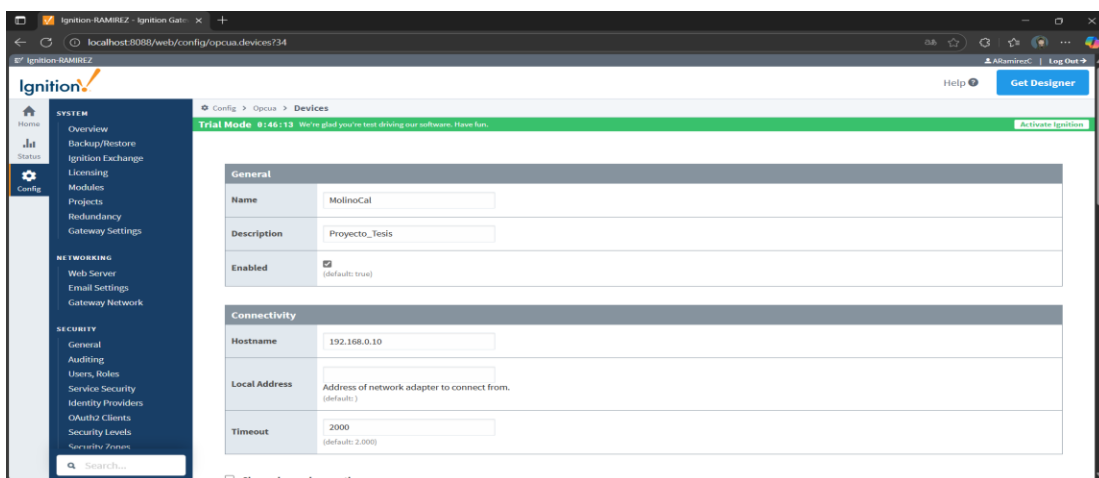


Nota. Elaboración propia

Asimismo, se completaron los apartados del formulario de configuración del dispositivo, asignando datos como el nombre del dispositivo, una descripción opcional y los parámetros de conexión en cada campo correspondiente, asimismo se agregó la dirección IP del PLC, para generar una comunicación continua entre el controlador y el servidor OPC UA de Ignition. No obstante, es relevante verificar que la dirección IP sea parte de la misma red local que el servidor y que el PLC para que estén correctamente conectados y en línea. Posterior al registro, se guardó la configuración con la intención de que el sistema busque establecer la conexión y se habilite la comunicación en tiempo real con el dispositivo.

Figura 32.

Colocación de la IP del PLC

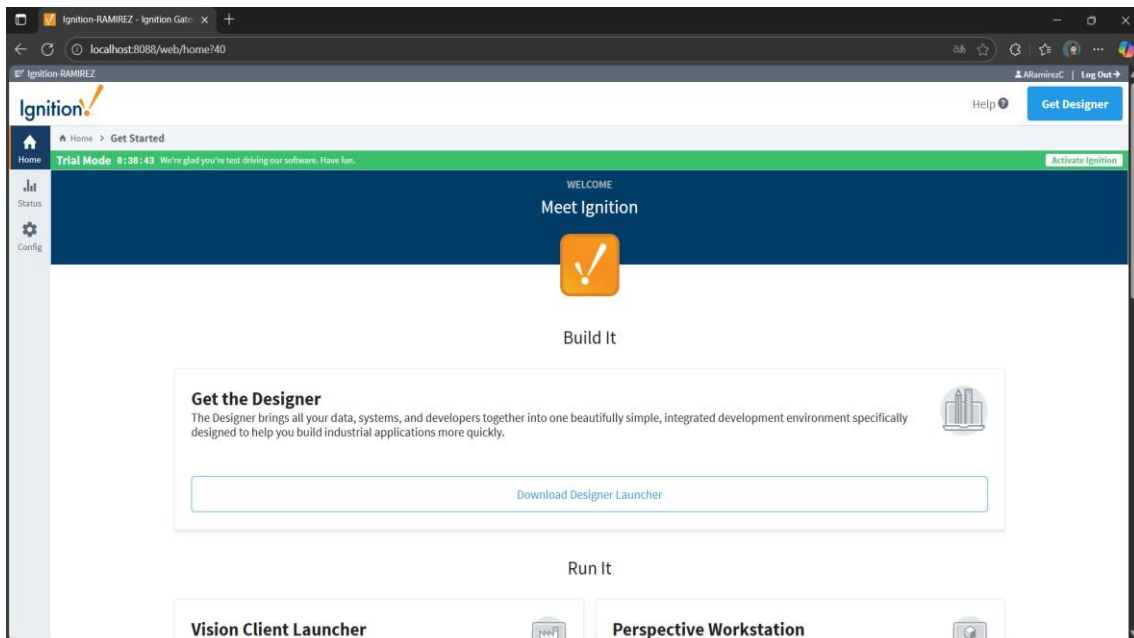


Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo del sistema SCADA, se utilizó la aplicación Ignition Designer, que es el entorno de diseño donde se crean las pantallas, se enlazan las variables y se programan las funciones de supervisión y control. Esta herramienta se descargó de forma directa desde el Ignition Gateway. Asimismo, se accedió al portal web del servidor, seleccionando la opción “Launch Designer” o “Download Designer” y tras descargar el instalador, se instaló la aplicación los equipo de trabajo siguiendo los pasos del asistente. Posterior a ello el sistema Ignition Designer quedó listo para ejecutarse, permitiendo el acceso con las credenciales y así comenzar el diseño del proyecto SCADA asociado al Gateway.

Figura 33.

Descarga desde Gateway de Ignition



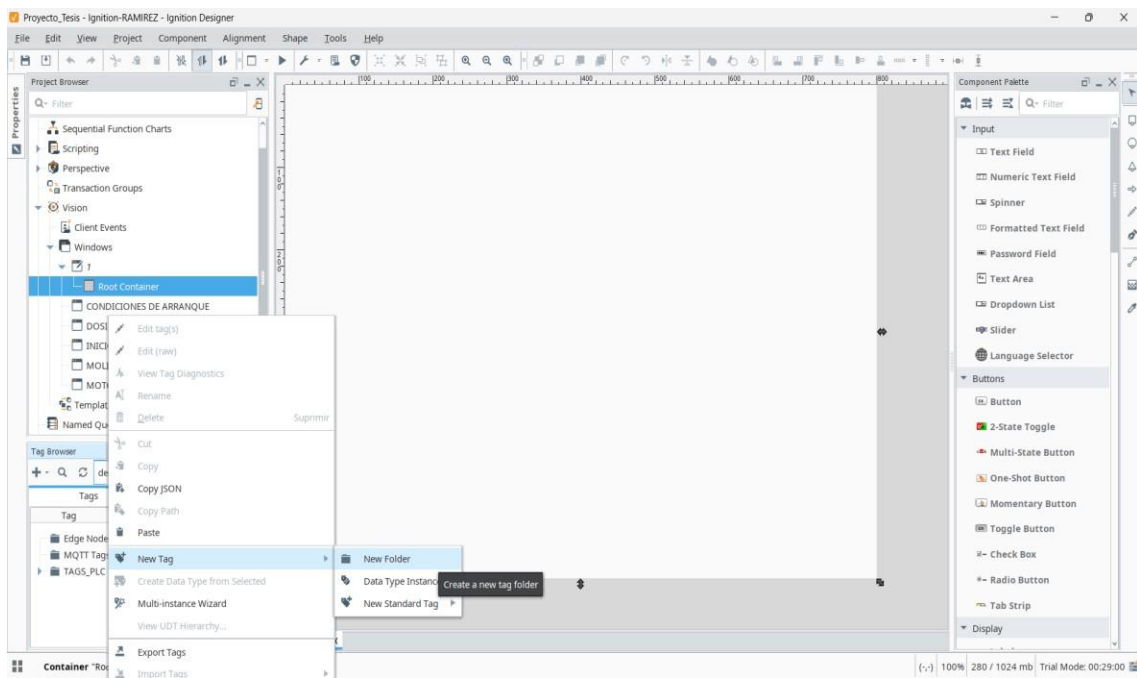
Nota. Elaboración propia

En este contexto, tras la correcta instalación, se abrió la aplicación Ignition Designer. Donde en la pantalla de origen se visualiza una lista de los servidores que están disponibles ya sean detectados en la red o previamente configurados. Allí se ubicó y selecciono el servidor que previamente se había creado en el Gateway de Ignition, identificándose por su nombre o dirección IP para establecer la conexión. Una vez elegido, se ingresó las credenciales de usuario y se ingresó al entorno de diseño del proyecto, donde se crearon las interfaces gráficas para vincular las variables del PLC y desarrollar todas las funciones del sistema SCADA.

Para verificar la conexión del PLC con Ignition, se puede agregar un indicador visual en la pantalla del proyecto, como una lámpara, un display o un medidor, que muestre el estado de una variable proveniente del controlador. Esto permitió confirmar que la comunicación entre el PLC y el servidor OPC UA está activa y que los datos se van actualizando de forma correcta y en tiempo real. Asimismo, en el panel Tag Browser, se genera un nuevo folder para organizar las variables que se emplearán en el sistema SCADA. Por lo cual, dentro de la carpeta se incorporan los tags correspondientes a las señales del PLC, ya sean de lectura (entradas, estados, mediciones) o de escritura (órdenes, comandos, salidas), pues establecer este modelo permite facilitar la gestión de las variables y mantener un proyecto ordenado, siendo aspectos claves en el desarrollo, monitoreo y mantenimiento eficiente del sistema.

Figura 34.

Agregar el Tag Browser



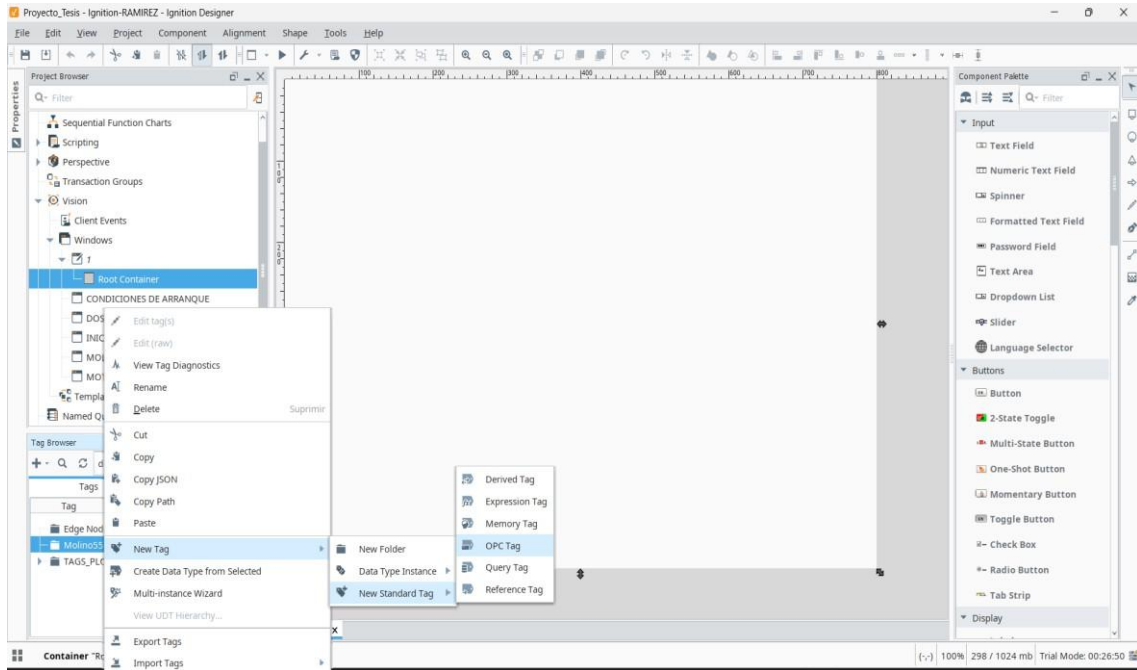
Nota. Elaboración propia

Posterior a la creación del folder en el Tag Browser, se agregó un nuevo tag de tipo OPC haciendo clic derecho sobre la carpeta creada y se selecciona la opción “New Tag” → “OPC Tag”. Asimismo, en la ventana de configuración que aparece, se asignó un nombre descriptivo al tag (por ejemplo, Presión_Tanque o Nivel_Silo) y se esclareció la ruta OPC que apunta a la variable del PLC que se desea vincular, además, se pueden definir ciertos parámetros adicionales como el tiempo de muestreo, el tipo de dato y la

escala de visualización. Y tras configurarlo y guardarlo el tag se conecta de forma automática con el PLC mediante el servidor OPC UA, permitiendo que su valor se actualice en tiempo real en el sistema SCADA.

Figura 35.

Creación del folder

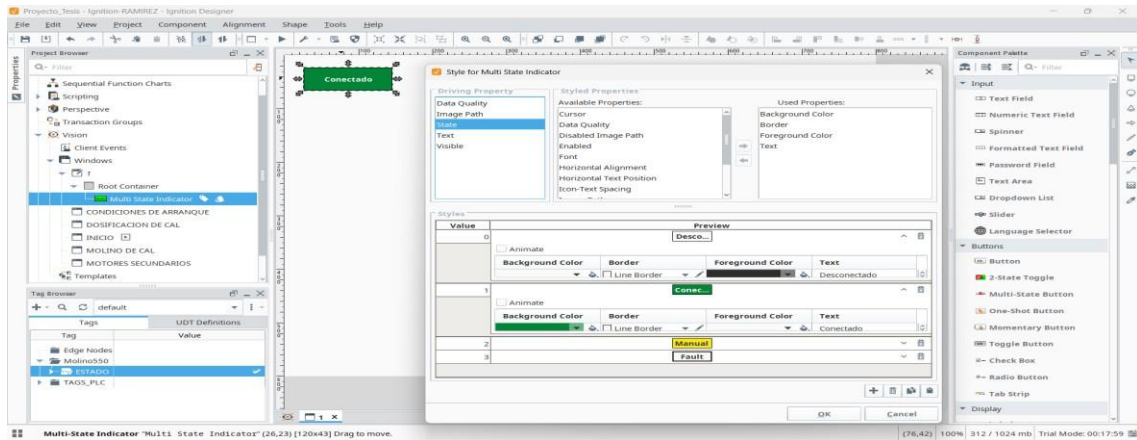


Nota. Elaboración propia

Además, se completaron los apartados necesarios para configurar correctamente el tag OPC creado, definido en primera instancia el Data Type como Boolean, ya que esta variable será de tipo lógico es decir, verdadero o falso, teniendo en consideración que el valor puede variar según el tipo de señal que se desee monitorear. Luego, en el campo OPC Server, se seleccionó a la conexión OPC que se generó por defecto durante la instalación de Ignition para generar una comunicación entre el servidor y los dispositivos conectados. Según ello, en el área de OPC Item Path, se abrió la ventana desplegable para explorar los dispositivos disponibles y se ubicó el PLC agregado con anterioridad y seleccionado la variable Connected, la cual indica si el PLC está correctamente vinculado al sistema Ignition, pues si su valor marca como TRUE significa que la conexión está activa y FALSE implica que no exista comunicación.

Figura 36.

Agregado del Display

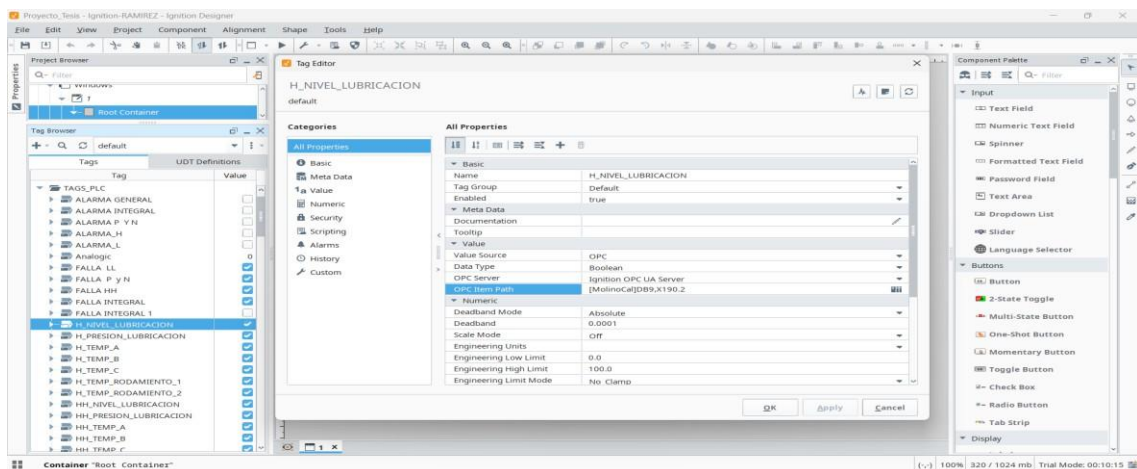


Nota. Elaboración propia

De esta manera, se puede visualizar fácilmente si nuestro PLC está conectado con Ignition, ya que el indicador cambia de color y texto según el estado de la comunicación, ofreciendo una confirmación visual inmediata dentro del entorno SCADA. A continuación, se agregaron todas las variables del PLC al sistema Ignition, continuando y replicando los procedimientos, pues por cada señal o dato del controlador, se crea un nuevo tag de tipo OPC, configurando aspectos como su nombre, tipo de dato, conexión al servidor OPC y ruta de acceso (OPC Item Path). Este procedimiento permite incorporar al proyecto todas las variables necesarias para el monitoreo y control del proceso, asegurando que el sistema SCADA refleje en tiempo real la información proveniente del PLC.

Figura 37.

Agregar todas las variables

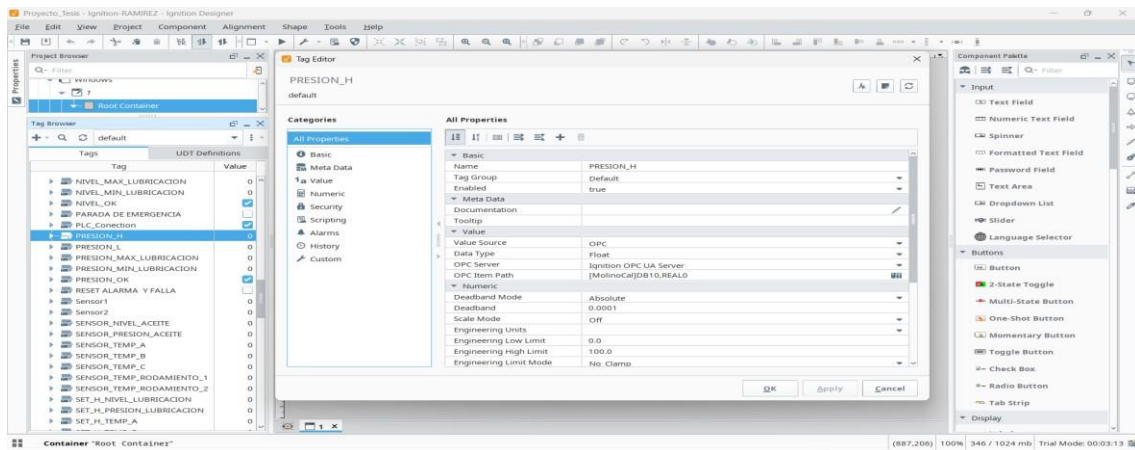


Nota. Elaboración propia

Para agregar una variable booleana, se dirige al apartado OPC Item Path dentro de la configuración del tag. En este campo, se escribe entre corchetes el nombre del dispositivo o PLC que se ha agregado previamente en Ignition, por ejemplo: “[MolinoCal]”, lo que indica que la variable pertenece a ese dispositivo específico. A continuación, se ingresa a la dirección de memoria de la variable dentro del PLC siguiendo el formato “DB9,X190.2”, donde DB9 corresponde al bloque de datos donde se encuentra almacenada la información, y X190.2 identifica la posición exacta de la variable booleana dentro de dicho bloque.

Figura 38.

Dirección de las variables



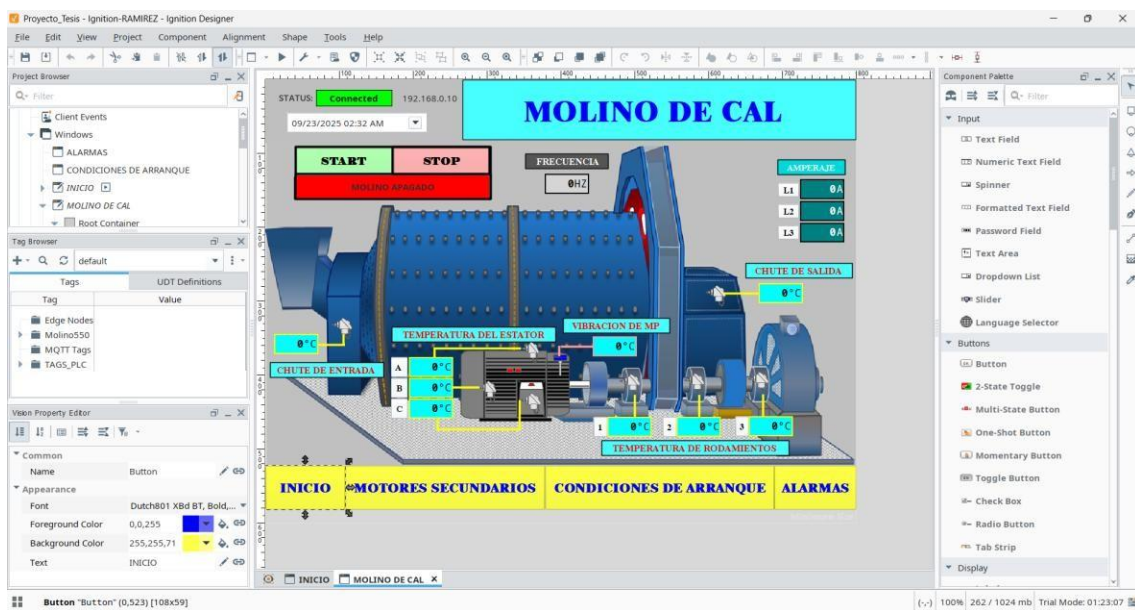
Nota. Elaboración propia

Para agregar una variable de tipo Real, primero se configura el Data Type como “Float”, ya que este tipo de dato permite manejar valores numéricos con decimales, típicos de variables analógicas como temperatura, presión o caudal. En el campo OPC Item Path, se escribe entre corchetes el nombre del dispositivo o PLC agregado previamente en Ignition, por ejemplo “[MolinoCal]”, indicando que la variable pertenece a ese controlador. Luego, se ingresa a la dirección de la variable siguiendo el formato “DB10,REAL0”, donde DB10 corresponde al bloque de datos del PLC en el que se encuentra almacenada la información, y REAL0 representa la posición de la variable de tipo Real dentro de dicho bloque. Esta configuración permite que el sistema SCADA lea correctamente los valores analógicos del PLC y los muestre en tiempo real dentro de las pantallas del Ignition Designer.

En el diseño de la pantalla principal del molino, se desarrolla una interfaz gráfica donde se visualizan las variables más relevantes del proceso, tales como la temperatura, la frecuencia y el amperaje del equipo. Además, la pantalla desempeña la función de monitoreo en tiempo real, pues permite al operador visualizar el comportamiento del molino y detectar de manera anticipada a las posibles anomalías en su funcionamiento. Para esto, se adicionan indicadores numéricos, gráficos analógicos, barras de progreso o medidores circulares, cada uno vinculado a los tags correspondientes del PLC mediante el servidor OPC UA de Ignition. Asimismo, se incluyen aspectos como las etiquetas descriptivas, unidades de medida y colores que cambian según los valores de las variables para facilitar la lectura e interpretación visual del estado operativo del molino y contribuir a una supervisión más segura y eficiente del proceso industrial.

Figura 39.

Diseño de la pantalla principal del molino desde Ignition



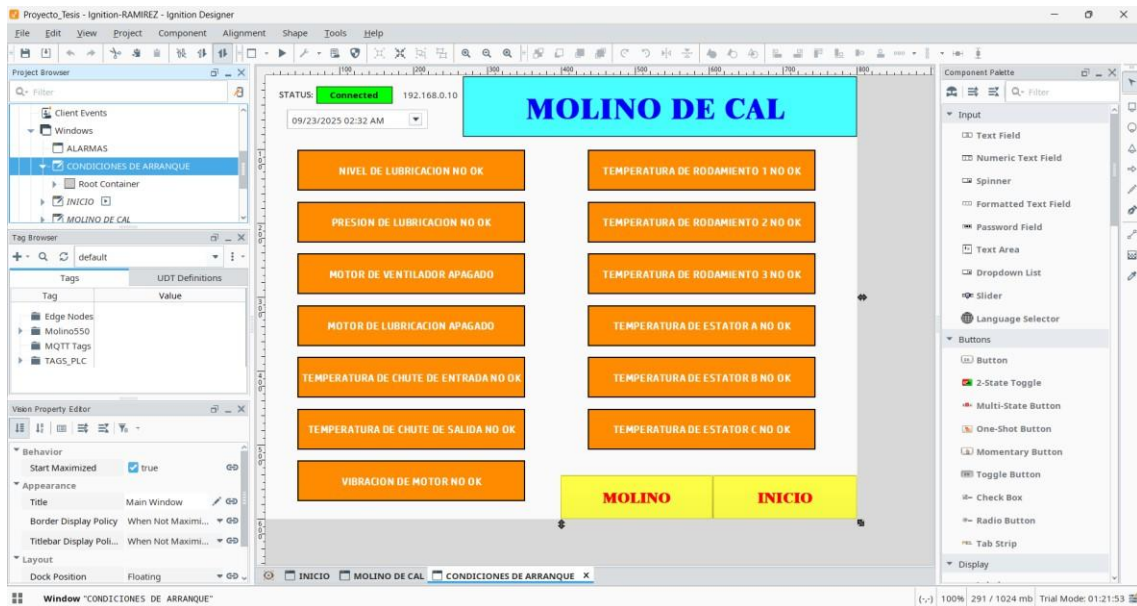
Nota. Elaboración propia

Además, dentro del diseño de la pantalla de condiciones iniciales, se crea una interfaz para verificar el estado de las condiciones necesarias para dar inicio a los procesos del molino. En este apartado se visualizan las diferentes variables o señales de seguridad y preparación, como son la disponibilidad de energía, la presión del sistema, el estado de los sensores, el nivel de materiales o la confirmación de dispositivos auxiliares. Cada condición se representa mediante indicadores visuales (por ejemplo, luces o displays) que cambian de color y texto según su estado: verde para “cumplido” y rojo o gris para “no

cumplido”. De esta manera, el operador puede comprobar fácilmente si el sistema está listo para iniciar el proceso o si existe alguna condición pendiente. Esta pantalla es fundamental para garantizar la seguridad y correcta secuencia de arranque del sistema SCADA del molino.

Figura 40.

Diseño de pantalla de condiciones desde Ignition

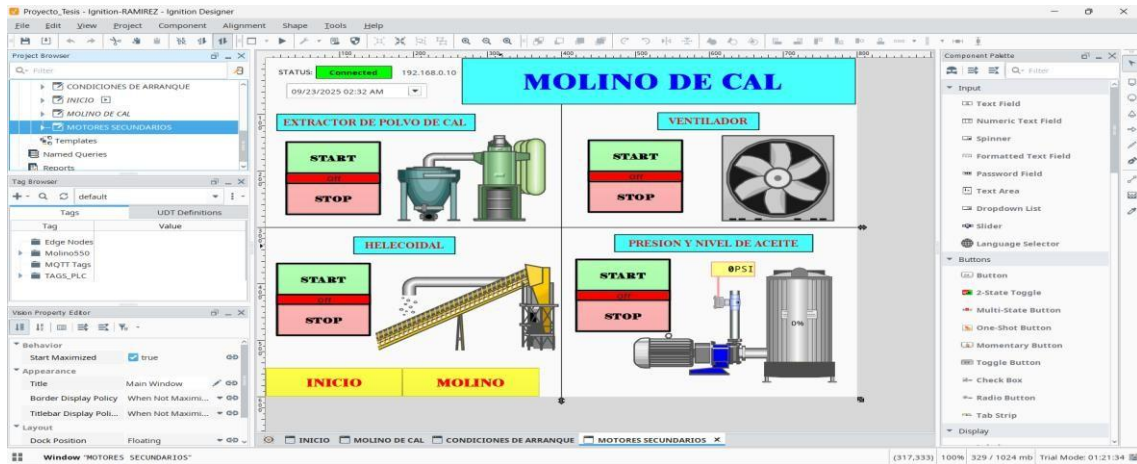


Nota. Elaboración propia

En el diseño de la pantalla para el encendido y apagado de motores secundarios o auxiliares, se desarrolla una interfaz que permite controlar y supervisar el estado operativo de los motores complementarios del sistema, como ventiladores, bombas, alimentadores o cintas transportadoras. Esta pantalla incluye botones de encendido y apagado (Start/Stop) vinculados directamente a las variables de control del PLC mediante tags OPC, lo que permite enviar órdenes en tiempo real desde el entorno SCADA. Además, se incorporan indicadores visuales que muestran el estado actual de cada motor (encendido, apagado o en fallo), utilizando colores representativos como verde para encendido, rojo para apagado y amarillo para alarma o falla. También se pueden añadir etiquetas con los nombres de cada equipo y lecturas de variables asociadas, como corriente o temperatura, brindando al operador una visión completa y segura del control de los motores auxiliares dentro del sistema SCADA.

Figura 41.

Diseño de pantalla de encendido y apagado de motores auxiliares desde Ignition

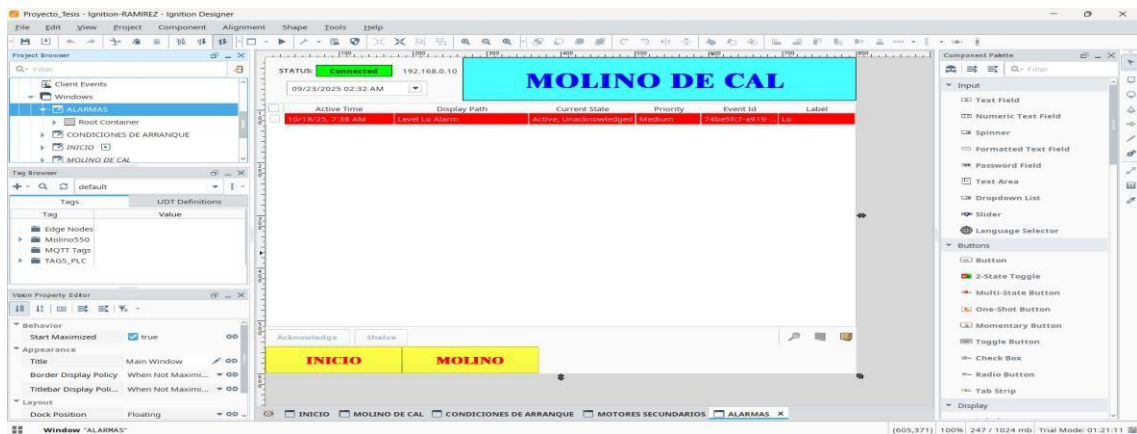


Nota. Elaboración propia

En el diseño de la pantalla de alarmas, se implementa una interfaz dedicada a la supervisión y gestión de eventos críticos o anómalos dentro del sistema SCADA. Esta pantalla permite al operador visualizar en tiempo real las alarmas activas, junto con información relevante como la descripción del evento, la fecha y hora de ocurrencia, la prioridad y el estado de reconocimiento. Para su construcción, se utiliza el componente de Alarm Journal Table o Alarm Status Table de Ignition, que muestra las alarmas generadas a partir de las condiciones configuradas en los tags del PLC. Además, se pueden incorporar indicadores visuales o sonoros que alerten al operador cuando ocurre una alarma, y botones para reconocer o restablecer las mismas una vez solucionado el problema.

Figura 42.

Diseño de la pantalla de alarmas desde Ignition

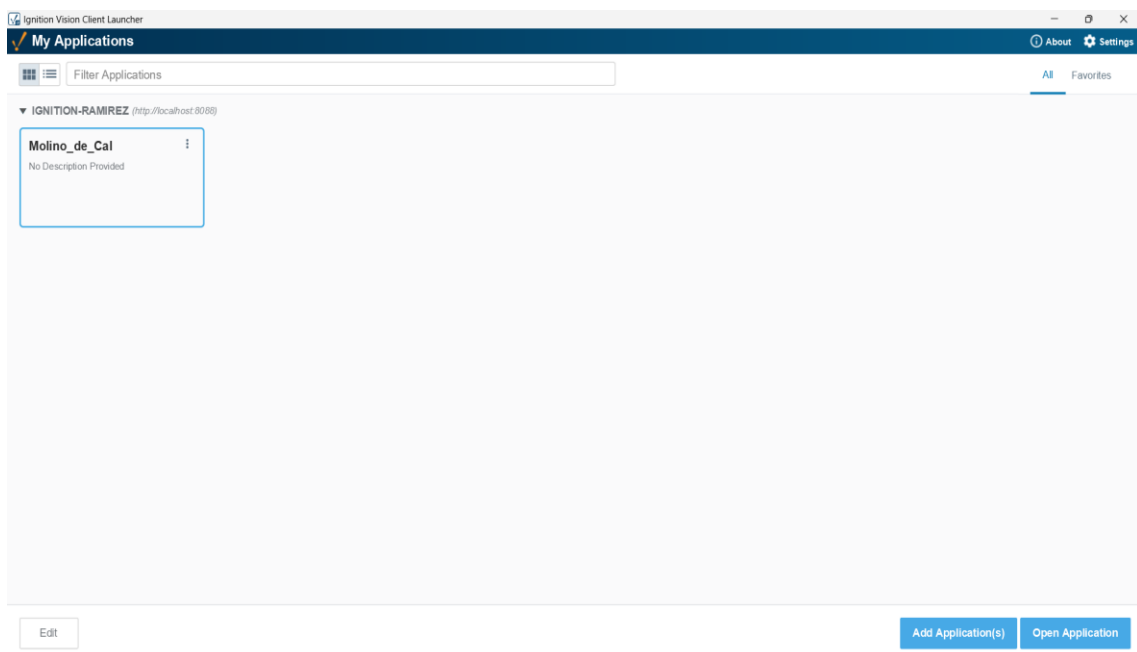


Nota. Elaboración propia

Para visualizar y ejecutar el sistema SCADA, se instala la aplicación Vision Client Launcher de Ignition, la cual permite abrir los proyectos creados en el módulo Visión directamente desde el entorno del cliente. Una vez que se completó la instalación, se abre la aplicación la cual permite detectar de forma automática los proyectos que se hallan disponibles en el servidor Gateway. Según ello, se selecciona el proyecto SCADA generado y, si es necesario, se ingresan las credenciales de usuario para acceder. Al iniciar, se despliega la interfaz operativa del sistema, en el cual, se visualizan las pantallas diseñadas para monitorear las variables del proceso, así como ejecutar el controlar los dispositivos y observar las alarmas en tiempo real.

Figura 43.

Aplicación Vision Cliente Launcher de Ignition



Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo del webservice remoto de nuestro sistema, se procedió a la instalación de Node-RED, una herramienta basada en flujos que permite integrar y gestionar componentes de hardware y software de manera eficiente. Una vez completada la instalación, el servidor se ejecutó desde la consola de comandos (cmd), habilitando la interfaz gráfica para la configuración y control remoto del sistema a través de la red.

Figura 44.

Instalación de node-red

```
node-red
Microsoft Windows [Versión 10.0.26100.6899]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\ramir>node-red
10 Nov 15:16:14 - [info]

Welcome to Node-RED
=====

10 Nov 15:16:14 - [info] Node-RED version: v4.0.9
10 Nov 15:16:14 - [info] Node.js version: v22.16.0
10 Nov 15:16:14 - [info] Windows_NT 10.0.26100 x64 LE
10 Nov 15:16:14 - [info] Loading palette nodes

-----
Warning:
node-opcua-client-crawler module has been deprecated and is not maintained anymore.
Please use '@sterfive/crawler' instead.
'@sterfive/crawler' is available to the NodeOPCUA Subscription members
-----

10 Nov 15:16:17 - [info] Dashboard version 3.6.5 started at /ui
10 Nov 15:16:17 - [info] Settings file : C:\Users\ramir\.node-red\settings.js
10 Nov 15:16:17 - [info] Context store : 'default' [module=memory]
10 Nov 15:16:17 - [info] User directory : \Users\ramir\.node-red
10 Nov 15:16:17 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
10 Nov 15:16:17 - [info] Flows file : \Users\ramir\.node-red\flows.json
10 Nov 15:16:17 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----

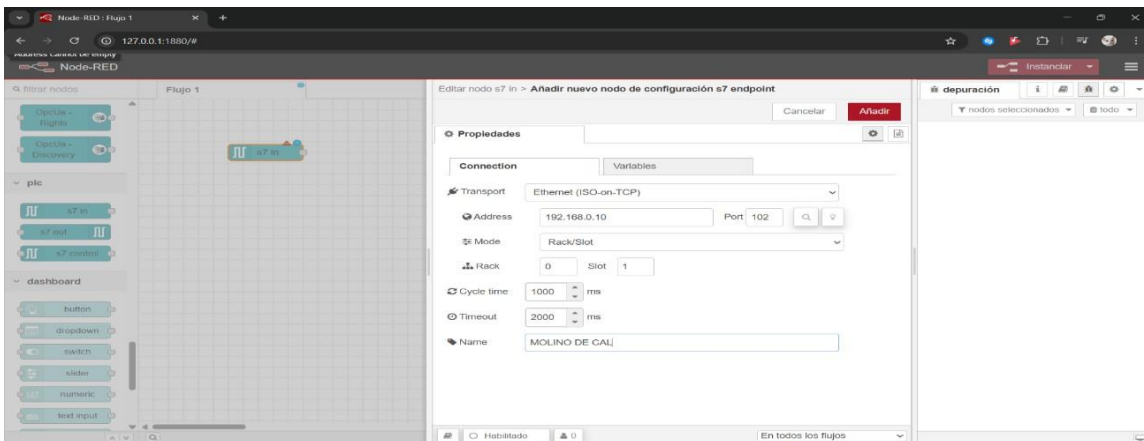
10 Nov 15:16:17 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
10 Nov 15:16:17 - [info] Starting flows
```

Nota. Elaboración propia

Se agregó el PLC al entorno de Node-RED para establecer la conexión directa con el sistema. En esta etapa se configuraron los parámetros de comunicación, como la dirección IP y el tipo de dispositivo, permitiendo el intercambio de datos entre el controlador lógico programable y la plataforma de control remoto.

Figura 45.

Incorporación del PLC

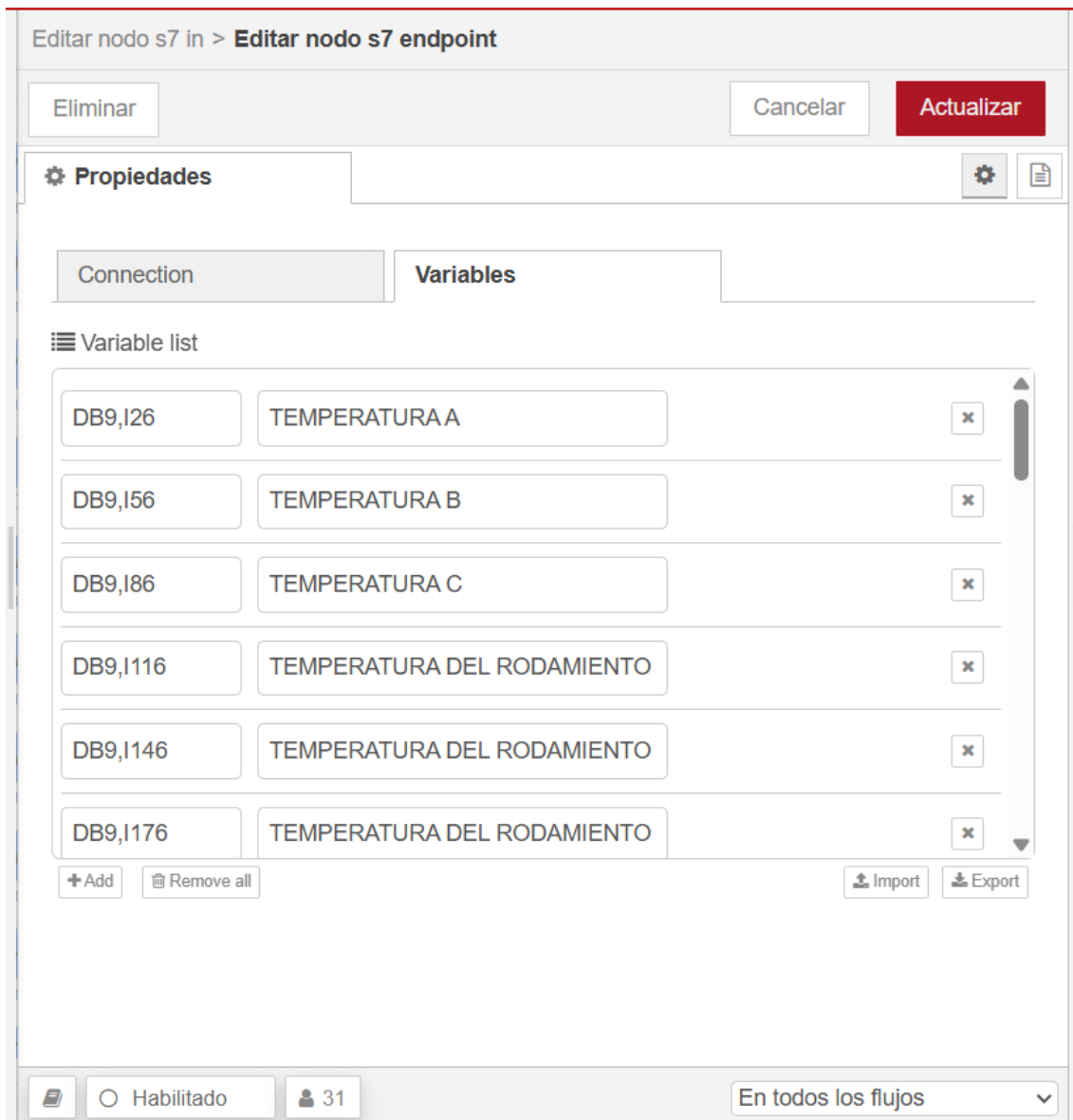


Nota. Elaboración propia

Se incorporaron todas las variables necesarias dentro del entorno de Node-RED, definiendo los parámetros que permitirían la lectura y escritura de datos entre el PLC y el sistema. Esta configuración facilitó el monitoreo y control de cada proceso en tiempo real, garantizando una comunicación eficiente y confiable.

Figura 46.

Incorporación de variables

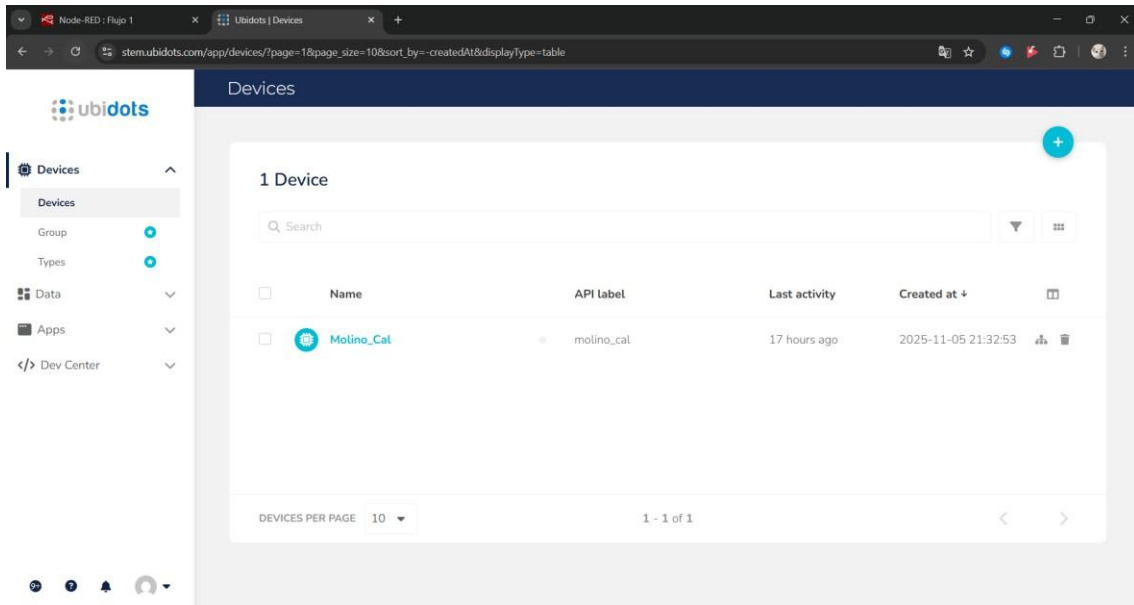


Nota. Elaboración propia

Dentro de la plataforma Ubidots, se procedió a agregar el dispositivo correspondiente al sistema, configurándolo como el punto central para recibir y organizar los datos enviados desde Node-RED. Con esta incorporación, fue posible estructurar las variables y habilitar su monitoreo en tiempo real.

Figura 47.

Adición del dispositivo propio

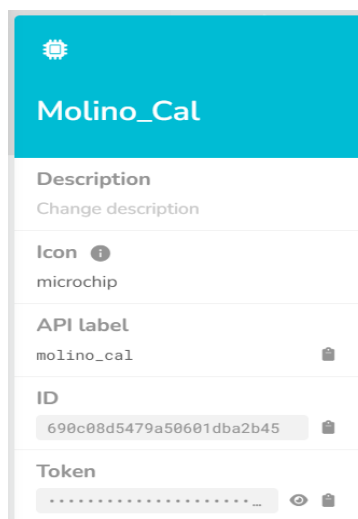


Nota. Elaboración propia

Al añadir el dispositivo en Ubidots, la plataforma generó automáticamente una etiqueta (label) y un token de autenticación. Estos elementos resultan esenciales, ya que permiten identificar el dispositivo dentro del sistema.

Figura 48.

Generación de a etiqueta y token

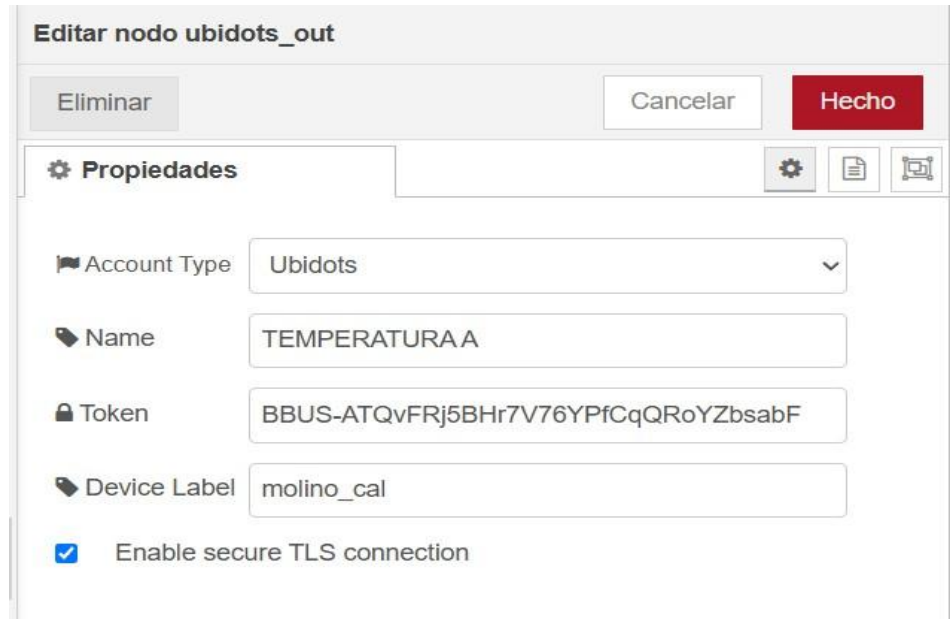


Nota. Elaboración propia

Se configuró la conexión de Ubidots en Node-RED, añadiendo un nodo para cada una de las variables del sistema. En cada nodo se ingresaron la etiqueta del dispositivo y el token de autenticación generados en Ubidots.

Figura 49.

Conexión de Ubidots a node-red

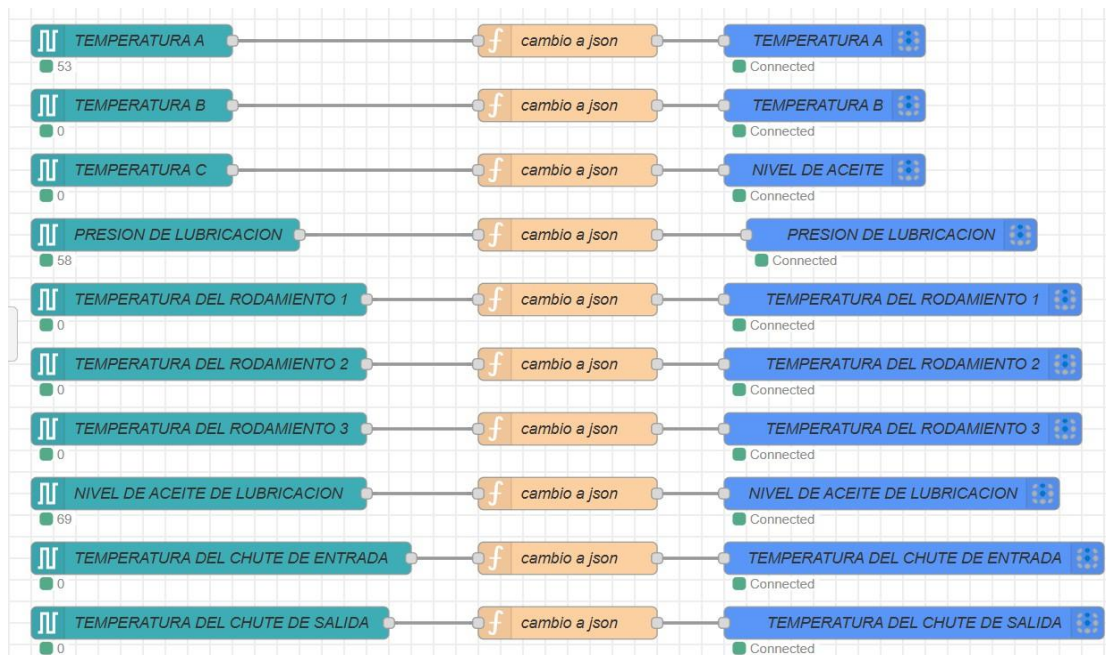


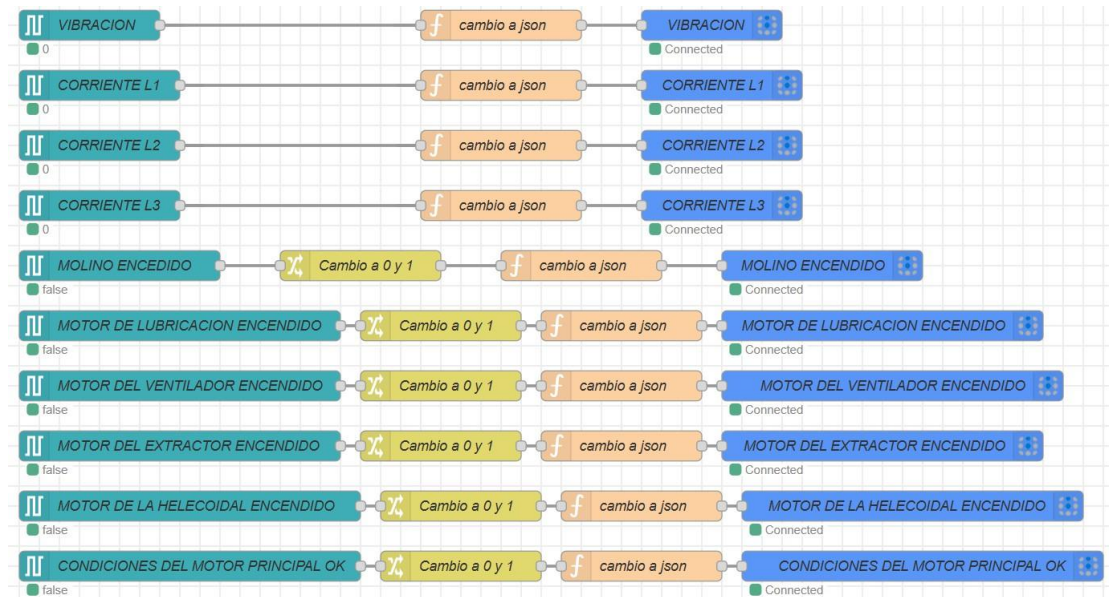
Nota. Elaboración propia

Se desarrolló el flujo completo en Node-RED, incorporando los nodos necesarios para leer y escribir variables entre Ubidots y el PLC. Esta integración permitió establecer un intercambio de datos en tiempo real, asegurando que la información del sistema pudiera ser monitoreada y controlada de manera remota de forma eficiente.

Figura 50.

Creación de flujo en node-red



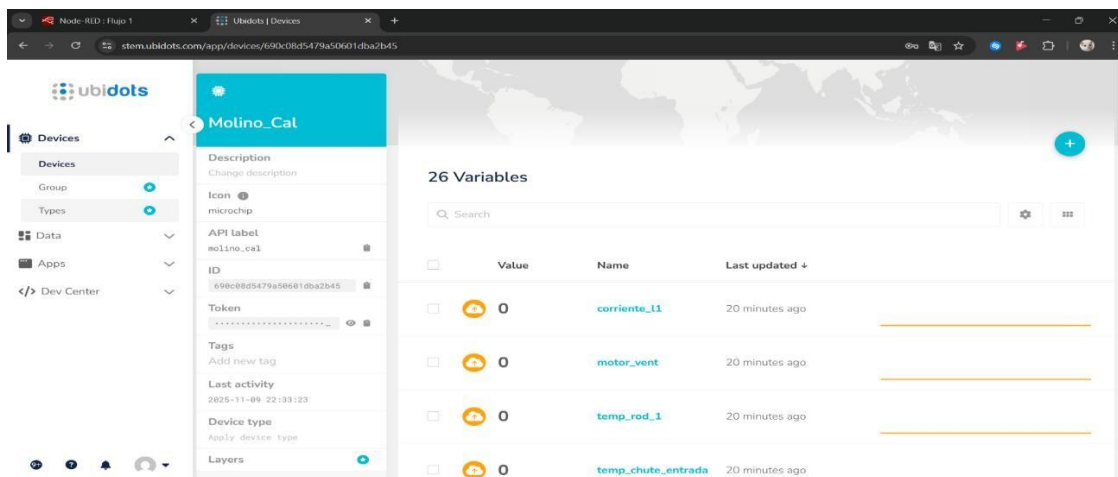


Nota. Elaboración propia

En Ubidots se visualizaron automáticamente las variables creadas desde los nodos configurados en Node-RED, permitiendo monitorear en tiempo real los datos enviados por el sistema. De esta manera, cada variable quedó disponible para su uso en paneles, gráficos y dashboards dentro de la plataforma.

Figura 51.

Visualización de variables desde los nodos

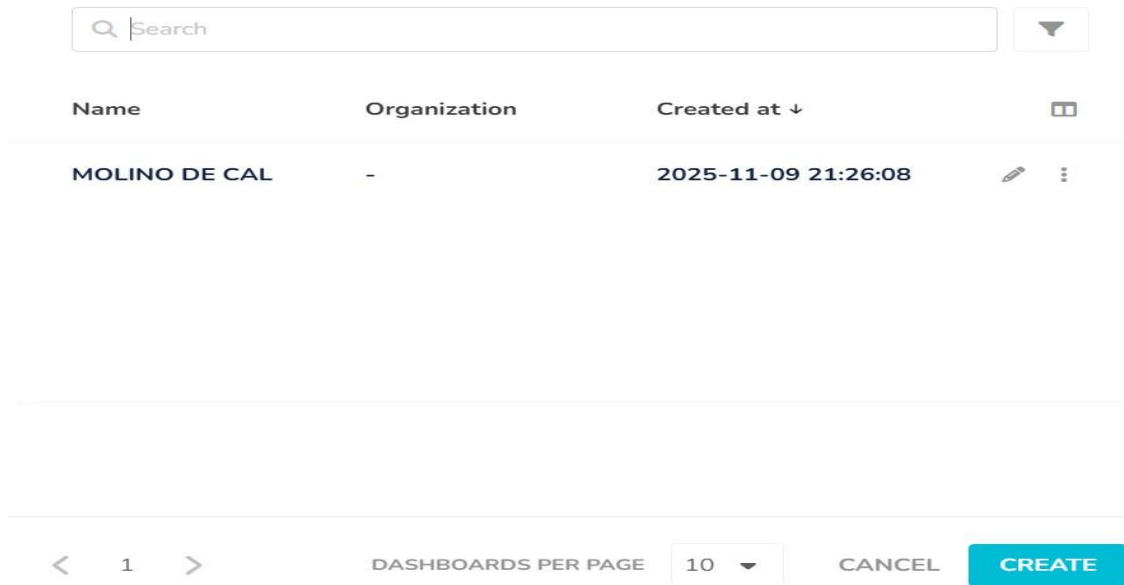


Nota. Elaboración propia

Se procedió a crear el dashboard dentro de la plataforma Ubidots, configurando los widgets necesarios para visualizar de manera clara y ordenada las variables enviadas desde Node-RED. Este panel permitió monitorear el comportamiento del sistema en tiempo real y facilitar la interpretación de los datos operativos.

Figura 52.

Creación del dashboard

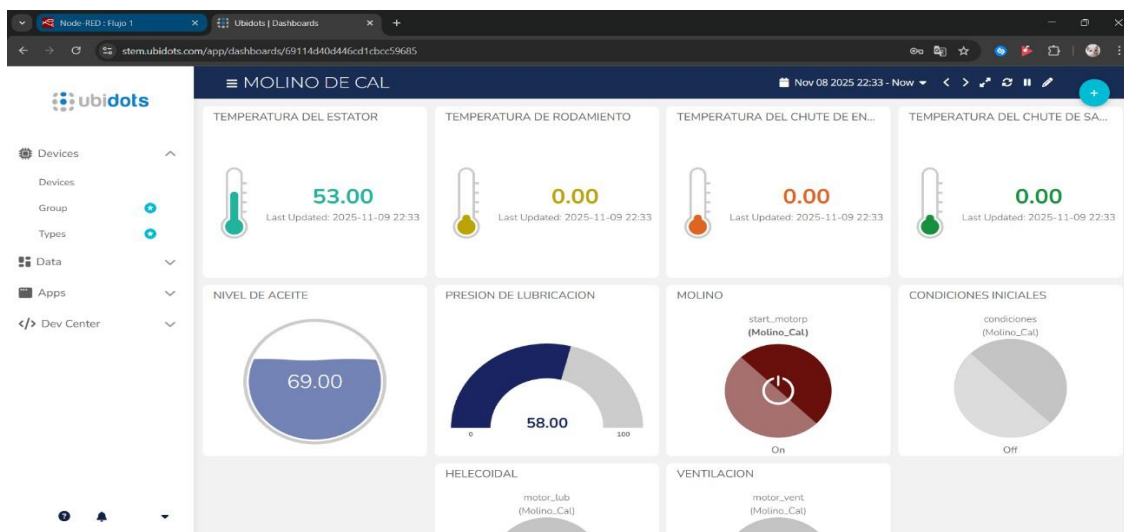


Nota. Elaboración propia

Se añadieron los widgets necesarios dentro del dashboard de Ubidots, incorporando las variables que se deseaba visualizar, como temperatura, presión, nivel, así como botones de control e indicadores de estado. Con ello, se obtuvo una interfaz clara y funcional para supervisar y operar el sistema de manera remota.

Figura 53.

Incorporación del Widget



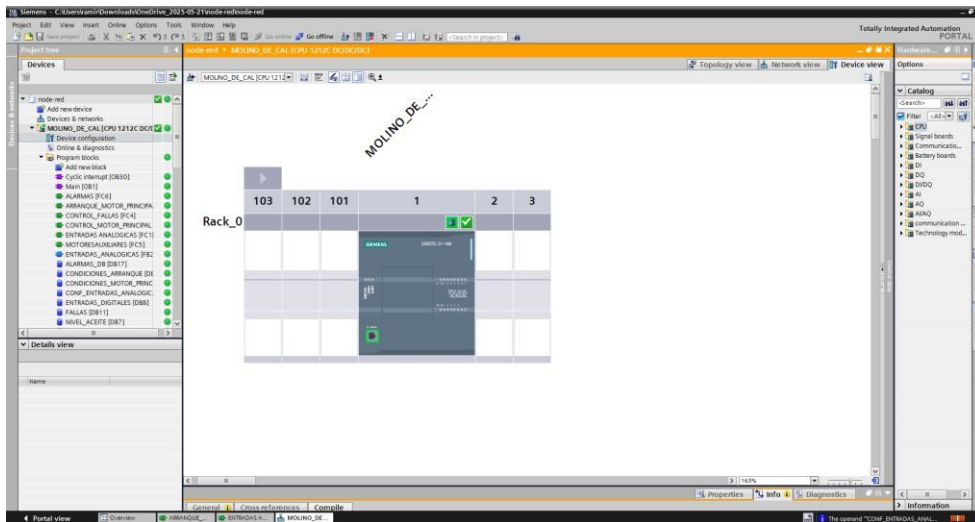
Nota. Elaboración propia

4.5. Validar el funcionamiento del sistema automatizado propuesto mediante pruebas en un entorno simulado.

Se estableció la conexión con el PLC y accedió en modo online para ejecutar la simulación del proyecto, ingresando posteriormente al bloque de entradas analógicas con el fin de parametrizar las variables de lectura correspondientes a los sensores de temperatura, nivel y al transmisor de presión. Para cada canal analógico se asignaron valores referenciales dentro del rango operativo de 0 a 27648 unidades digitales, definiendo además los valores mínimos y máximos requeridos según las características y escalamiento de cada instrumento.

Figura 54.

Incorporación de valores referenciales en las variables

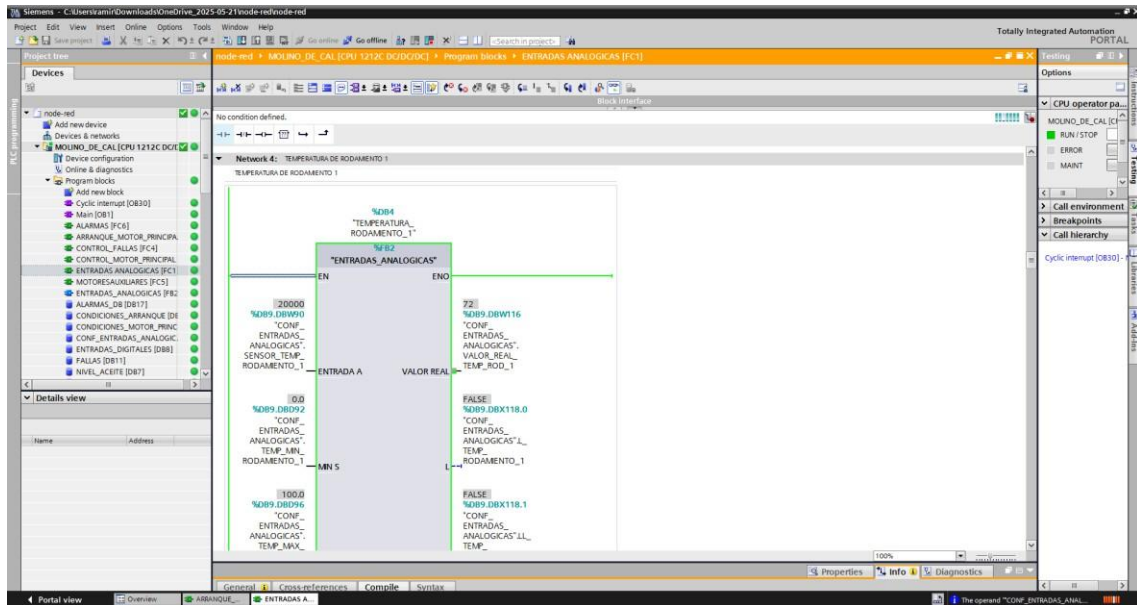


Nota. Elaboración propia

Para la medición de la temperatura de los estatores A, B y C del motor principal, se configuró la variable de lectura correspondiente ingresando los valores de operación habituales de los sensores térmicos, considerando que las condiciones de instalación en cada fase presentan prácticamente el mismo comportamiento térmico, lo que permite aplicar un rango de parametrización uniforme para los tres estatores.

Figura 55.

Temperatura de estatores A, B, C de motor principal

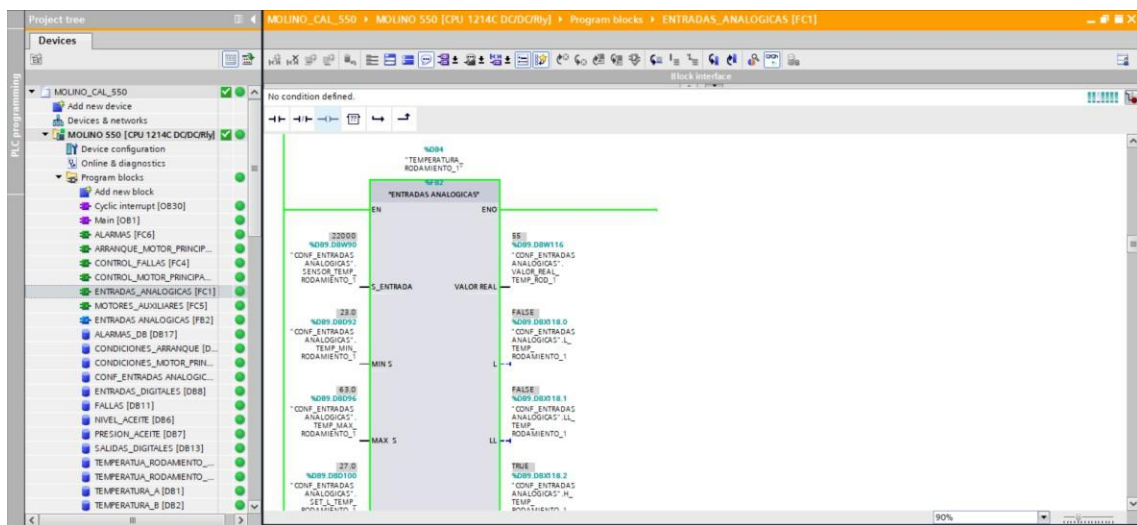


Nota. Elaboración propia

Para la medición de la temperatura de los rodamientos 1, 2 y 3, se configuraron las variables de lectura considerando que cada rodamiento se encuentra ubicado en una posición distinta dentro del conjunto mecánico, lo cual genera variaciones térmicas propias de su ubicación y carga dinámica; por ello, se asignaron rangos de temperatura diferenciados según el comportamiento esperado en cada punto de medición.

Figura 56.

Temperatura de rodamiento 1, 2, 3

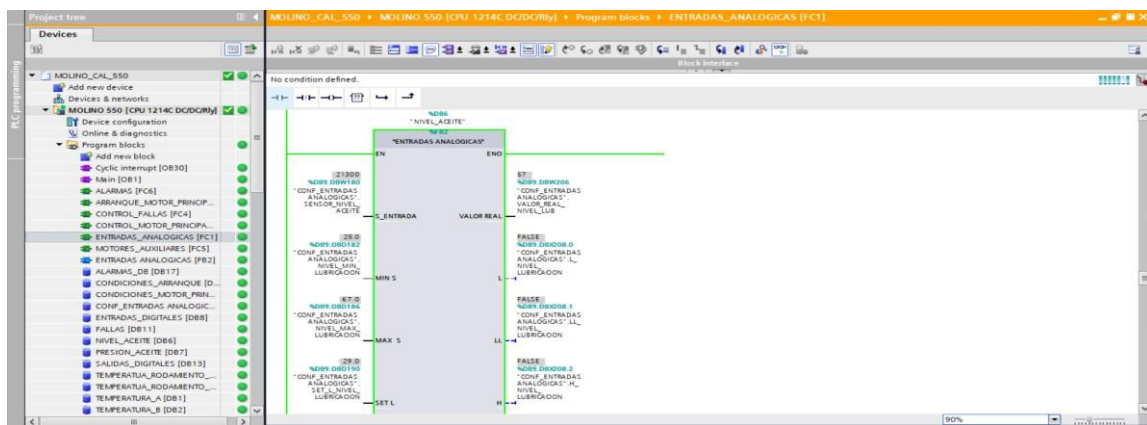


Nota. Elaboración propia

Para la supervisión del nivel del tanque de lubricante, se parametrizó la variable de lectura correspondiente al sensor de nivel, asignando el rango operativo definido por el fabricante e incorporando los valores mínimos y máximos requeridos para asegurar una detección precisa del volumen disponible; de esta manera se garantiza el monitoreo continuo del estado del lubricante y se previenen condiciones de operación fuera de los límites establecidos.

Figura 57.

Nivel de tanque de lubricante

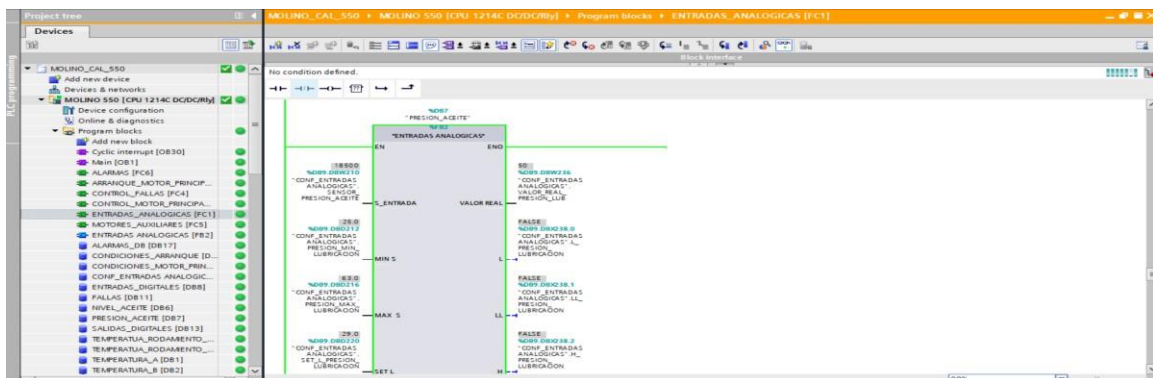


Nota. Elaboración propia

Para la medición de la presión del aceite de lubricación, se configuró la variable de lectura del transmisor de presión asignando el rango operativo establecido para el sistema, incorporando los valores mínimos y máximos necesarios para garantizar una detección precisa de las condiciones hidráulicas; esto permite supervisar de manera continua la presión real del circuito de lubricación y asegurar que el motor opere dentro de los límites adecuados para evitar fallas por lubricación insuficiente.

Figura 58.

Presión de aceite de lubricación

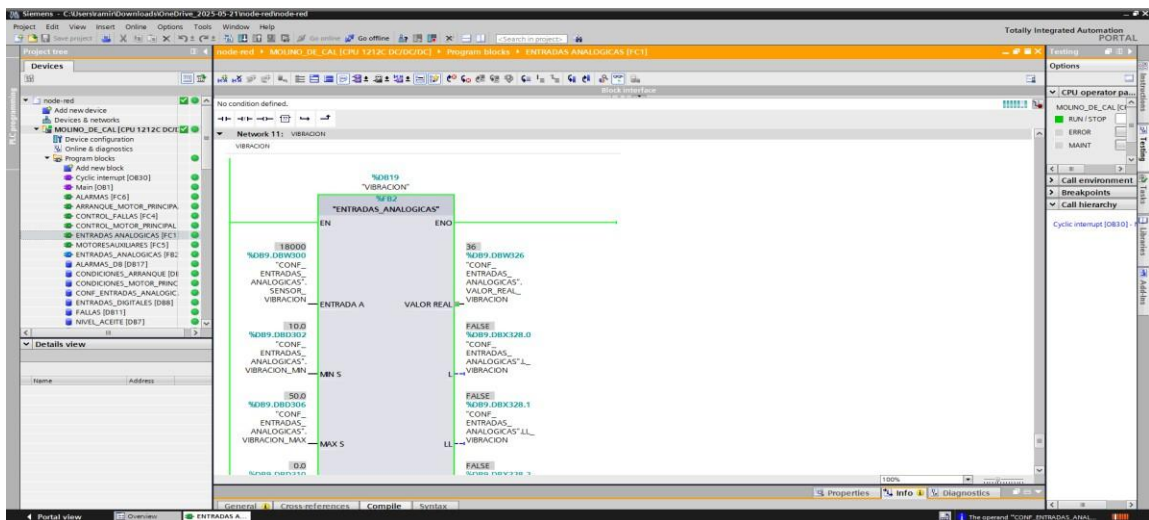


Nota. Elaboración propia

Para la supervisión de la vibración, se configuró la variable de lectura asociada al sensor vibratorio, estableciendo el rango operativo y los umbrales permitidos de acuerdo con las especificaciones del sistema y los niveles de severidad aceptados para el equipo; con ello se garantiza la detección temprana de incrementos anómalos de vibración que puedan indicar desbalances, desalineaciones o fallas incipientes en los componentes mecánicos.

Figura 59.

Vibración

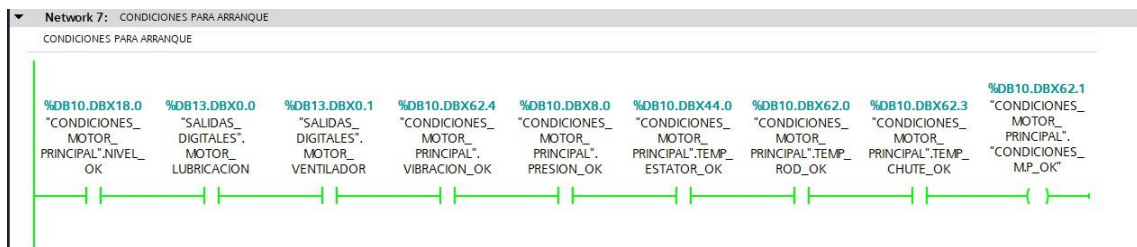


Nota. Elaboración propia

Luego de obtener la lectura de las variables analógicas y de habilitar los motores auxiliares, es posible verificar en el sistema si las condiciones iniciales requeridas para el arranque han sido cumplidas, permitiendo así autorizar el encendido del motor principal del molino bajo parámetros seguros y dentro de los límites operativos establecidos.

Figura 60.

Encendido de motores auxiliares del sistema

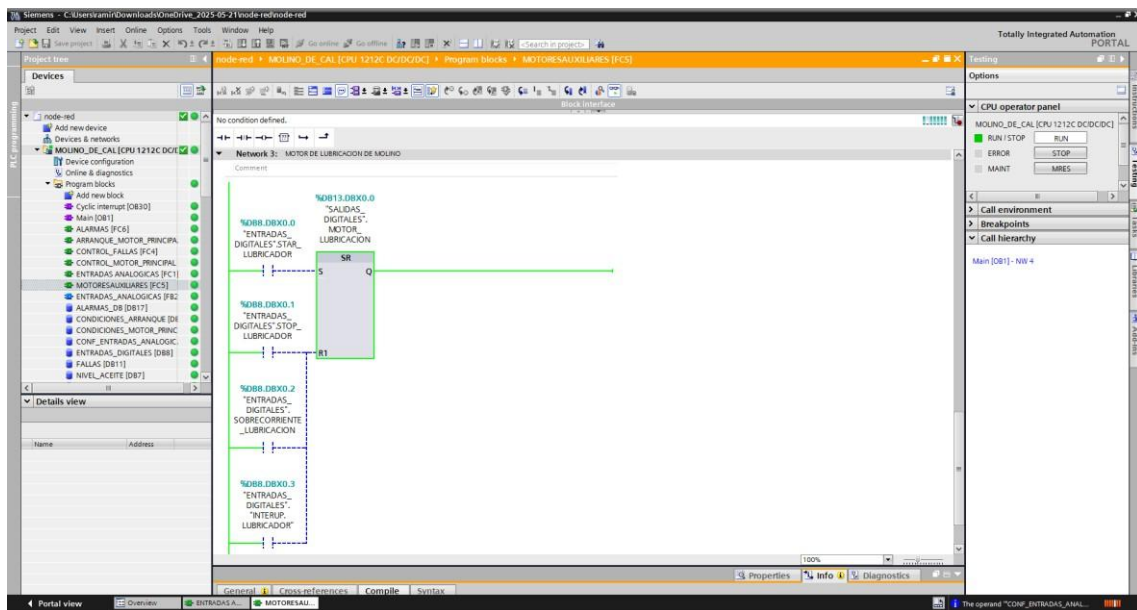


Nota. Elaboración propia

El control de los motores secundarios se realiza mediante la activación secuencial y supervisada de cada equipo, verificando previamente sus condiciones de operación y los valores de las variables asociadas. Cada motor es habilitado conforme a los parámetros establecidos en el sistema de automatización, garantizando el funcionamiento adecuado de los subsistemas auxiliares que permiten mantener condiciones óptimas de limpieza, lubricación y ventilación antes y durante la operación del motor principal del molino.

Figura 61.

Control de motores

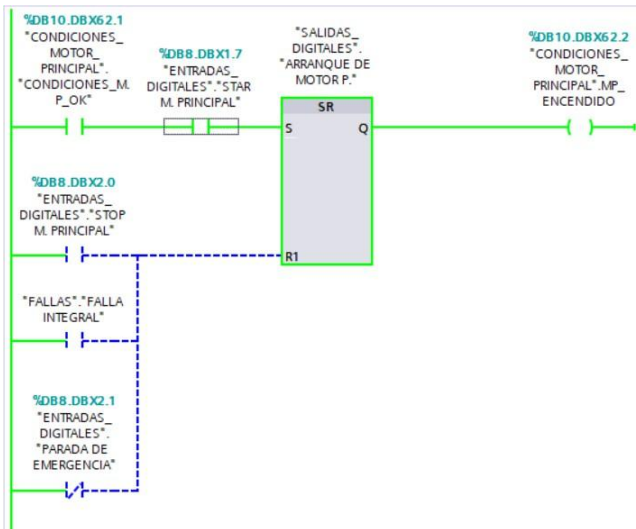


Nota. Elaboración propia

Cuando todos los sensores se encuentran dentro de sus rangos normales de operación y los motores secundarios están plenamente habilitados, el sistema autoriza la secuencia de arranque del molino principal, garantizando que las condiciones de operación sean seguras y que los subsistemas auxiliares estén funcionando adecuadamente antes de aplicar carga al equipo.

Figura 62.

Sensores dentro de los rangos

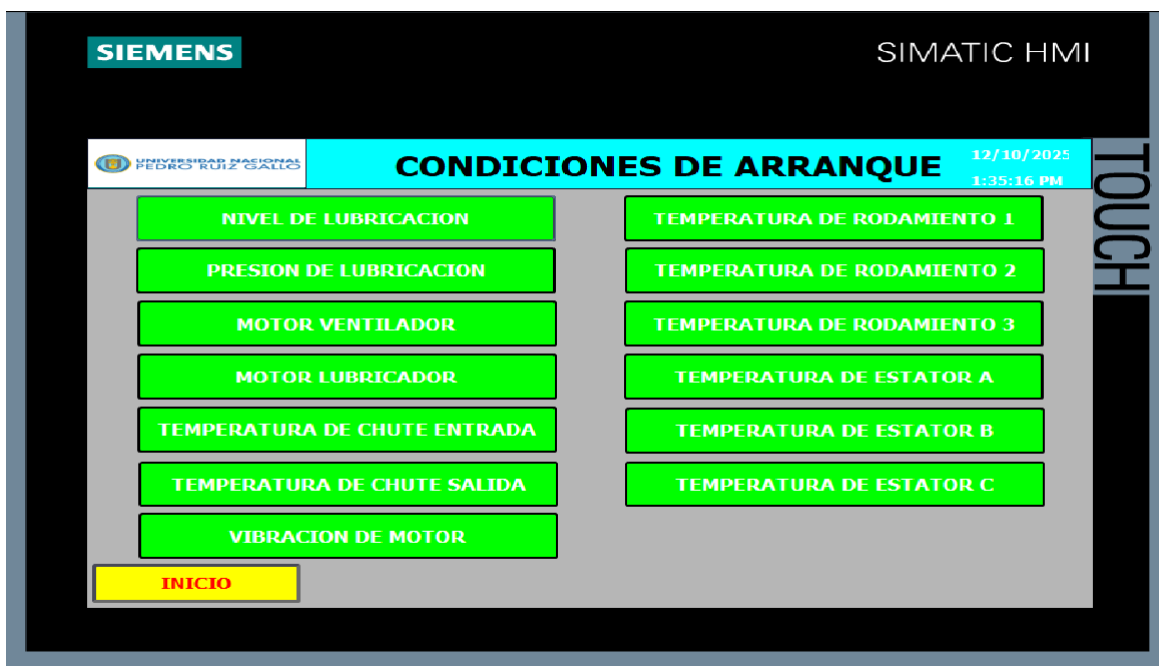


Nota. Elaboración propia

En el HMI, antes de ejecutar la orden de arranque, se verifica que todas las condiciones requeridas por la secuencia de inicio se encuentren cumplidas, confirmando el estado adecuado de los sensores, la habilitación de los motores secundarios y el cumplimiento de los parámetros operativos necesarios para autorizar el arranque del sistema.

Figura 63.

Condiciones de arranque

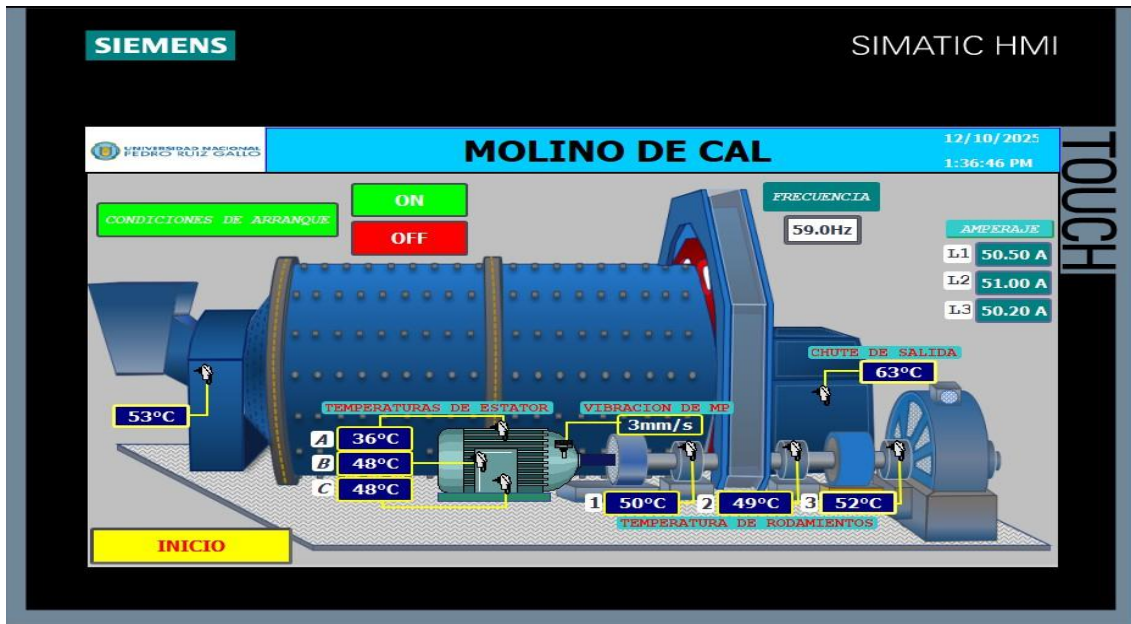


Nota. Elaboración propia

Una vez ejecutado el arranque, el operador puede visualizar en la pantalla del HMI todas las variables asociadas al funcionamiento del molino, incluyendo lecturas de temperatura, presión, vibración, nivel y el estado de los motores auxiliares, permitiendo un monitoreo continuo y en tiempo real de las condiciones operativas del sistema.

Figura 64.

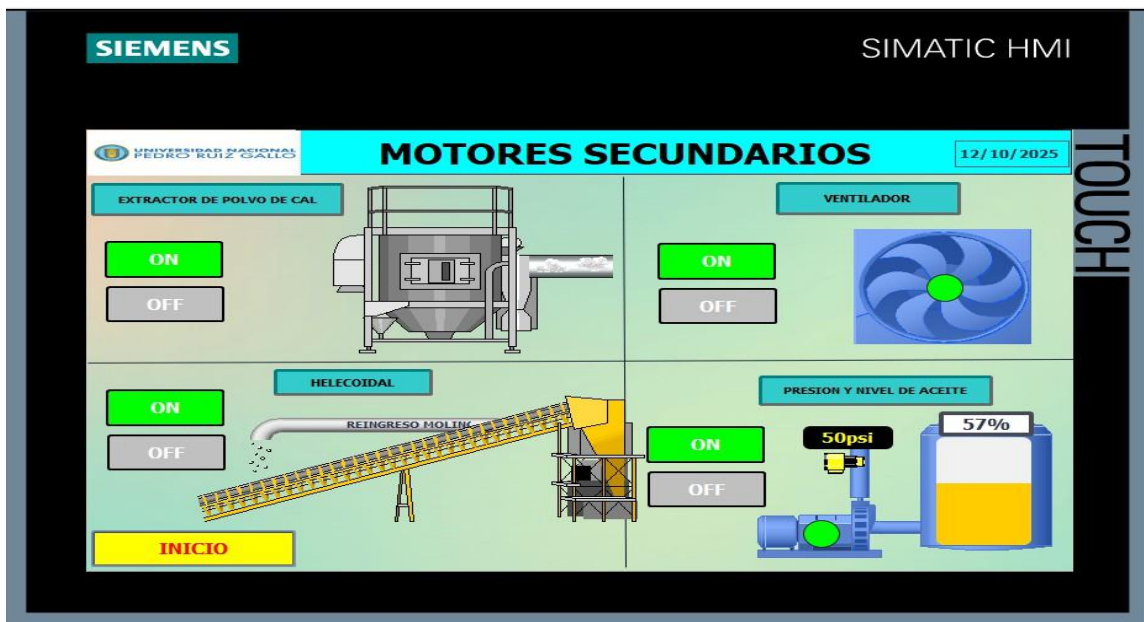
Rangos de las variables del molino de cal



Nota. Elaboración propia

Figura 65.

Rangos de las variables de los motores secundarios

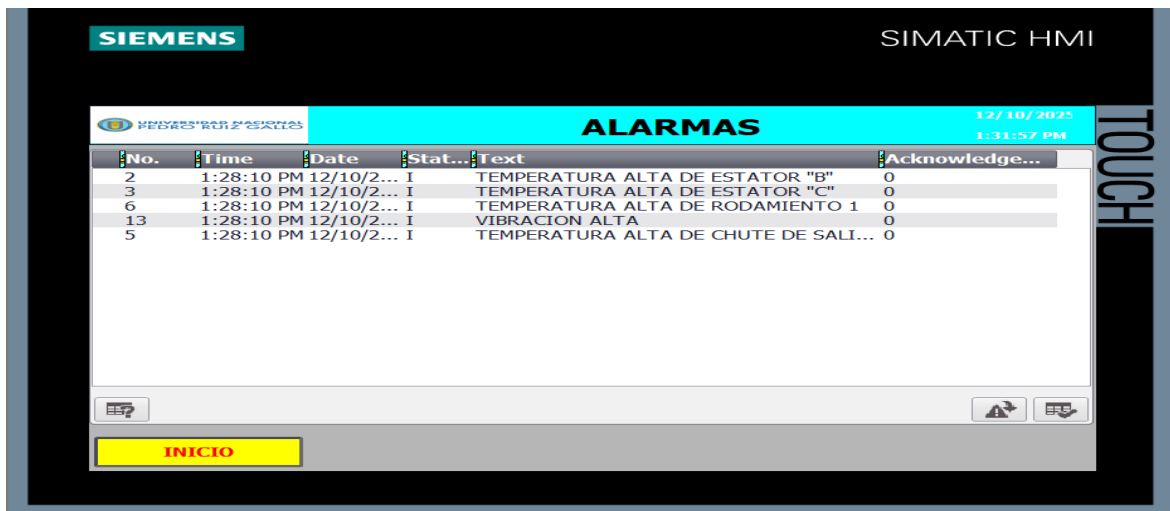


Nota. Elaboración propia

En caso de detectarse una falla o una anomalía en las temperaturas u otras variables críticas, el sistema genera advertencias visuales y sonoras en el HMI; y, si alguno de los valores excede el rango seguro de operación, se ejecuta automáticamente la parada del molino para prevenir daños en el equipo y garantizar la seguridad del proceso.

Figura 66.

Advertencias

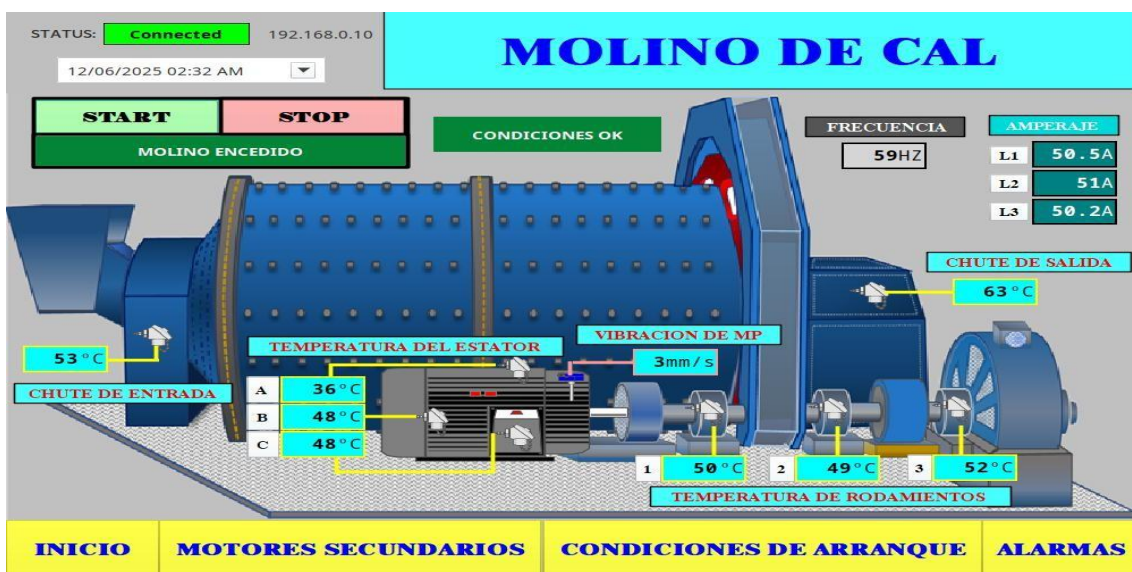


Nota. Elaboración propia

De la misma manera, el molino puede ser visualizado y controlado de forma remota a través del sistema SCADA, lo que permite supervisar su funcionamiento en tiempo real, ejecutar maniobras operativas y garantizar un control eficiente.

Figura 67.

Conexión remota desde el Scada

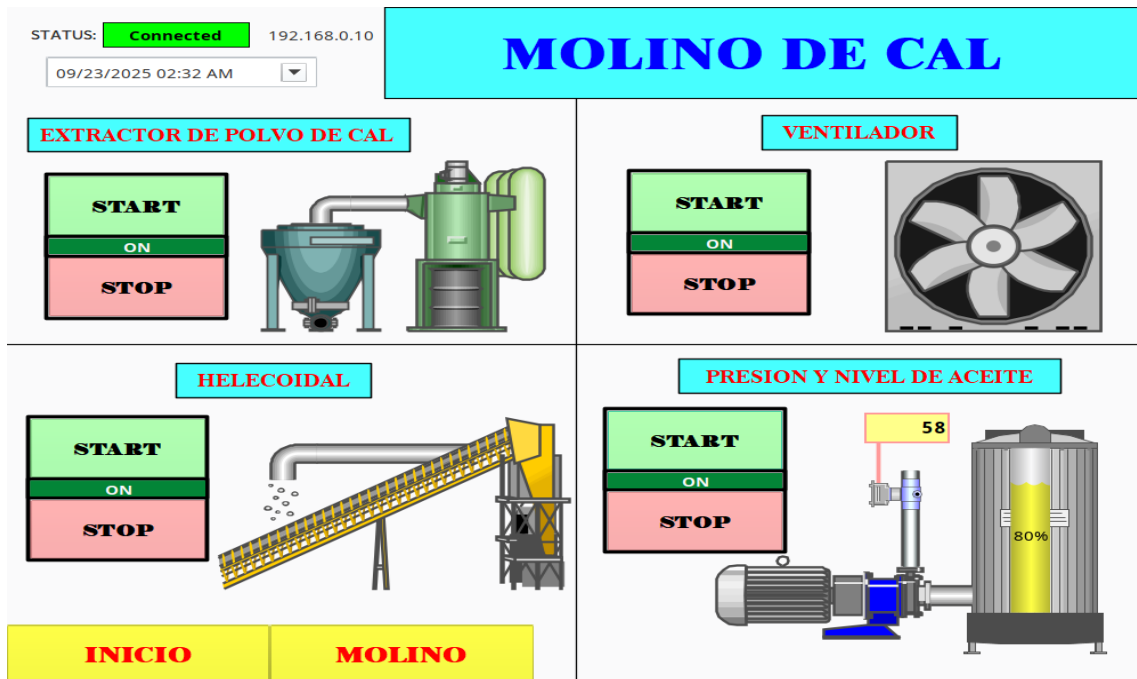


Nota. Elaboración propia

Los motores secundarios forman parte del sistema de accionamiento del molino y cumplen la función de apoyar y complementar el funcionamiento del motor principal.

Figura 68.

Control de motores secundarios



Nota. Elaboración propia

Las condiciones de arranque del sistema deben cumplirse previamente para garantizar una puesta en marcha segura y adecuada del equipo.

Figura 69.

Verificación de estado operativo

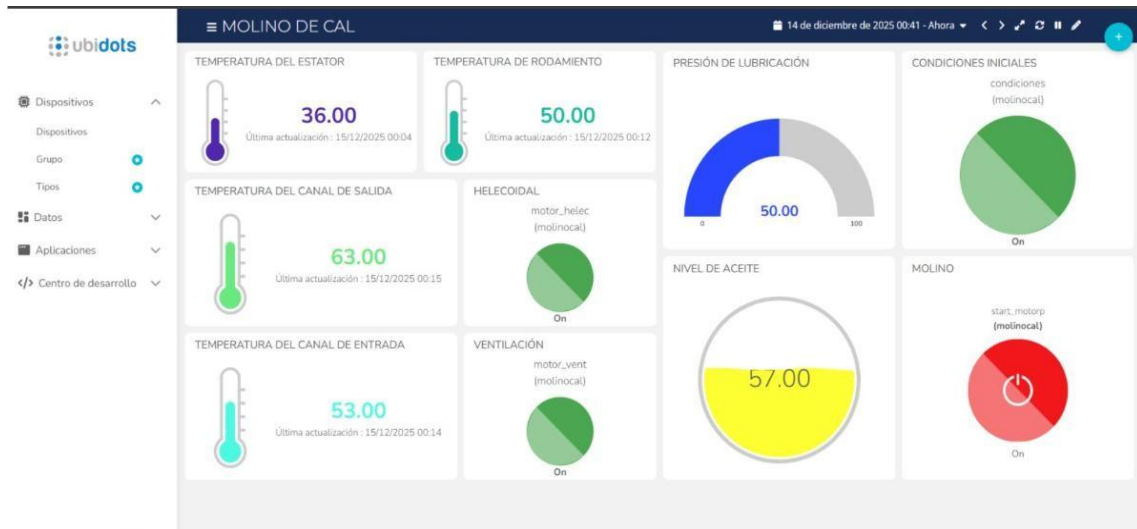


Nota. Elaboración propia

A través del dashboard de Ubidots, es posible visualizar de manera remota diversos parámetros del molino de cal, verificar el cumplimiento de las condiciones iniciales y controlar funciones básicas como el encendido y apagado del equipo. Desde una PC, el acceso a esta plataforma permite monitorear en tiempo real.

Figura 70.

Visualización desde la PC



Nota. Elaboración propia

Figura 71.

Visualización desde el móvil



Nota. Elaboración propia

V. DISCUSIÓN

El diagnóstico realizado coincide con lo señalado por estudios previos que evidencian cómo los procesos manuales en entornos industriales, especialmente en plantas de cal, generan altos niveles de variabilidad operativa, riesgos y baja eficiencia, tal como reportan Yantalema y Mayorga (2025) en su análisis de peligros asociados a la producción de cal. La dependencia del operador, la ausencia de monitoreo continuo y la falta de alarmas son deficiencias que también se observan en sistemas con limitado control tecnológico, como los descritos por Basabe y Valecillos (2020), donde la ausencia de registros y supervisión ocasionaba fallas recurrentes. En coherencia con estas investigaciones, los hallazgos del molino de cal ratifican que la falta de automatización compromete la trazabilidad, incrementa la posibilidad de sobreconsumo de insumos y reduce la confiabilidad del proceso. Este diagnóstico se convierte, por tanto, en una base técnica indispensable para justificar la necesidad de un sistema automatizado que permita mejorar seguridad, eficiencia y continuidad operativa.

El desarrollo de la lógica de control con integración PLC–HMI refleja una tendencia alineada con las buenas prácticas señaladas por López (2021), quien mostró cómo la incorporación de sensores, controladores y una interfaz gráfica bien estructurada permite un funcionamiento confiable en tiempo real. La adopción de una estructura modular, la validación de variables críticas y la incorporación de alarmas automáticas son características propias de los sistemas industriales modernos que buscan minimizar riesgos y garantizar un desempeño estable. Asimismo, este avance se relaciona con los planteamientos de Anshari y Hamdan (2022), quienes destacan la importancia de fortalecer las competencias digitales y la interacción humano–máquina para enfrentar los retos actuales de la industria. La HMI diseñada no solo facilita la comprensión operativa, sino que también reduce la dependencia del operador y mejora la seguridad, evidenciando una evolución clara respecto al proceso manual diagnosticado inicialmente.

Los resultados obtenidos con el control PID evidencian que la regulación de la dosificación de cal puede optimizarse mediante técnicas clásicas de control automático, tal como se ha demostrado en estudios de ingeniería de procesos como los desarrollados por Infantes (2021), donde la construcción de modelos y la simulación permitieron validar el desempeño de controladores antes de implementarlos en campo. Aunque el PID alcanzó un seguimiento adecuado del setpoint, las oscilaciones iniciales y la necesidad de

ajuste fino coinciden con comportamientos típicos de sistemas con dinámicas complejas o no lineales. Esta situación confirma que la simulación es una etapa esencial para identificar mejoras previas a la implementación real y evita riesgos de operación, reforzando la importancia de un enfoque metodológico progresivo en el diseño de sistemas de control industrial.

La integración de Ignition, Node-RED y Ubidots para conformar un SCADA virtual demuestra la capacidad de las tecnologías de Industria 4.0 para ampliar el alcance del monitoreo y control, coherente con los planteamientos de Castrillón y Zapata (2024), quienes resaltan el potencial de estas herramientas para mejorar eficiencia y competitividad. La correcta vinculación mediante OPC UA y la estructuración de dashboards interactivos constituyen elementos clave para garantizar interoperabilidad, visualización clara y comunicación estable, aspectos que también se destacan en investigaciones orientadas a supervisión en tiempo real, como la de López (2021). Este resultado evidencia la transición efectiva desde un proceso manual limitado hacia un sistema digital escalable y accesible desde la nube, fortaleciendo la gestión operativa y permitiendo una supervisión continua e independiente de la ubicación física del operador.

La validación del sistema automatizado en un entorno simulado confirma la importancia de la supervisión y control previo a su implementación en campo, tal como lo evidencian estudios similares en entornos mineros e industriales. En concordancia con López (2021) e Infantes (2021), la correcta lectura de variables críticas y la verificación de condiciones de arranque permiten reducir riesgos operativos y mejorar la seguridad del proceso, asegurando una operación confiable desde la etapa inicial. Asimismo, la activación segura del molino principal respalda los planteamientos de Morante y Paucar (2020) y Zegarra (2021), quienes destacan que un control estructurado fortalece la eficiencia operativa, disminuye la exposición a fallas y contribuye a una gestión más robusta y sostenible del proceso productivo.

VI. CONCLUSIONES

El diagnóstico del proceso manual del molino de cal evidencia una operación altamente dependiente del operador, con limitaciones en la consistencia, tiempos de respuesta y control de variables críticas, la ausencia de monitoreo en tiempo real y de un sistema de alarmas incrementa el riesgo de fallas, paradas inesperadas y sobreconsumo de insumos, estas deficiencias ponen de manifiesto la baja eficiencia y la falta de trazabilidad del sistema actual.

El diseño de la lógica de control permitió desarrollar un sistema capaz de supervisar y operar el molino de cal en tiempo real mediante un PLC integrado con un HMI intuitivo y funcional, la programación modular implementada garantiza la validación continua de variables críticas y la activación automática de alarmas ante condiciones anómalas, asimismo, la interfaz HMI facilita la visualización, el control y la intervención segura del operador.

La implementación del control PID en un entorno simulado para regular la dosificación de cal en función de la concentración de sólidos demostró ser efectiva, alcanzando un seguimiento adecuado del setpoint, el controlador, ajustado con parámetros $K_p=13.83$, $K_i=2.03$ y $K_d=14.52$, logró estabilizar el proceso con el tiempo, aunque se identificaron áreas para mejorar la respuesta dinámica.

La configuración del sistema SCADA virtual permitió integrar Ignition, Node-RED y Ubidots para habilitar una supervisión remota confiable y en tiempo real del proceso a través de la nube, la correcta vinculación del PLC mediante OPC UA y la creación de dashboards interactivos garantizaron una visualización clara de las variables críticas, asimismo, la arquitectura implementada aseguró una comunicación estable.

Las pruebas ejecutadas en el entorno simulado permitieron validar el correcto funcionamiento del sistema automatizado propuesto, verificando la adecuada lectura y supervisión de las variables críticas, el cumplimiento de las condiciones de arranque y la activación segura del molino principal.

VII. RECOMENDACIONES

Implementar sensores y alarmas permitirá controlar variables críticas con mayor precisión y reducir la dependencia del operador, un registro digital continuo contribuirá a mejorar la trazabilidad del proceso y anticipar fallas antes de que generen paradas.

La validación de la lógica en distintos escenarios operativos asegurará un funcionamiento estable ante perturbaciones del proceso, la actualización periódica del HMI reforzará su usabilidad y disminuirá riesgos asociados a errores humanos.

Un ajuste más preciso de los parámetros del PID mediante técnicas de optimización puede mejorar su respuesta dinámica y estabilidad, la evaluación del controlador frente a perturbaciones reales permitirá verificar su desempeño bajo condiciones reales de carga.

El fortalecimiento de la seguridad de la arquitectura SCADA garantizará la integridad de los datos transmitidos hacia la nube, la ampliación de los dashboards con indicadores clave mejorará la capacidad de análisis y la toma de decisiones operativas.

Extender las pruebas del sistema automatizado a escenarios de falla y condiciones extremas permitiría fortalecer la confiabilidad del control antes de su implementación real, la incorporación progresiva de pruebas en planta piloto facilitaría la validación del comportamiento del sistema frente a perturbaciones reales del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Allegri, S. A., McCoy, K., & Mitchell, C. S. (2022). CompositeView: A Network-Based Visualization Tool. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(2), 66. <https://doi.org/10.3390/bdcc6020066>
- Anshari, M., & Hamdan, M. (2022). Understanding knowledge management and upskilling in Fourth Industrial Revolution: Transformational shift and SECI model. *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*. <https://doi.org/10.1108/VJIKMS-09-2021-0203>
- Anumbe, N., Saidu, C., & Harik, R. (2022). A Primer on the Factories of the Future. *Sensors*, 22(15), 5834. <https://doi.org/10.3390/s22155834>
- Arias Gonzales, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (1.^a ed.). Enfoques Consulting E.I.R.L. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Basabe, R., & Valecillos, Y. (2020). Sistema de gestión de mantenimiento preventivo en el área de hornos en la empresa “Inversiones y Creaciones Pierantozzi C.A”. *Ingenieria UVM*, 14(2). <https://journal.uvm.edu.ve/index.php/ingenieria/article/view/336>
- Bílková, M., Greco, G., Palmigiano, A., Tzimoulis, A., & Wijnberg, N. (2018). THE LOGIC OF RESOURCES AND CAPABILITIES. *The Review of Symbolic Logic*, 11(2), 371-410. <https://doi.org/10.1017/S175502031700034X>
- Broccardo, L., Zicari, A., Jabeen, F., & Bhatti, Z. A. (2023). How digitalization supports a sustainable business model: A literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122146. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122146>
- Burnes, B. (2005). Complexity theories and organizational change. *International Journal of Management Reviews*, 7(2), 73-90. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2005.00107.x>
- Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Bushuiev, D., Babayev, I., & Babayev, J. (2021). Modeling Leadership for developing information technologies based on Agile methodology. *2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/SIST50301.2021.9465910>
- Castillo Garcia, H. L., Cajas, S., Romero Sigcho, J., & Estrella Lima, O. (2024). Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material

- mineralizado proveniente de la región sur del Ecuador. *CEDAMAZ*, 14(1), 49-68.
<https://doi.org/10.54753/cedamaz.v14i1.2231>
- Castrillón, A., & Zapata, I. (2024). *Evaluación de la implementación de la Industria 4.0 en la cadena de suministro de las Pymes del Sector Textil – Confección localizadas en el municipio de Itagüí* [Tesis de pregrado, Universidad EIA Envigado]. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/80183cb1-bd83-4c7a-a73f-f6e048c3ba73/content>
- Chen, C., Tang, L. C. M., & Jin, Y. (2019). Development of 5D BIM-Based Management System for Pre-Fabricated Construction in China. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 215-224.
<https://doi.org/10.1680/icsic.64669.215>
- Choque, C. (2023). “SISTEMA DE CONTROL PARA EL PROCESO DE TOSTADO DEL CAFÉ EN LA C.A.C. ALTO URUBAMBA LTDA. 239, LA CONVENCION 2023” [Tesis de pregrado, Universidad Líder Peruana].
<https://repositorio.ulp.edu.pe/bitstream/handle/ULP/119/EMPASTADO%20CRISTHIAN%20CHOQUE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Da Cunha E Silva, L. C., & Andrade Romero, J. F. (2021). Metodología híbrida para la estimación del nivel de llenado en un molino de bolas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 19(2), 210-220.
<https://doi.org/10.4995/riai.2021.13064>
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- Díaz, J., & Llauce, A. (2023). *Propuesta de diseño de un sistema de control interno para mejorar la gestión de inventarios en la empresa Grupo Puritasal S.A.C., Lambayeque 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Pedro Ruiz Gallo].
<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11721>
- Ejsmont, K., Gladysz, B., & Kluczek, A. (2020). Impact of Industry 4.0 on Sustainability—Bibliometric Literature Review. *Sustainability*, 12(14), 5650.
<https://doi.org/10.3390/su12145650>

- Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>
- Fobiri, G., Musonda, I., & Muleya, F. (2022). Reality Capture in Construction Project Management: A Review of Opportunities and Challenges. *Buildings*, 12(9), 1381. <https://doi.org/10.3390/buildings12091381>
- Frank, A. G., Mendes, G. H. S., Ayala, N. F., & Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.014>
- Goger, G., & Bisenberger, T. (2018). Tunnelling 4.0 – Construction-related future trends: Tunnelbau 4.0 – Baubetriebliche Zukunftstrends. *Geomechanics and Tunnelling*, 11(6), 710-721. <https://doi.org/10.1002/geot.201800058>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (First edition). McGraw-Hill Education.
- Hui, H., & McLaughlin, K. (2018, agosto). *Investigating Current PLC Security Issues Regarding Siemens S7 Communications and TIA Portal*. 5th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research 2018. <https://doi.org/10.14236/ewic/ICS2018.8>
- Infantes, J. (2021). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y SUPERVISIÓN DE NIVEL DE UN PROTOTIPO DE SILO PARA EL ALMACENAMIENTO DE CEMENTO A GRANEL PARA UNA EMPRESA DE AGREGADOS DE AREQUIPA* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/20.500.12920/10569/2/4M.0376.IM.pdf>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 07(01), 83-111. <https://doi.org/10.1142/S2424862221300040>

- Kwan Chung, C. K., & Alegre Brítez, M. Á. (2024). Desarrollo e implementación de software de gestión de costos y su influencia en la optimización de procesos en empresas industriales. *INVESTIGATIO*, 22. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2024.22.5>
- Lopez, C. (2021). *Diseño de un prototipo de sistema de control para la supervisión de iluminación en baja tensión en túneles usando protocolos de comunicación industrial*. [Tesis de posgrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/8b10e39b-935f-4c40-9c80-5292a508c2be/content>
- Mena, M. (2020). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO MULTIVARIABLE PARA EL CONTROL DE SIETE NIVELES DE PULPA DE UN BANCO DE CELDAS DE FLOTACIÓN DE MINERALES DE COBRE DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES*. [Tesis de posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://www.proquest.com/openview/cb299b4fa5cb47ed97e2224d02e41039/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Morante, C., & Paucar, N. (2020). *Propuesta de implementación de un sistema de control interno para una empresa minera dedicada a la extracción de cal* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ortiz Clavijo, L. F., Fernández Ledesma, J. D., Cadavid Nieto, S., & Gallego Duque, C. J. (2018). Computación en la Nube: Estudio de herramientas orientadas a la Industria 4.0. *Lámpsakos*, 20, 68-75. <https://doi.org/10.21501/21454086.2560>
- Quiroz, J. (2024). *Control de inventarios y gestión logística en el Molino Virgen de Guadalupe S.A.C, Guadalupe, 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional De Trujillo. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/13b97bf3-a4da-4996-a8b6-a2a63c60502f>
- Sánchez, J., & Benavides, G. (2021). “*DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE DESCARGA DE UNDERFLOW PARA UN ESPESADOR DE RELAVES*” [Tesis de pregrado, Universidad Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/10075>
- Sánchez, L., & López, D. (2020). Tecnologías limpias para la mejora de la gestión ambiental de la minería de sal en La Guajira, Colombia. *Prospectiva*, 18(2).

file:///C:/Users/HP/Downloads/Dialnet-

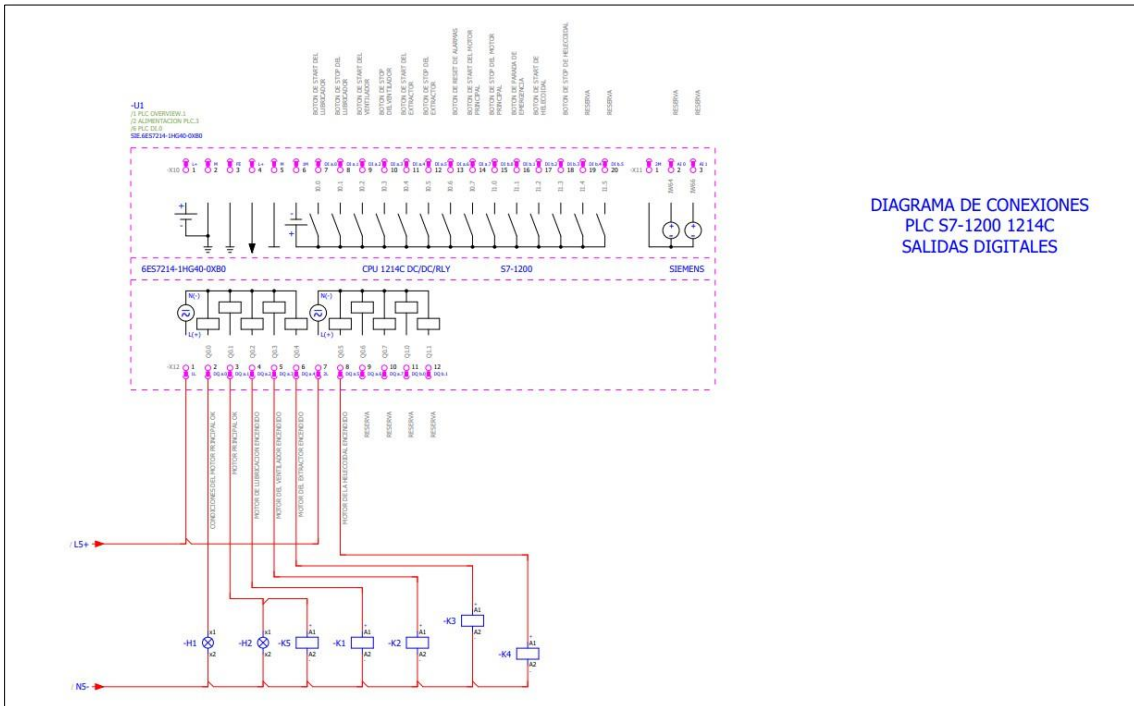
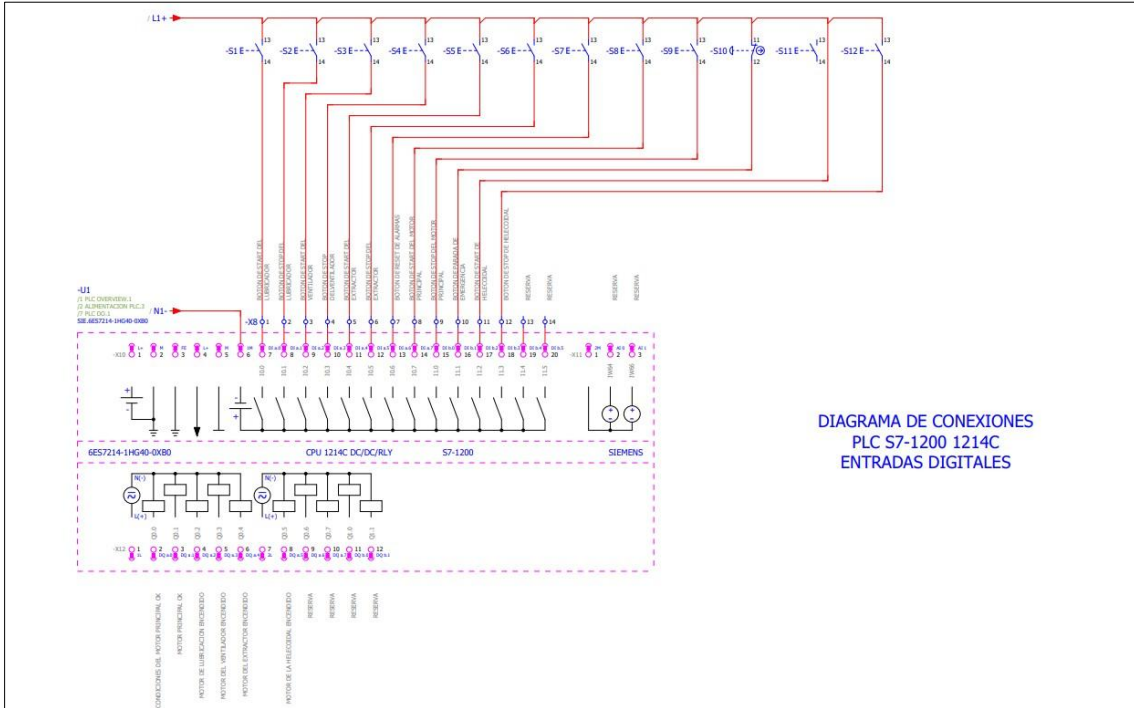
TecnologiasLimpiasParaLaMejoraDeLaGestionAmbiental-7972851.pdf

Yantalema, P., & Mayorga, D. (s. f.). Gestión de riesgos del trabajo aplicados a las actividades de producción de cal en la asociación Cantera Shobol Central. *Revista multidisciplinaria de innovación y estudios*, 10(4).
<https://doi.org/10.23857/pc.v10i4.9367>

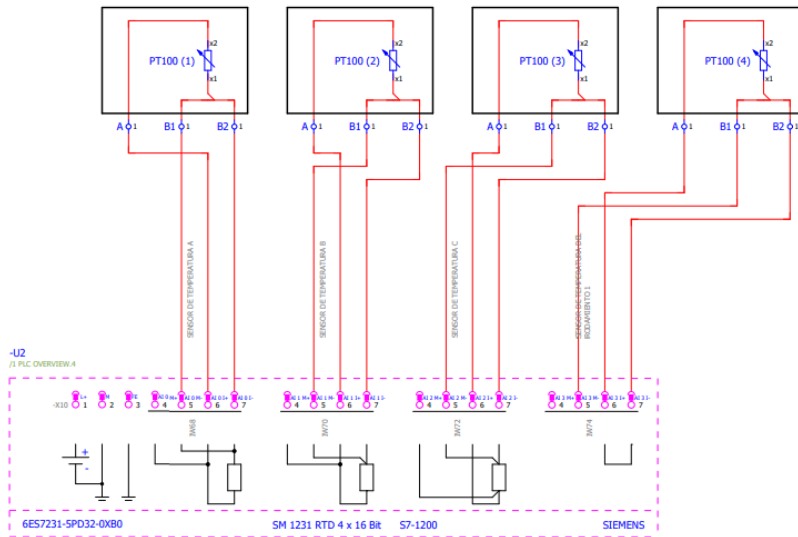
Zegarra, D. (2021). *Diseño de una propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento en el área de molienda para aumentar la disponibilidad de los equipos de una planta concentradora de cobre* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11508/1/IV_FIN_108_TE_Zegarra_Villena_2021.pdf

ANEXOS

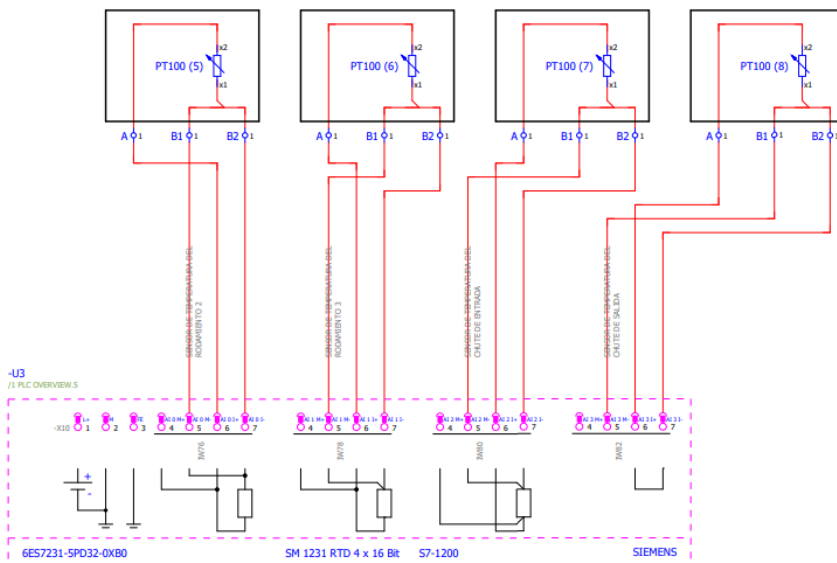
Anexo 01: Planos de CPU



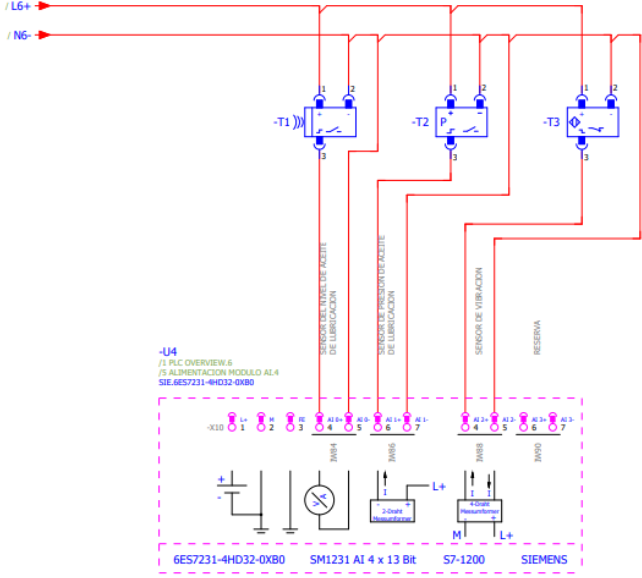
**DIAGRAMA DE CONEXIONES
SM 1231 14RTD 1
ENTRADAS ANALOGICAS**



**DIAGRAMA DE CONEXIONES
SM 1231 14RTD 2
ENTRADAS ANALOGICAS**



**DIAGRAMA DE CONEXIONES
SM 1231 AI
ENTRADAS ANALOGICAS**



Anexo 02: Lista de Tags

TAG - MOLINO DE CAL					
NAME	DESCRIPCION	TYPE	TIA PORTAL	IGNITION / UBIDOTS	PLC
SENSOR_TEMP_A	SENSOR DE TEMPERATURA A	INT	%DB9.DBW0	[MolinoCal]DB9,I0	IW68
VALOR_REAL_TEMP_A	TEMPERATURA A REAL	INT	%DB9.DBW26	[MolinoCal]DB9,I26	
L_TEMP_A	TEMPERATURA A BAJA	BOOL	%DB9.DBX28.0	[MolinoCal]DB9,X28.0	
LL_TEMP_A	TEMPERATURA A MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX28.1	[MolinoCal]DB9,X28.1	
H_TEMP_A	TEMPERATURA A ALTA	BOOL	%DB9.DBX28.2	[MolinoCal]DB9,X28.2	
HH_TEMP_A	TEMPERATURA A MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX28.3	[MolinoCal]DB9,X28.3	
SENSOR_TEMP_B	SENSOR DE TEMPERATURA B	INT	%DB9.DBW30	[MolinoCal]DB9,I30	IW70
VALOR_REAL_TEMP_B	TEMPERATURA B REAL	INT	%DB9.DBW56	[MolinoCal]DB9,I56	
L_TEMP_B	TEMPERATURA B BAJA	BOOL	%DB9.DBX58.0	[MolinoCal]DB9,X58.0	
LL_TEMP_B	TEMPERATURA B MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX58.1	[MolinoCal]DB9,X58.1	
H_TEMP_B	TEMPERATURA B ALTA	BOOL	%DB9.DBX58.2	[MolinoCal]DB9,X58.2	
HH_TEMP_B	TEMPERATURA B MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX58.3	[MolinoCal]DB9,X58.3	
SENSOR_TEMP_C	SENSOR DE TEMPERATURA C	INT	%DB9.DBW60	[MolinoCal]DB9,I60	IW72
VALOR_REAL_TEMP_C	TEMPERATURA C REAL	INT	%DB9.DBW86	[MolinoCal]DB9,I86	
L_TEMP_C	TEMPERATURA C BAJA	BOOL	%DB9.DBX88.0	[MolinoCal]DB9,X88.0	
LL_TEMP_C	TEMPERATURA C MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX88.1	[MolinoCal]DB9,X88.1	
H_TEMP_C	TEMPERATURA C ALTA	BOOL	%DB9.DBX88.2	[MolinoCal]DB9,X88.2	
HH_TEMP_C	TEMPERATURA C MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX88.3	[MolinoCal]DB9,X88.3	
SENSOR_TEMP_RODAMIENTO_1	SENSOR DE TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1	INT	%DB9.DBW90	[MolinoCal]DB9,I90	IW74
VALOR_REAL_TEMP_ROD_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 REAL	INT	%DB9.DBW116	[MolinoCal]DB9,I116	
L_TEMP_RODAMIENTO_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 BAJA	BOOL	%DB9.DBX118.0	[MolinoCal]DB9,X118.0	
LL_TEMP_RODAMIENTO_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX118.1	[MolinoCal]DB9,X118.1	
H_TEMP_RODAMIENTO_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 ALTA	BOOL	%DB9.DBX118.2	[MolinoCal]DB9,X118.2	
HH_TEMP_RODAMIENTO_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX118.3	[MolinoCal]DB9,X118.3	
SENSOR_TEMP_RODAMIENTO_2	SENSOR DE TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2	INT	%DB9.DBW120	[MolinoCal]DB9,I120	IW76
VALOR_REAL_TEMP_ROD_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 REAL	INT	%DB9.DBW146	[MolinoCal]DB9,I146	
L_TEMP_RODAMIENTO_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 BAJA	BOOL	%DB9.DBX148.0	[MolinoCal]DB9,X148.0	
LL_TEMP_RODAMIENTO_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX148.1	[MolinoCal]DB9,X148.1	
H_TEMP_RODAMIENTO_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 ALTA	BOOL	%DB9.DBX148.2	[MolinoCal]DB9,X148.2	
HH_TEMP_RODAMIENTO_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX148.3	[MolinoCal]DB9,X148.3	

SENSOR_TEMP_RODAMIENTO_3	SENSOR DE TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3	INT	%DB9.DBW150	[MolinoCal]DB9,I150	IW78
VALOR_REAL_TEMP_ROD_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 REAL	INT	%DB9.DBW176	[MolinoCal]DB9,I176	
L_TEMP_RODAMIENTO_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 BAJA	BOOL	%DB9.DBX178.0	[MolinoCal]DB9,X178.0	
LL_TEMP_RODAMIENTO_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX178.1	[MolinoCal]DB9,X178.1	
H_TEMP_RODAMIENTO_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 ALTA	BOOL	%DB9.DBX178.2	[MolinoCal]DB9,X178.2	
HH_TEMP_RODAMIENTO_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX178.3	[MolinoCal]DB9,X178.3	
SENSOR_NIVEL_ACEITE	SENSOR DEL NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION	INT	%DB9.DBW180	[MolinoCal]DB9,I180	IW84
VALOR_REAL_NIVEL_LUB	NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION REAL	INT	%DB9.DBW206	[MolinoCal]DB9,I206	
L_NIVEL_LUBRICACION	NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION BAJO	BOOL	%DB9.DBX208.0	[MolinoCal]DB9,X208.0	
LL_NIVEL_LUBRICACION	NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION MUY BAJO	BOOL	%DB9.DBX208.1	[MolinoCal]DB9,X208.1	
H_NIVEL_LUBRICACION	NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION ALTO	BOOL	%DB9.DBX208.2	[MolinoCal]DB9,X208.2	
HH_NIVEL_LUBRICACION	NIVEL DE ACEITE DE LUBRICACION MUY ALTO	BOOL	%DB9.DBX208.3	[MolinoCal]DB9,X208.3	
SENSOR_PRESION_ACEITE	SENSOR DE PRESION DE ACEITE DE LUBRICACION	INT	%DB9.DBW210	[MolinoCal]DB9,I210	IW86
VALOR_REAL_PRESION_LUB	PRESION DE LUBRICACION REAL	INT	%DB9.DBW236	[MolinoCal]DB9,I236	
L_PRESION_LUBRICACION	PRESION DE LUBRICACION BAJA	BOOL	%DB9.DBX238.0	[MolinoCal]DB9,X238.0	
LL_PRESION_LUBRICACION	PRESION DE LUBRICACION MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX238.1	[MolinoCal]DB9,X238.1	
H_PRESION_LUBRICACION	PRESION DE LUBRICACION ALTO	BOOL	%DB9.DBX238.2	[MolinoCal]DB9,X238.2	
HH_PRESION_LUBRICACION	PRESION DE LUBRICACION MUY ALTO	BOOL	%DB9.DBX238.3	[MolinoCal]DB9,X238.3	
SENSOR_TEMPERATURA_CHUTE_ENTRADA	SENSOR DE TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA	INT	%DB9.DBW240	[MolinoCal]DB9,I240	IW80
VALOR_REAL_TEMP_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA REAL	INT	%DB9.DBW236	[MolinoCal]DB9,I266	
L_TEMP_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA BAJA	BOOL	%DB9.DBX238.0	[MolinoCal]DB9,X268.0	
LL_TEMP_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX238.1	[MolinoCal]DB9,X268.1	
H_TEMP_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA ALTA	BOOL	%DB9.DBX238.2	[MolinoCal]DB9,X268.2	
HH_TEMP_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX238.3	[MolinoCal]DB9,X268.3	
SENSOR_TEMPERATURA_CHUTE_SALIDA	SENSOR DE TEMPERATURA DEL CHUTE DE SALIDA	INT	%DB9.DBW270	[MolinoCal]DB9,I270	IW82
VALOR_REAL_TEMP_CHUTE_SALIDA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE SALIDA REAL	INT	%DB9.DBW296	[MolinoCal]DB9,I296	

L_TEMP_CHUTE_SALIDA	TEMPURATURA DEL CHUTE DE SALIDA BAJA	BOOL	%DB9.DBX298.0	[MolinoCal]DB9,X298.0	
LL_TEMP_CHUTE_SALIDA	TEMPURATURA DEL CHUTE DE SALIDA MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX298.1	[MolinoCal]DB9,X298.1	
H_TEMP_CHUTE_SALIDA	TEMPURATURA DEL CHUTE DE SALIDA ALTA	BOOL	%DB9.DBX298.2	[MolinoCal]DB9,X298.2	
HH_TEMP_CHUTE_SALIDA	TEMPURATURA DEL CHUTE DE SALIDA MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX298.3	[MolinoCal]DB9,X298.3	
SENSOR_VIBRACION	SENSOR DE VIBRACION	INT	%DB9.DBW300	[MolinoCal]DB9,I300	IW88
VALOR_REAL_VIBRACION	VIBRACION REAL	INT	%DB9.DBW326	[MolinoCal]DB9,I326	
L_VIBRACION	VIBRACION BAJA	BOOL	%DB9.DBX328.0	[MolinoCal]DB9,X328.0	
LL_VIBRACION	VIBRACION MUY BAJA	BOOL	%DB9.DBX328.1	[MolinoCal]DB9,X328.1	
H_VIBRACION	VIBRACION ALTA	BOOL	%DB9.DBX328.2	[MolinoCal]DB9,X328.2	
HH_VIBRACION	VIBRACION MUY ALTA	BOOL	%DB9.DBX328.3	[MolinoCal]DB9,X328.3	
CORRIENTE_L1	CORRIENTE DE L1	REAL	%DB9.DBD330	[MolinoCal]DB9,REAL330	
CORRIENTE_L2	CORRIENTE DE L2	REAL	%DB9.DBD334	[MolinoCal]DB9,REAL334	
CORRIENTE_L3	CORRIENTE DE L3	REAL	%DB9.DBD338	[MolinoCal]DB9,REAL338	
TEMPERATURA_A	TEMPERATURA A OK	BOOL	%DB14.DBX0.0	[MolinoCal]DB14,X0.0	
TEMPERATURA_B	TEMPERATURA B OK	BOOL	%DB14.DBX0.1	[MolinoCal]DB14,X0.1	
TEMPERATURA_C	TEMPERATURA C OK	BOOL	%DB14.DBX0.2	[MolinoCal]DB14,X0.2	
TEMPERATURA_ROD_1	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 1 OK	BOOL	%DB14.DBX0.3	[MolinoCal]DB14,X0.3	
TEMPERATURA_ROD_2	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 2 OK	BOOL	%DB14.DBX0.4	[MolinoCal]DB14,X0.4	
TEMPERATURA_ROD_3	TEMPERATURA DEL RODAMIENTO 3 OK	BOOL	%DB14.DBX0.5	[MolinoCal]DB14,X0.5	
TEMPERATURA_CHUTE_ENTRADA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE ENTRADA OK	BOOL	%DB14.DBX0.6	[MolinoCal]DB14,X0.6	
TEMPERATURA_CHUTE_SALIDA	TEMPERATURA DEL CHUTE DE SALIDA OK	BOOL	%DB14.DBX0.7	[MolinoCal]DB14,X0.7	
NIVEL_LUBRICACION	NIVEL DE LUBRICACION OK	BOOL	%DB14.DBX1.0	[MolinoCal]DB14,X1.0	
PRESION_LUBRICACION	PRESION DE LUBRICACION OK	BOOL	%DB14.DBX1.1	[MolinoCal]DB14,X1.1	
VIBRACION DE MOTOR PRINCIPAL	VIBRACION DE MOTOR PRINCIPAL OK	BOOL	%DB14.DBX1.2	[MolinoCal]DB14,X1.2	
CONDICIONES_M_P_OK	CONDICIONES DEL MOTOR PRINCIPAL OK	BOOL	%DB10.DBX62.1	[MolinoCal]DB10,X62.1	Q0.0
MP_ENCENDIDO	MOTOR PRINCIPAL OK	BOOL	%DB10.DBX62.2	[MolinoCal]DB10,X62.2	Q0.1
STAR_LUBRICADOR	BOTON DE START DEL LUBRICADOR	BOOL	%DB8.DBX0.0	[MolinoCal]DB8,X0.0	I0.0
STOP_LUBRICADOR	BOTON DE STOP DEL LUBRICADOR	BOOL	%DB8.DBX0.1	[MolinoCal]DB8,X0.1	I0.1
STAR_VENTILADOR	BOTON DE START DEL VENTILADOR	BOOL	%DB8.DBX0.4	[MolinoCal]DB8,X0.4	I0.2
STOP_VENTILADOR	BOTON DE STOP DEL VENTILADOR	BOOL	%DB8.DBX0.5	[MolinoCal]DB8,X0.5	I0.3
STAR_EXTRACTOR	BOTON DE START DEL EXTRACTOR	BOOL	%DB8.DBX1.0	[MolinoCal]DB8,X1.0	I0.4

STOP_EXTRACTOR	BOTON DE STOP DEL EXTRACTOR	BOOL	%DB8.DBX1.1	[MolinoCal]DB8,X1.1	I0.5
RESET ALARMA Y FALLA	BOTON DE RESET DE ALARMAS	BOOL	%DB8.DBX1.4	[MolinoCal]DB8,X1.4	I0.6
STAR M. PRINCIPAL	BOTON DE START DEL MOTOR PRINCIPAL	BOOL	%DB8.DBX1.7	[MolinoCal]DB8,X1.7	I0.7
STOP M. PRINCIPAL	BOTON DE STOP DEL MOTOR PRINCIPAL	BOOL	%DB8.DBX2.0	[MolinoCal]DB8,X2.0	I1.0
PARADA DE EMERGENCIA	BOTON DE PARADA DE EMERGENCIA	BOOL	%DB8.DBX2.1	[MolinoCal]DB8,X2.1	I1.1
STAR_HELECOIDAL	BOTON DE START DE HELECOIDAL	BOOL	%DB8.DBX2.2	[MolinoCal]DB8,X2.2	I1.2
STOP_HELECOIDAL	BOTON DE STOP DE HELECOIDAL	BOOL	%DB8.DBX2.3	[MolinoCal]DB8,X2.3	I1.3
MOTOR_LUBRICACION	MOTOR DE LUBRICACION ENCENDIDO	BOOL	%DB13.DBX0.0	[MolinoCal]DB13,X0.0	Q0.2
MOTOR_VENTILADOR	MOTOR DEL VENTILADOR ENCENDIDO	BOOL	%DB13.DBX0.1	[MolinoCal]DB13,X0.1	Q0.3
MOTOR_EXTRACTOR	MOTOR DEL EXTRACTOR ENCENDIDO	BOOL	%DB13.DBX0.2	[MolinoCal]DB13,X0.2	Q0.4
MOTOR_HELECOIDAL	MOTOR DE LA HELECOIDAL ENCENDIDO	BOOL	%DB13.DBX0.3	[MolinoCal]DB13,X0.3	Q0.5

Anexo 03: Red de conexión

