

Mejoramiento del proceso de producción de suelo-cemento elaborado en planta mediante un sistema de automatización industrial

Autor
Sara Fernanda Mayorga Gongora

Tutor
Profesor. Pablo Emilio Rozo Garcia

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Especializacion en informatica y automatica industrial

Bogotá, Colombia
2025

Contenido

1. Planteamiento del problema **7**
2. Justificación **8**
2.1 Investigativo 8
2.2 Académico 8
2.3 Economico 8
2.4 Social 9
2.5 Ambiental 9
2.6 Personal 9
3. Objetivos **10**
3.1 Objetivo General 10
3.2 Objetivos específicos 10
4. Marco teórico **11**
4.1 Proceso de producción de suelo-cemento 11
4.1.1 Selección de materiales 12
4.1.2 Dosificación de materiales 14
4.1.3 Mezclado 16
4.1.4 Compactación en sitio 16
4.1.5 Control de calidad 17
5.1 Automatización industrial 19
5.1.1 PLC (Programmable Logic Controllers) 20
5.1.2 Interfaz Humano–Máquina (HMI) 22
5.1.3 Protocolos de comunicación 22
5.1.3 Instrumentación industrial 23
5. Estado del arte **24**
5.1 Serie DMC: versatilidad total y producción para múltiples aplicaciones 24
5.2 Digitization of the concrete production chain using computer vision and artificial intelligence 25
5.3 An intelligent soil-cement mixing column driver 26
5.4 Integration of Industry 5.0 Technologies in the Concrete Industry: An Analysis of the Impact of AI-Based Virtual Assistants 27
6. Metodología **28**
6.1 Diseño metodológico 28
6.1.1 Fase 1. Diagnóstico del proceso actual 28
6.1.2 Fase 2. Diseño del sistema automatizado 28
6.1.3 Fase 3. Diseño de algoritmo de control y HMI 28
6.1.4 Fase 4. Validación mediante simulación y análisis de datos 28

7. Cronograma **29**
8. Alcances y Limitaciones **30**
8.1 Alcances 30
8.2 Limitaciones 30
9. Presupuesto **31**
10. Diagnóstico y caracterización del proceso productivo actual **33**
10.1 Levantamiento y modelado del flujo operativo 33
10.2 Identificación de posibilidades de mejora 39
11. Propuesta técnica y diseño del sistema automatizado **41**
11.1 Selección de instrumentación 41
11.1.1 Selección de sensores de peso 41
11.1.2 Selección de sensor de corriente 43
11.1.4 Selección de flujometro 44
11.1.3 Selección de válvula 47
11.2 Diseño de arquitectura implementada en PLC 48
11.3 Diseño de HMI 54
11.2.1 Variables críticas a visualizar 54
11.2.2 Gestión de alarmas 55
11.2.3 Estructura de pantallas 55
12. Implementación del Algoritmo de Control y Supervisión HMI **57**
12.1 Implementación de la lógica de control en el PLC 57
12.1.1 Arquitectura del programa 57
12.1.2 Control PI y Calculo de error 60
12.1.3 Implementación del modo manual de operación 64
12.1.4 Manejo de alarmas y seguridad 65
12.2 Implementación de diseño HMI 66
13. Validación mediante simulación, aplicación real y análisis de datos **68**
13.1 Simulación del proceso 69
13.2 Implementación física 71
13.3 Análisis de datos 74
14. Conclusiones **78**
15. Aportes y sugerencias **79**
15.1 Aportes del proyecto 79
15.2 Sugerencias para trabajos futuros 79
Bibliografía **81**

Lista de figuras

Figura 1. Uso de suelo - cemento. Fuente: Propia. 12
Figura 2. Etapas para la producción de suelo - cemento. Fuente: Propia. 13
Figura 3. Selección de materiales de suelo-cemento. Fuente: Propia. 14
Figura 4. Tipos de suelos. Fuente: [10] 15
Figura 5 y 6. Ensayo líquido y plástico. Fuente:Propia 16
Figura 7. Tamizaje. Fuente: Propia. 16
Figura 8 y 9. Proctor y compactado. Fuente: Propia. 17
Figura 10 y 11. Máquina de compresión. Fuente: Propia. 18
Figura 12. Prueba de humedad. Fuente: Propia. 19
Figura 13. Densímetro nuclear. Fuente: viaindustrial [19]. 19
Figura 14. Pirámide de automatización. Fuente: Propia 21
Figura 15. Componentes de un PLC. Fuente: Propia 22
Figura 16. Pirámide de automatización. Fuente: [26] International Journal of Computer Applications 22
Figura 17. Estructura, el protocolo Modbus RTU. Fuente: [34] 24
Figura 18. Instrumentación industrial. Fuente: Propia. 24
Figura 19. Digitalización de la cadena de producción del concreto. Fuente: [38]. 26
Figura 20. Integración de las tecnologías de la Industria 5.0 en la industria del concreto. Fuente: [40]. 28
Figura 21. Diagrama descriptivo del proceso actual de producción. Fuente: propia. 34
Figura 22. Planta de producción de suelo - cemento con explicación. Fuente: propia. 35
Figura 23. Planta de producción de suelo - cemento con explicación. Fuente: propia. 35
Figura 24. Diagrama de instrumentación. Fuente: propia. 36
Figura 25. Diagrama de instrumentación de bandas de dosificación. Fuente: propia. 36
Figura 26. Diagrama de instrumentación de tornillo sin fin. Fuente: propia. 37
Figura 27. Diagrama de instrumentación para dosificación de agua. Fuente: propia. 37
Figura 28. Diagrama de flujo. Fuente: propia. 39
Figura 29. HMI. Fuente: propia. 40
Figura 30. Celda de carga tipo viga. Fuente: MAVIN [44]. 43
Figura 31. Celda de carga tipo compresión. Fuente: BASCOSTA [48]. 43
Figura 32. Sensor de corriente. Fuente: Amazon [49]. 45
Figura 33. Sensor de flujo de rueda de paletas. Fuente: Viaindustrial [50]. 45
Figura 34. Sensor caudalímetro electromagnético. Fuente: Supmea[51]. 46
Figura 36. Sensor caudalímetro electromagnético. Fuente: Mercadolibre[53]. 46

Figura 37. Sensor caudalímetro tipo turbina. Fuente: Directindustry[55]. 47
Figura 38. Diagrama de flujo de rediseño de arquitectura. Fuente: Propia. 51
Figura 38. Diagrama de flujo de retroalimentación de error. Fuente: Propia. 52
Figura 39. Diagrama explicativo de control manual. Fuente: Propia. 54
Figura 40. Pantalla propuesta modo automático. Fuente: Propia. 55
Figura 41. Pantalla propuesta alarmas vigentes e histórico de alarmas. Fuente: Propia.56
Figura 42. Pantallas propuestas para mejorar la automatización. Fuente: Propia. 57
Figura 42. Secuencia de inicio de procesos implementado en PLC. Fuente: Propia. 59
Figura 43. Dosificación de cemento implementado en PLC. Fuente: Propia. 60
Figura 44. Dosificación de agregado en bandas implementado en PLC. Fuente: Propia. 60
Figura 44. Dosificación de agua implementado en PLC. Fuente: Propia. 61
Figura 45. Cálculo de fórmula implementado en PLC. Fuente: Propia. 62
Figura 46. Diagrama de control PI. Fuente: Propia. 64
Figura 46. Modo manual. Fuente: Propia a través de Chat GPT. 66
Figura 47. HMI Automático. Fuente: Propia. 67
Figura 48.Historico de datos en HMI. Fuente: Propia. 68
Figura 49. Alarmas en HMI. Fuente: Propia. 69
Figura 50. Simulación de proceso industrial. Fuente: Propia. 70
Figura 51. Secuencia de encendido de elementos industriales en simulación. Fuente: Propia. 71
Figura 52. Secuencia de encendido de elementos industriales en planta. Fuente: Propia. 72
Figura 53. Sincronización de dosificación según el flujo del cemento. Fuente: Propia. 73
Figura 54. Visualización real del proceso de dosificación. Fuente: Propia. 74
Figura 55. Render de la planta actual con modificaciones mecánicas. Fuente: Altron Ingenieria. 75
Figura 56. Planta actual con modificaciones mecánicas. Fuente: Propia. 75
Figura 57. Prueba de resistencia a la compresión. Fuente: Propia. 77

Lista de Tablas

Tabla 1. Cronograma. Fuente: Propia. 30
Tabla 2. Recursos materiales. Fuente: Propia. 32
Tabla 3. Recursos de software. Fuente: Propia. 32
Tabla 4. Recursos Humanos. Fuente: Propia. 32
Tabla 5. Recursos totales. Fuente: Propia. 33
Tabla 6. Mapa de entradas y salidas. Fuente: Propia. 38
Tabla 7. Matriz de decisión para selección de sensores de peso. Fuente: Propia. 43
Tabla 8. Matriz de decisión para selección de caudalimetro. Fuente: Propia. 47
Tabla 9. Diferencias de proceso actual vs. rediseño. Fuente: Propia. 53
Tabla 10. Tiempos de secuencia de encendido. Fuente: Propia. 72
Tabla 11. Tiempos finales por elemento. Fuente: Propia. 73
Tabla 12. Registro de jornada de producción. Fuente: Propia. 76
Tabla 13. Proporcionalidad de materiales en diferentes tomas en un bache. Fuente: Propia. 77
Tabla 14. Sistema inicial VS. Sistema implementado. Fuente: Propia. 78

Lista de Ecuaciones

Suma total de elementos según formula (1) 62
Cantidad Agregado 1 Total, Cantidad Agregado 2 Total (2) 62
Cantidad Cemento Total (3) 62
Cantidad Agua Total (4) 62
Flujo de Agr1, Flujo de Agr2 (5) 62
Flujo de cemento (6) 62
Flujo de agua (7) 62
Calculo de error del cemento (8) 63
Control PI (9) 63
Factor para ajuste de punto de referencia según cemento (10) 63
Punto de referencia ajustado Agregado 1 (11) 64
Punto de referencia ajustado Agregado 2 (12) 64
Punto de referencia ajustado Agua (13) 64
Fórmula de error (14) 76
Porcentaje de error promedio (15) 76
Porcentaje de error maximo (16) 76

1. Planteamiento del problema

El suelo-cemento o base/subbase estabilizada con cemento, es un material ampliamente utilizado en la construcción de infraestructuras viales que usan pavimento, es necesario para la capa de base y subbase, debido a resistencia mecánica, durabilidad, relación costo-beneficio y bajo impacto medio ambiental. En Colombia, su producción y control están regulados por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) a través del Artículo 350 - 22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras [1], donde se establecen requisitos de dosificación, mezcla, compactación y control de calidad para su elaboración, ya sea en vía o en planta.

En el caso del suelo-cemento elaborado en planta, el proceso productivo involucra la dosificación controlada de agregados o suelo (material natural no consolidado, compuesto por partículas minerales según la ASTM D653 [2]), cemento y agua, garantizando homogeneidad en la mezcla y cumplimiento de parámetros como resistencia a la compresión, contenido óptimo de humedad y densidad máxima seca. Cuando estas operaciones se realizan de manera semiautomática o manual, pueden ocurrir desviaciones como:

- **Errores en el dosificado** de materiales por imprecisiones humanas o falta de control automático. Las pérdidas de material en una planta dosificadora con capacidad de 60 m^3/h sin automatizar son de un 3.17% [3].
- **Imprecisión en la dosificación del cemento**, una de las principales problemáticas técnicas y económicas del proceso. Considerando que el cemento puede representar entre el 8 % y el 15 % del peso total de la mezcla, pequeñas variaciones pueden traducirse en sobrecostos significativos o en incumplimiento de los requisitos de resistencia establecidos por INVÍAS.
- **Aumento en los costos operativos,** la falta de control y estandarización en los procesos genera desperdicios de materiales y retrasos en las actividades, lo cual incrementa los costos unitarios de producción [4].
- **Deficiencias en la trazabilidad y control documental del proceso**, ya que la ausencia de sistemas automatizados de adquisición y almacenamiento de datos dificulta el registro histórico de variables críticas como dosificación, producción por hora, consumo de cemento y contenido de humedad. Esto limita la verificación del cumplimiento de las especificaciones técnicas y de los métodos de ensayo establecidos por normas de ensayos de dureza (Ej. INV E-224), durabilidad (Ej. INV E-220) y resistencia (Ej. INV E-148) [5].

Ante estas limitaciones, surge la necesidad de implementar un sistema de automatización integral del proceso de producción de suelo-cemento en planta, que permita controlar con precisión el dosificado de materiales, monitorear en tiempo real las variables críticas del proceso, optimizar el consumo de insumos, reducir la variabilidad operativa y garantizar el cumplimiento de los parámetros técnicos exigidos por la normativa vigente.

En este contexto, el problema central que aborda el presente proyecto es:

¿Cómo mejorar el proceso de producción de suelo-cemento mediante un sistema de automatización industrial que permita mejorar la precisión en el dosificado, reducir los tiempos de ciclo, minimizar los desperdicios y garantizar la calidad del producto final?

2. JUSTIFICACIÓN

2.1 INVESTIGATIVO

La investigación abre la puerta a explorar nuevas tecnologías de control y análisis de datos en la industria de materiales de construcción. Asimismo, genera información útil para el diseño de futuros sistemas de dosificación inteligentes, siendo aplicable la producción de otros materiales, integrando conceptos de Industria 4.0, IoT y control de calidad automatizado, contribuyendo así al desarrollo científico y tecnológico del sector.

2.2 ACADÉMICO

Este trabajo enriquece el campo académico de la automatización aplicada a procesos industriales específicos, aportando un caso práctico que puede servir como referencia para futuras investigaciones o proyectos en universidades e instituciones de formación técnica y de posgrado. Esto a través del uso de PLCs, siendo el elemento de control más utilizado en la industria, dando una guía de implementación de procesos de dosificación junto al uso de sensores y actuadores. También aportando explicaciones tanto teóricas, como prácticas en cuanto a protocolos de comunicación y mejoramiento en líneas de automatización, brindando opciones de uso de datos obtenidos.

2.3 ECONOMICO

La automatización industrial es hoy una necesidad estratégica para las empresas productoras de material de construcción que buscan mantenerse competitivas frente a la creciente demanda del sector de la construcción. Muchas plantas presentan procesos semi automáticos con alta dependencia de la intervención humana, lo que conlleva riesgos de error, baja eficiencia y costos elevados por desperdicio de insumos.

Implementar un sistema de automatización integral en la producción de suelo - cemento busca el mejoramiento en los aspectos como el económico; reduciendo desperdicios de materias primas y costos operativos, esto garantiza calidad y reducción de variabilidad en la mezcla.

2.4 Social

La automatización de los procesos en plantas de producción de suelo-cemento contribuye directamente a mejorar la calidad y seguridad de la infraestructura vial, garantizando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y de los métodos de ensayo adoptados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Un control automatizado reduce la variabilidad del material y minimiza el riesgo de fallas prematuras en las capas de base y subbase de los pavimentos. Esto se traduce en vías más durables, con menor deterioro estructural y menor necesidad de mantenimiento correctivo.

2.5 Ambiental

La reducción de desperdicios de materia prima permite minimizar la huella ambiental de la producción de suelo-cemento, una industria reconocida por su alta demanda de recursos y su impacto en emisiones de CO_2. En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), junto con las Autoridades Ambientales Regionales (CAR, CVC, CORANTIOQUIA, entre otras), son las responsables de regular y supervisar las actividades industriales que generan emisiones y residuos, promoviendo prácticas sostenibles y el cumplimiento de la Ley 99 de 1993. En este contexto, automatizar y controlar mejor los procesos representa un aporte hacia la sostenibilidad y el cumplimiento de metas ambientales en el sector de la construcción.

2.6 Personal

El proyecto fortalece las competencias profesionales en automatización industrial, control de procesos, programación y gestión de proyectos, potenciando el perfil del especialista frente a un mercado laboral altamente competitivo. También aporta conocimiento académico enfocado en mecanismos de dosificación, buscando ser no solo una guía, si no también tener la capacidad de analizar y solucionar problemas de automatización de manera ágil mediante la formación integral de la autora al vincular la teoría académica con la práctica en un entorno simulado o real de producción.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar una propuesta de automatización para el proceso en plantas de suelo-cemento, con el fin de mejorar la dosificación de materiales, reducir desperdicios, mejorar la eficiencia de producción y garantizar la trazabilidad de la información para el cumplimiento de normativas de calidad.

3.2 Objetivos específicos

- **Diagnosticar** el proceso actual de producción de suelo-cemento en las plantas, identificando las principales falencias relacionadas con desperdicio de materiales y control de calidad.
- **Diseñar** un sistema de automatización que integre elementos de instrumentación, como sensores y actuadores.
- **Diseñar** el algoritmo de control para la dosificación, mezclado y registro de datos de la producción de suelo-cemento, que sea adaptable a procesos de dosificación en general.
- **Validar** el funcionamiento del sistema automatizado implementado simulaciones.

4. Marco teórico

4.1 Proceso de producción de suelo-cemento

El suelo-cemento es un material de construcción obtenido mediante la mezcla homogénea de suelo natural, cemento Portland y agua, en proporciones previamente determinadas mediante ensayos de laboratorio. Este material es ampliamente utilizado en la construcción de bases y subbases de pavimentos, estabilización de vías rurales, plataformas industriales y obras de infraestructura que requieren mejorar o arreglar la capacidad del terreno. Durante su proceso de producción, el suelo es previamente seleccionado, posteriormente se incorpora el cemento y el agua hasta alcanzar la humedad óptima de compactación [5].



Figura 1. Uso de suelo - cemento. Fuente: Propia.

En estado fresco, la mezcla presenta características trabajables que permiten su extendido. Una vez compactado y curado, el suelo-cemento desarrolla resistencia mecánica, rigidez y durabilidad, mejorando significativamente las propiedades físicas. Estas características lo convierten en una alternativa técnica y ambientalmente favorable frente a soluciones tradicionales, ya que reduce el

consumo de agregados naturales y disminuye el impacto asociado a la producción de materiales convencionales.

El proceso consta de etapas que se visualizan en la figura 2.



Figura 2. Etapas para la producción de suelo - cemento. Fuente: Propia.

4.1.1 Selección de materiales

Profundizando en las etapas del proceso, se debe dar énfasis en los materiales empleados. La selección de estos materiales no solo responde a criterios de disponibilidad local y costo, sino también a sus propiedades físico-químicas y a su compatibilidad dentro de la mezcla. Cada componente cumple una función específica y su control es fundamental para garantizar la calidad del producto final:

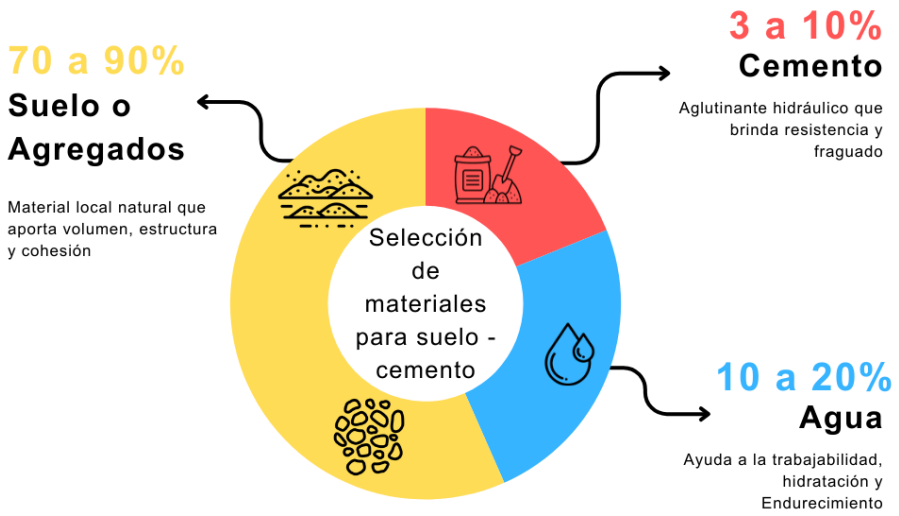


Figura 3. Selección de materiales de suelo-cemento. Fuente: Propia.

- **Cemento**: Está compuesto principalmente por **s**ilicatos y aluminatos de calcio, obtenidos al quemar una mezcla de piedra caliza y arcillas a temperaturas cercanas a los 1450 °C. El producto resultante, llamado clinker, se tritura junto con yeso. Al mezclarse con agua realiza una reacción de hidratación principalmente de los compuestos silicato lo cual brinda resistencia y cohesión. Actúa como aglutinante hidráulico que determina propiedades como el tiempo de fraguado, adherencia y resistencia mecánica [6], su porcentaje en la mezcla depende de las pruebas de laboratorio donde se toma en cuenta las características deseadas junto a el material de suelo o agregados [7].
- **Agregado o suelos:** Son materiales seleccionado de suelo del sitio, se compone de grava, arena, limos y arcillas [8], el cual debe cumplir requisitos granulométricos y de plasticidad establecidos en especificaciones técnicas para estabilización con cemento. En Colombia, las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) establecen que el suelo destinado a estabilización con cemento debe cumplir criterios de gradación, límites de consistencia y contenido de material orgánico, garantizando su aptitud para desarrollar resistencia y durabilidad. El suelo constituye aproximadamente entre el 85 % y 95 % del peso seco de la mezcla [9], actuando como estructura granular principal. Su función es aportar estabilidad volumétrica, reducir el consumo de cemento y mejorar la distribución de cargas en capas de pavimento.



Figura 4. Tipos de suelos. Fuente: [10]

- **Agua**: Es un ingrediente fundamental, ya que permite la hidratación del cemento y posibilita las reacciones químicas que generan el endurecimiento del material. Además, controla su compactación, siendo necesario que cumpla estándares de pureza para evitar la presencia de contaminantes.

4.1.2 Dosificación de materiales

Esta etapa presenta un alto potencial para la implementación de procesos de automatización, ya que constituye una de las fases más críticas en la producción de suelo-cemento. De ella dependen directamente las propiedades mecánicas, volumétricas y de durabilidad del material estabilizado. El diseño de mezcla de suelo-cemento se basa en la determinación del contenido óptimo de cemento y la humedad óptima de compactación, con el fin de alcanzar la resistencia especificada y garantizar estabilidad volumétrica.

El objetivo del diseño es establecer las proporciones adecuadas de material, las cuales deben cumplir con los requisitos estructurales exigidos para la aplicación (base o subbase del pavimento, estabilización de vías, plataformas industriales), lo principal es determinar la capacidad estructural, luego se deberá determinar la humedad óptima del suelo a tratar y para finalizar se determina el contenido óptimo de cemento mediante ensayos [11]. Los ensayos que se deben tener en cuenta son [12]:

- Límite líquido y plástico de los suelos (I.N.V. E – 125 – 13): Contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, determinando el límite entre el estado líquido y el estado plástico.



Figura 5 y 6. Ensayo líquido y plástico. Fuente:Propia

- Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral (I.N.V. E – 128 – 13): es decir, se determina una relación que compara el peso de las partículas sólidas del suelo con el peso del agua.
- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos a través del hidrómetro (I.N.V. E – 123 – 13): determinar el tamaño y porcentaje de las partículas más finas del suelo (limo y arcilla), pasando el material por diferentes tamices, fundamentales para evaluar su aptitud en procesos de estabilización con cemento.



Figura 7. Tamizaje. Fuente: Propia.

- El Ensayo Modificado de Compactación (I.N.V. E – 141 – 13), equivalente al Proctor Modificado: determina la humedad óptima de compactación y la densidad máxima seca del suelo, se utiliza un molde cilíndrico metálico (volumen conocido), un martillo de compactación de 4.54 kg con altura de caída de 45.7 cm, donde el procedimiento consiste en colocar el suelo en el molde en 5 capas, y a cada capa se le deben aplicar 25 golpes del martillo.



Figura 8 y 9. Proctor y compactado. Fuente: Propia.

- Determinación de contenido de cemento: Se elaboran probetas con diferentes porcentajes de cemento (por ejemplo 4 %, 6 %, 8 %) y se evalúa la resistencia a compresión simple a 7 o 28 días.

Para estos ensayos también es necesario obtener información teórica a través de; curva granulométrica del suelo, límites de Atterberg y clasificación AASHTO.

4.1.3 Mezclado

El proceso de mezclado en el suelo-cemento tiene como objetivo obtener una mezcla homogénea en la cual el cemento se distribuya uniformemente sobre las partículas del suelo y el contenido de agua sea el adecuado para alcanzar la humedad óptima de compactación. Esta etapa es determinante para garantizar la resistencia mecánica y durabilidad del material estabilizado [13].

El mezclado puede realizarse de manera manual (en pequeñas intervenciones) o mediante equipos mecánicos especializados, siendo este último método el más eficiente y recomendado para asegurar uniformidad, control de dosificación y repetibilidad del proceso. En aplicaciones viales, el mezclado Por lo tanto, el control del tiempo de mezclado y de la dosificación de los componentes constituye un factor crítico dentro del proceso productivo del suelo-cemento [14].

4.1.4 Compactación en sitio

Segun Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) a través del Artículo 350.4.1.1 y la 350.4.9, Compactar suelo cemento consiste en aplicar energía mecánica a una mezcla homogénea para eliminar espacios vacíos, reordenar sus partículas y aumentar la densidad, logrando una capa rígida,

resistente y estable para pavimentos. Se realiza en un tiempo limitado (generalmente < 2 horas) tras la mezcla. El objetivo es aumentar la capacidad de soporte y reducir la permeabilidad y contracción [15].

4.1.5 Control de calidad

El material final de suelo-cemento, una vez realizado el proceso de mezclado, debe someterse a diferentes ensayos de control de calidad con el fin de verificar que cumple con los parámetros establecidos en el diseño de mezcla y en las especificaciones técnicas vigentes. El control se realiza tanto en planta (o durante la producción) como en campo, después de su colocación y compactación. Los principales ensayos de control son los siguientes:

- **Verificación de humedad**: Control en planta o durante la producción, tomando una muestra del material final. Se realiza para asegurar que la mezcla se encuentre dentro del rango de humedad óptima de compactación, previamente determinada mediante el ensayo Proctor Modificado (I.N.V. E – 141 – 13). Un contenido de humedad inferior al óptimo puede generar baja compactación y reducción de resistencia. Por el contrario, un exceso de agua puede provocar pérdida de estabilidad y disminución de densidad.
- **Prueba de resistencia a la compresión**: Este ensayo se realiza con el material curado a 3, 7, 14 y 28 días, permite verificar que el material estabilizado (suelo–cemento) alcanza la resistencia estructural requerida en el diseño. Se realiza el ensayo en máquina de compresión**,** donde se coloca el cilindro en la prensa, luego se aplica carga axial continua y uniforme hasta la falla, finalmente se registra la carga máxima alcanzada [16].



Figura 10 y 11. Máquina de compresión. Fuente: Propia.

- **Contenido de cemento:** Este ensayo permite comprobar que la dosificación en obra corresponde al porcentaje de cemento especificado, se realiza mediante un proceso químico, donde con una muestra representativa del material ya mezclado y se analiza en laboratorio mediante reacción química [17].

- **Porcentaje de humedad:** La determinación del contenido de humedad se realiza mediante el método de secado en horno, donde una muestra representativa del material es pesada en estado húmedo, secada a temperatura controlada y posteriormente pesada en estado seco. Con estos datos se calcula el porcentaje de humedad para garantizar una adecuada compactación y desempeño estructural [18].



Figura 12. Prueba de humedad. Fuente: Propia.

Finalmente, se realiza el control de densidad en vía, donde se debe verificar que el material alcance el porcentaje mínimo de compactación exigido respecto a la densidad máxima seca obtenida en laboratorio. Este control se determina mediante el uso de un densímetro nuclear, el cual permite medir directamente la densidad húmeda, densidad seca y contenido de humedad del material compactado.



Figura 13. Densímetro nuclear. Fuente: viaindustrial [19].

Según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en el Artículo 350.5.2.3.1 referente a la compactación, se establece que el material debe

alcanzar como mínimo el porcentaje de compactación especificado en el diseño, generalmente igual o superior al 95 % de la densidad máxima seca determinada mediante el ensayo Proctor Modificado.

En caso de no cumplir con el porcentaje exigido, se deberán realizar las correcciones necesarias, ya sea mediante ajuste de humedad o aplicación adicional de energía de compactación, hasta alcanzar los valores establecidos en la norma.

5.1 Automatización industrial

Centrarse en la automatización industrial es fundamental para contextualizar el proyecto. Consiste en la aplicación de tecnologías de control y monitoreo de procesos, es el uso en conjunto de sistemas computarizados, sensores y actuadores, formando un entorno que tiene el objetivo la reducción de la intervención humana directamente en el proceso. Su implementación permite que los procesos tengan repetibilidad, trazabilidad y precisión, lo cual garantiza calidad del producto [20]. También aporta beneficios para la mano de obra humana, ya que disminuye la exposición a condiciones peligrosas, reduce la carga física y el riesgo de accidentes [21], permite que los operarios se enfoquen en tareas de supervisión, análisis de datos, mejoramientos y mantenimientos.

El entorno de automatización y todos sus componentes relacionados se describen mejor en la pirámide de automatización de la figura 6, donde cada nivel describe partes fundamentales para la integración vertical y horizontal de los diferentes factores a tener en cuenta a la hora de aplicar un entorno automatizado.

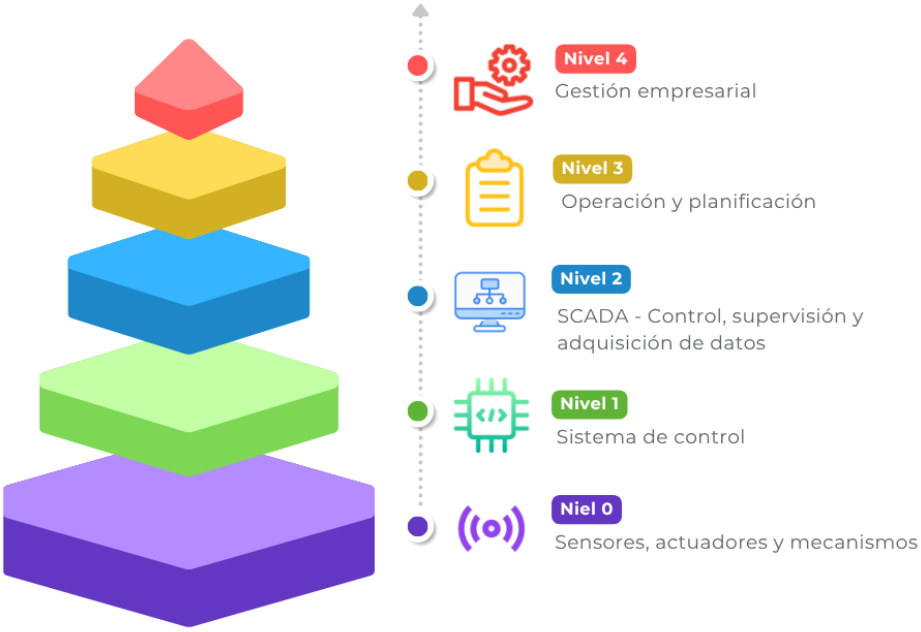


Figura 14. Pirámide de automatización. Fuente: Propia

- **Nivel 0 / Campo:** Hace referencia a los sensores, actuadores y mecanismos, es decir, las piezas que pueden generar señales eléctricas o modifican el estado del sistema.
- **Nivel 1 / Control:** Es todo el control realizado a través de PLC, microcontroladores o Controladores de Automatización Programables (PAC), este nivel se encarga de procesar información y dar órdenes.
- **Nivel 2 / Supervisión:** Es el nivel **SCADA**, sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, incluye la interacción con interfaces humano-máquina.
- **Nivel 3 / Planificación:** Se refiere a la ejecución y gestión de producción, aquí se coordina y optimiza el control de órdenes de fabricación, mantenimiento, calidad y tiempos de ciclo.
- **Nivel 4 / Gestión:** Es la implementación y planificación empresarial: compras, finanzas, recursos humanos, cadena de suministro.

La aplicación de la pirámide, no sólo sigue siendo relevante, sino que también ha evolucionado para adaptarse a los nuevos paradigmas, siendo fundamental en la **Industria 4.0**, garantizando interconectividad, lectura y análisis de datos en tiempo real, integración TI-TO (tecnología de información y tecnología operativa) y flujo continuo de información. Por lo tanto, en la actualidad, al aplicar el modelo de la pirámide se produce un intercambio multidireccional de datos (entre campo, nube y gestión), ya que los niveles de la pirámide se conectan directamente entre ellos y esto se convierte en una red de nodos: cada nivel intercambia información, puede actuar y no simplemente esperar órdenes [22]. Por último y con base a lo anterior, se menciona la reciente implementación del concepto de la **Industria 5.0**, su enfoque principal es la integración de humanos y máquinas para crear un panorama de fabricación centrado en el ser humano y la sostenibilidad. En lugar de buscar la sustitución del trabajo humano por máquinas, la I5.0 busca el aumento de las capacidades humanas [23].

5.1.1 PLC (Programmable Logic Controllers)

Es importante profundizar en los PLC (Programmable Logic Controllers), dispositivos electrónicos diseñados para controlar procesos industriales de forma automática y flexible. Fueron introducidos en la década de 1960 como reemplazo de sistemas de relés electromecánicos y lógica cableada. Hoy constituyen el pilar fundamental de la automatización industrial [24].

Los PLC se componen de tres bloques principales [25]:

- **Entradas (I/O Modules):** Reciben señales de dispositivos de campo (como sensores de peso, nivel, temperatura o presión). Las entradas pueden ser digitales o analógicas e informan al controlador el estado en tiempo real de las variables.
- **Unidad de Procesamiento Central (CPU/Processor):** Ejecuta el programa lógico según las condiciones del proceso. La CPU realiza la ejecución de programas, escaneo y control.

- **Salidas (Output Modules):** El módulo de salida convierte las instrucciones en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por los dispositivos de campo de salida, como motores, bombas o válvulas.

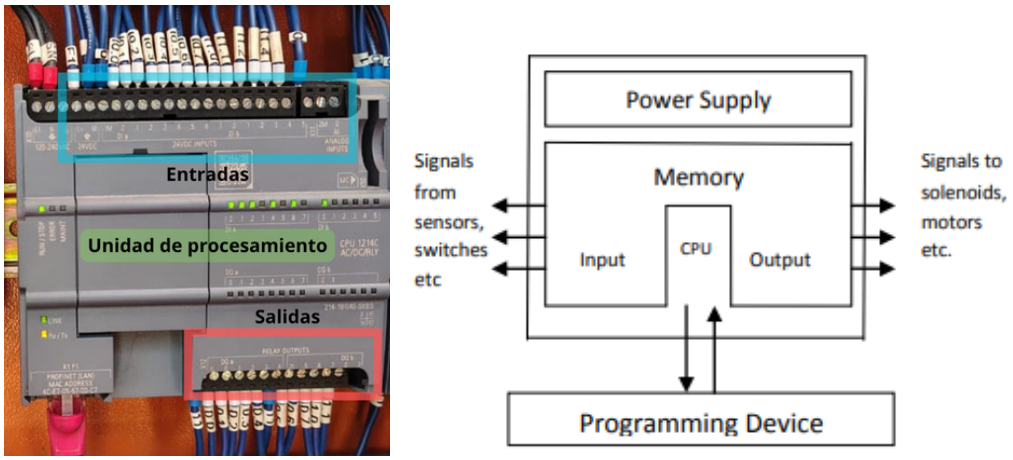


Figura 15. Componentes de un PLC. Fuente: Propia

Figura 16. Pirámide de automatización. Fuente: [26] International Journal of Computer Applications

El funcionamiento de un PLC se basa en un ciclo de escaneo continuo, donde primero lee todas las señales de entrada, luego ejecuta el programa lógico almacenado en su memoria y finalmente actualiza las salidas según los resultados del procesamiento. Este ciclo se repite en milisegundos, permitiendo respuestas rápidas ante cambios en el proceso [26]. Su programación se realiza mediante lenguajes normalizados por la norma IEC 61131-3, entre ellos el Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD) y Structured Text (ST) [27].

El uso de PLC en la industria permite alcanzar precisiones de dosificación reduciendo significativamente los errores humanos y el desperdicio de materia prima, además de facilitar la integración con sensores inteligentes y redes industriales como Modbus o Ethernet/IP [28]. Están diseñados para operar en entornos industriales exigentes, soportando variaciones de temperatura, vibraciones, interferencias electromagnéticas y condiciones ambientales adversas, lo que los hace más fiables que los microcontroladores convencionales.

Entre las marcas más utilizadas a nivel industrial se destacan Siemens, Allen-Bradley (Rockwell Automation), Schneider Electric, Omron y Mitsubishi Electric, reconocidas por su confiabilidad, compatibilidad y soporte técnico en procesos automatizados [29].

5.1.2 Interfaz Humano–Máquina (HMI)

La Interfaz Humano–Máquina (HMI) es una pantalla o panel en cual los operadores interactúan con el sistema de control automatizado. Su propósito es permitir la visualización, supervisión y control del proceso industrial mediante representaciones gráficas de las variables del sistema, como niveles, temperaturas, presiones o estados de actuadores [30].

Las HMI han evolucionado desde paneles analógicos con botones, luces e indicadores físicos hasta pantallas táctiles digitales con conectividad a redes Ethernet, Wi-Fi y acceso a la nube [31]. Estas permiten al operador ejecutar comandos, visualizar alarmas, y modificar parámetros del proceso, procurando que sea de manera intuitiva. Cuando se integra con un sistema SCADA, la HMI se convierte en una herramienta poderosa para garantizar la trazabilidad y la eficiencia del proceso.

En la actualidad, las HMI no solo cumplen funciones de monitoreo, sino que integran tecnologías de la información (TI), permitiendo el análisis de datos en tiempo real y la toma de decisiones basada en indicadores de desempeño. Cuando se integran con un sistema SCADA, las HMI se convierten en una herramienta clave para garantizar la trazabilidad, la eficiencia energética y la optimización del proceso productivo, contribuyendo así a los principios de la Industria 4.0 y la Industria 5.0.

5.1.3 Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación industrial son los encargados de establecer el intercambio de información entre los diferentes dispositivos de un sistema automatizado, es decir, entre el PLC junto a su entorno y sistemas SCADA. Estos protocolos definen los formatos de transmisión de datos.

Entre los protocolos más utilizados en la industria se encuentran Modbus, Profibus, Profinet, EtherNet/IP, y CANopen, cada uno con características específicas dependiendo del nivel de la pirámide de automatización y requerimientos de donde sean implementados. Por ejemplo, Modbus RTU se usa comúnmente en niveles de campo para comunicación entre PLC y dispositivos de medición, mientras que Profinet y EtherNet/IP operan sobre redes Ethernet industriales para la integración con sistemas de supervisión o gestión [32].

En cuanto a su estructura, el protocolo Modbus RTU transmite los datos en bloques llamados tramas, que contienen la dirección del dispositivo al que va el mensaje, un código de función que indica la orden que se quiere ejecutar, los datos que se envían y un código de verificación (CRC) para asegurar que la información llegue sin errores. Este protocolo se usa normalmente sobre líneas RS-485, comunes en redes industriales [33].

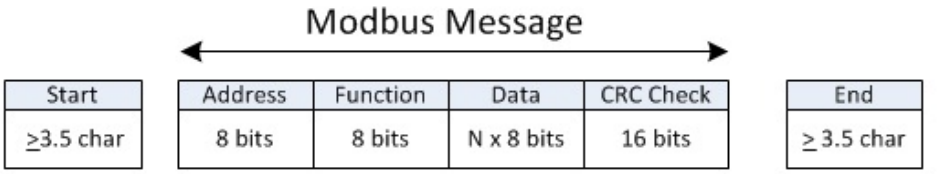


Figura 17. Estructura, el protocolo Modbus RTU. Fuente: [34]

El protocolo **Profibus-DP** trabaja con una comunicación tipo maestro-esclavo, donde un equipo principal, que es el maestro, controla cuándo los demás pueden enviar o recibir información. Sus tramas incluyen campos para el control del mensaje, la dirección del dispositivo, los datos enviados y un comprobador de errores (FCS). Por otro lado, **Profinet** y **EtherNet/IP** usan redes Ethernet industriales. Su información se organiza en paquetes IP, que incluyen datos del remitente, prioridad del mensaje y sincronización del proceso, lo que permite una comunicación más rápida y flexible [35].

5.1.3 Instrumentación industrial

La instrumentación industrial comprende el conjunto de dispositivos y tecnologías utilizados para medir, registrar y controlar las variables físicas y químicas de un proceso. Estas variables pueden incluir temperatura, presión, caudal, nivel, peso o humedad, entre otras. La instrumentación proporciona la información que los controladores utilizan para tomar decisiones y mantener el proceso dentro de los parámetros deseados. Los sensores son los dispositivos encargados de detectar y convertir las magnitudes físicas en señales eléctricas interpretables por el sistema de control. Por su parte, los actuadores son los elementos que ejecutan las acciones de control en respuesta a las órdenes del sistema, tales como válvulas motorizadas, motores eléctricos, cilindros neumáticos o hidráulicos y resistencias calefactoras, los cuales permiten modificar las condiciones del proceso para mantenerlo estable y eficiente [36].

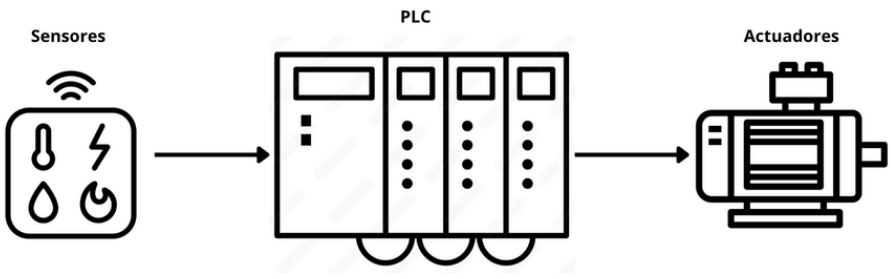


Figura 18. Instrumentación industrial. Fuente: Propia.

5. Estado del arte

Diversos estudios e implementaciones en los últimos años han demostrado que la automatización industrial aplicada a la producción de materiales de construcción genera mejoras significativas en la precisión de dosificación, la repetibilidad del proceso, la reducción de desperdicios y el aumento en la calidad final del producto. Estas investigaciones se han enfocado principalmente en la integración de controladores lógicos programables (PLC), sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA), sensores inteligentes, más recientemente, plataformas IoT e inteligencia artificial para el control adaptativo del proceso.

5.1 Serie DMC: versatilidad total y producción para múltiples aplicaciones

La empresa DOMAT [37] representa un referente en el desarrollo de plantas dosificadoras y mezcladoras orientadas a la versatilidad operativa y la adaptación a distintos contextos productivos. Dentro de su portafolio, la Serie DMC se posiciona como una solución integral que combina en un solo módulo los procesos de dosificación y mezcla, optimizando tiempos de instalación, logística y puesta en marcha en obra.

Este sistema se caracteriza por su diseño compacto y configuración autónoma, lo que facilita su traslado y montaje en campo con requerimientos mínimos de infraestructura auxiliar. Desde el punto de vista técnico, incorpora un sistema de control automatizado adaptable, permitiendo ajustar parámetros de producción según el tipo de material y las condiciones específicas del proyecto.

Una de las principales fortalezas de la Serie DMC es su capacidad para producir múltiples tipos de mezclas dentro de una misma plataforma: concreto convencional, concreto compactado con rodillo (CCR), mezclas de suelo-cemento. Esta multifuncionalidad la convierte en una alternativa estratégica para proyectos de infraestructura vial, obras civiles de gran escala y operaciones mineras.

De esta manera, la propuesta tecnológica de DOMAT evidencia la evolución de las plantas dosificadoras hacia sistemas multifunción, automatizados y estratégicamente diseñados para responder a escenarios productivos dinámicos, consolidándose como una solución relevante en el desarrollo actual de tecnologías para producción de mezclas cementantes y suelo-cemento.

5.2 Digitization of the concrete production chain using computer vision and artificial intelligence

El estudio “Digitalización de la cadena de producción del concreto mediante visión por computadora e inteligencia artificial” [38], no es directamente relacionado con el material suelo - cemento, aún así presenta alternativas relevantes para un sistema de dosificación, ya que aborda la digitalización integral de la cadena de producción del concreto utilizando visión por computadora (CV) y algoritmos de inteligencia artificial (IA), con el objetivo de optimizar la sostenibilidad y la eficiencia de recursos en mezclas complejas que incorporan materiales reciclados e industriales. La investigación busca crear un bucle digital de control para el concreto premezclado, capaz de ajustar la mezcla en tiempo real según los datos capturados por sensores

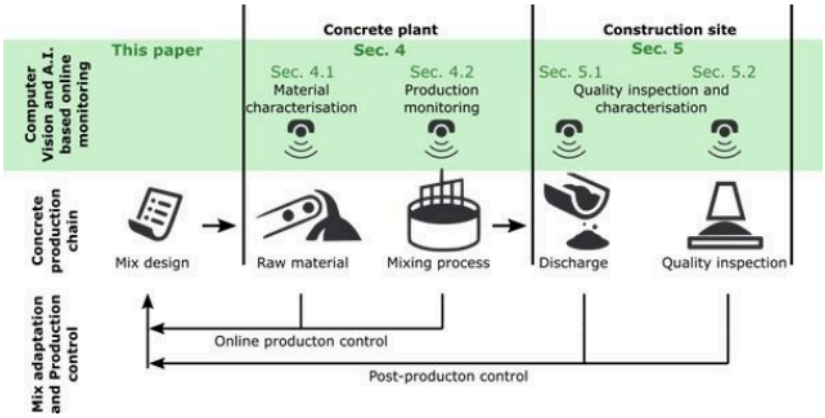


Figura 19. Digitalización de la cadena de producción del concreto. Fuente: [38].

Se han desarrollado varias técnicas digitales basadas en CV y AI para monitorear el proceso en tiempo real (en la planta) y realizar control de calidad posterior a la producción (en la obra):

- Caracterización de agregados en línea: se implementan cámaras sobre la banda transportadora para determinar, mediante redes neuronales convolucionales (CNN), la distribución granulométrica, forma y composición de los agregados con una precisión superior al 95 %.
- Monitoreo del proceso de mezcla: se utiliza una configuración estereoscópica que reconstruye la superficie 3D del concreto fresco; los datos se procesan con una red neuronal recurrente (RNN) que infiere propiedades reológicas como viscosidad y esfuerzo de fluencia durante la mezcla.
- Evaluación digital en obra: a través de análisis de imágenes y fotogrametría, se evalúan propiedades del concreto fresco (homogeneidad, contenido de pasta y distribución granulométrica) durante la descarga del camión o en ensayos, lo que permite una inspección automatizada sin contacto.

El documento subraya varios desafíos inherentes a la industria y al estado actual de las tecnologías, así como las áreas que aún están en desarrollo. A pesar de que la producción de concreto tiene altas tasas de repetición, la construcción sigue siendo una de las industrias menos digitalizadas a nivel mundial. Actualmente, el sector carece de sistemas de sensores que proporcionen datos y algoritmos de tratamiento de datos, necesarios para un control de calidad. El control de calidad en línea durante la mezcla se limita a estimaciones gruesas de consistencia basadas en el consumo de energía eléctrica del mezclador, lo que no es suficiente para derivar las complejas propiedades reológicas del concreto fresco.

En conclusión, el proyecto demostró avances experimentales relevantes, pero su implementación industrial aún requiere validación a gran escala, optimización del procesamiento en tiempo real y una infraestructura digital adaptada al concreto. Pese a sus limitaciones, el trabajo representa un referente pionero en la transición hacia una producción de concreto inteligente y sostenible.

5.3 An intelligent soil-cement mixing column driver

El artículo “Un controlador inteligente de columna de mezcla de suelo y cemento” [39] presenta el desarrollo de un sistema de accionamiento inteligente para columnas de mezcla suelo-cemento, orientado a optimizar el proceso constructivo mediante la integración de control automatizado y monitoreo en tiempo real. La investigación se enfoca en la incorporación de algoritmos de control capaces de ajustar parámetros operativos durante la ejecución, tales como velocidad de penetración, rotación y dosificación del material cementante, con el objetivo de garantizar uniformidad y calidad estructural en las columnas ejecutadas.

Desde el punto de vista conceptual, el aporte principal del trabajo radica en la transición de un proceso tradicionalmente dependiente del operario hacia un sistema con capacidades de regulación automática y retroalimentación continua. El modelo propuesto integra adquisición de datos, procesamiento y toma de decisiones en tiempo real, lo que permite mejorar la precisión del mezclado in situ y reducir la variabilidad asociada a factores humanos o condiciones heterogéneas del terreno. Esta aproximación se alinea con los principios de la automatización industrial moderna, particularmente en lo relacionado con control inteligente y optimización de procesos constructivos.

No obstante, el estudio presenta ciertas limitaciones respecto al enfoque de automatización de plantas industriales de suelo-cemento. Su alcance se concentra en el sistema de accionamiento de columnas específicas y no aborda de manera integral la arquitectura completa de una planta de producción (dosificación, pesaje, control de humedad, integración PLC-SCADA o gestión centralizada de lotes). Asimismo, el análisis se orienta principalmente al desempeño operativo del equipo y no profundiza en aspectos como digitalización a nivel de planta.

En consecuencia, este artículo resulta pertinente para el marco teórico como antecedente de automatización inteligente aplicada a procesos de mezcla suelo-cemento, especialmente en lo relacionado con control en tiempo real y reducción de variabilidad operativa.

5.4 Integration of Industry 5.0 Technologies in the Concrete Industry: An Analysis of the Impact of AI-Based Virtual Assistants

En este artículo "Integración de las tecnologías de la Industria 5.0 en la industria del concreto: Un análisis del impacto de los asistentes virtuales basados en IA." [40], aborda la integración de la Inteligencia Artificial (AI) y los asistentes virtuales en la industria del concreto, un sector que tradicionalmente ha estado rezagado en términos de digitalización. El objetivo central fue diseñar, implementar y validar un asistente basado en AI, llamado KobBot, diseñado para optimizar la operación de plantas automatizadas de concreto bajo los principios de Industry 5.0.

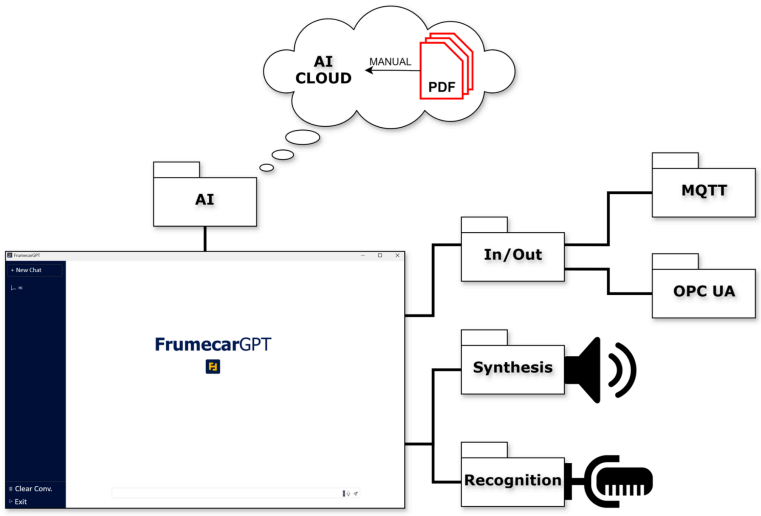


Figura 20. Integración de las tecnologías de la Industria 5.0 en la industria del concreto. Fuente: [40].

En su validación industrial, KobBot logró una reducción del 58% en incidentes operativos, un ahorro mensual de 783 kWh y 180 kg de CO_2, además de una precisión de voz del 96 % y exactitud técnica del 100 %. Los operadores reportaron mejoras en eficiencia y seguridad laboral.

No obstante, el sistema aún enfrenta desafíos relacionados con el ruido ambiental, la interpretación de consultas ambiguas y los riesgos de ciberseguridad por depender de servicios en la nube. Los autores proponen avanzar hacia versiones con capacidades multimodales, mantenimiento predictivo y arquitecturas híbridas (nube/local) que fortalezcan su autonomía y seguridad. Este desarrollo marca un paso relevante hacia la automatización inteligente y sostenible del proceso de producción de concreto.

6. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y experimental, ya que busca solucionar un problema real del proceso productivo de concreto mediante el desarrollo de un sistema automatizado. Se orienta tanto a la investigación y observación de fallos, como al desarrollo tecnológico, con el propósito de diseñar y simular un sistema que permita optimizar la eficiencia, trazabilidad, junto a la calidad en la dosificación y mezclado del concreto en planta.

6.1 DISEÑO METODOLÓGICO

6.1.1 Fase 1. Diagnóstico del proceso actual

Se realizará una investigación y caracterización técnica del proceso productivo, abarcando la dosificación, mezclado y despacho. Se analizarán las causas de variabilidad, las pérdidas de materiales y las deficiencias en la trazabilidad de la información. Utilizando técnicas de recolección de datos, con revisión documental y normativa, observación en plantas y registros de tiempos y consumos.

6.1.2 Fase 2. Diseño del sistema automatizado

Se desarrollará la propuesta técnica del sistema automatizado, integrando sensores de peso y flujo, así como actuadores (válvulas, compuertas y motores). Se elaborará la arquitectura de control basada en PLC y HMI, considerando la comunicación industrial mediante protocolos estándar.

6.1.3 Fase 3. Diseño de algoritmo de control y HMI

Se definirá la lógica de control del proceso, estableciendo secuencias de operación, temporizaciones y condiciones de seguridad. Se implementará la programación en un entorno de desarrollo industrial, definiendo rutinas de control para cada etapa del proceso para garantizar repetibilidad y confiabilidad, además de el diseño intuitivo y visual de una interfaz interactiva.

6.1.4 Fase 4. Validación mediante simulación y análisis de datos

Se realizará una simulación funcional del sistema propuesto utilizando herramientas digitales, verificando la respuesta del sistema ante variaciones de variables, tiempos de dosificación, y flujo de materiales. Se evaluará la mejora potencial en eficiencia, precisión. Además de la trazabilidad de datos, realizando tratamiento y análisis de la información junto a cumplimiento y controles de calidad.

7. Cronograma

Tabla 1. Cronograma. Fuente: Propia.

TAREA	Mes1				Mes2				Mes3				Mes4			
	Sem1	Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6	Sem7	Sem8	Sem9	Sem10	Sem11	Sem12	Sem13	Sem14	Sem15	Sem16
Fase 1 - Diagnostico del proceso actual	Investigación															
	Evaluación de requrimientos del sistema															
	Recolección de datos															
Fase 2 - Diseño del sistema		Propuesta tecnica														
		Selección de PLC, HMI, protocolos de comunicacion														
			Seleccion de sensores y actuadores													
Fase 3 - Diseño del algoridmo de control					Implementación de la lógica de control del proceso											
								Diseño HMI								
									Revisión de seguridad							
Fase 4 - Validación mediante simulación									Implementación sumulada							
										Pruebas de funcionamiento						
											Control de calidad		Tratamiento de datos			
Fase 5 - Entrega final								Documentación								
															Presentación	

8. Alcances y Limitaciones

8.1 Alcances

- Automatizar el proceso de dosificación de materiales (agregados, agua y cemento), mediante la selección de sensores para la planta, asegurando compatibilidad eléctrica y robustez industrial que permiten el control de cada actuador.

- Diseñar la arquitectura funcional y de comunicación del sistema, especificando el tipo de PLC, sus módulos de expansión, protocolos, panel HMI, red de campo y distribución de señales.

- Se diseña y programa la lógica de control para gestionar la secuencia de operación del proceso, contemplando el pesaje de materiales, control de flujo, mezclado y verificación de condiciones de seguridad.

- El proyecto contempla una implementación **simulada** mediante software industrial, donde se evalúa el desempeño del sistema automatizado, su respuesta a las variables del proceso y la mejora potencial en eficiencia y trazabilidad.

- Aunque la validación se realiza en un entorno virtual, el diseño y la arquitectura de control se elaboran con criterios técnicos que permiten su futura adaptación a plantas de concreto reales de tipo dosificadora e incluso a plantas de dosificación en general.

8.2 Limitaciones

- La validación se realiza en un entorno simulado, donde las condiciones de operación son ideales y no consideran totalmente factores externos como variaciones ambientales o fallas mecánicas de los equipos.

- La información de los procesos productivos y los parámetros operativos utilizados proviene de plantas de referencia y literatura técnica, por lo que los resultados de eficiencia pueden variar frente a condiciones reales de producción.

- El proyecto no desarrolla un estudio financiero o de retorno de inversión detallado; su enfoque es técnico y funcional, orientado a la demostración de viabilidad operativa del sistema automatizado.

- El entorno virtual no permite simular imprevistos como fallas eléctricas, sobrecargas de tolvas o variaciones en la granulometría de los materiales.

9. Presupuesto

Tabla 2. Recursos materiales. Fuente: Propia.

Recursos materiales				
Item	**Descripción**	**Cantidad aproximada**	**Precio aproximado uni. (COP)**	**Precio total (COP)**
Dispositivos de detección	Sensores de peso	4	$ 1.000.000,00	$ 4.000.000,00
	Sensores de flujo	2	$ 700.000,00	$ 1.400.000,00
	Sensores de nivel	4	$ 1.200.000,00	$ 4.800.000,00
	Sensores de humedad	1	$ 600.000,00	$ 600.000,00
Actuadores	Motor trifácico	1	$ 800.000,00	$ 800.000,00
	Electroválvula neumática	3	$ 450.000,00	$ 1.350.000,00
	Cilindros neumáticos de doble efecto	2	$ 300.000,00	$ 600.000,00
	Bomba de agua	2	$ 450.000,00	$ 900.000,00
		General		
Materiales de ensamble	Cableado	1	$ 250.500,00	$ 250.500,00
	Tornilleria	1	$ 60.000,00	$ 60.000,00
	Interruptores y muletillas	1	$ 126.000,00	$ 126.000,00
	Protecciones y Contactores	1	$ 432.000,00	$ 432.000,00
			Total	$ 15.318.500,00

Tabla 3. Recursos de software. Fuente: Propia.

Software		
Item	**Descripción**	**Precio total (COP)**
Control	PLC	$ 2.600.000,00
	Software de programaci	$ 1.547.000,00
	Modulo de 16 entradas	$ 800.000,00
	Computador	$ 2.999.900,00
Simulacion	Software de simulación	$ 250.000,00
Visualizacion	Pantalla HMI	$ 3.100.000,00
Comunicacion	Cable apantallado 20 m	$ 80.000,00
	Total	$ 11.376.900,00

Tabla 4. Recursos Humanos. Fuente: Propia.

Recursos humanos - Mano de obra				
Item	**Descripción**	**Tiempo**	**Precio mensual (COP)**	**Precio total (COP)**
Software	Ingeniero de automatización	4 meses	$ 3.525.000,00	$ 14.100.000,00
Ensamble	Tecnico electromecanico	2 meses	$ 2.072.000,00	$ 4.144.000,00
Dirección	Diretor de poryectos	4 meses	$ 5.100.000,00	$ 20.400.000,00
		Total	$ 10.697.000,00	$ 38.644.000,00

La mano de obra es calculada por un periodo de 2 a 4 meses teniendo en cuenta salarios para técnicos, ingenieros en automatización y director de proyectos, tomando como referencia las asignaciones salariales establecidas en el Decreto 0611 de 2025 [41]. Con base en esta normativa, se utilizaron como guía los valores correspondientes para el profesional responsable del diseño, desarrollo y programación del sistema. También se tiene en cuenta al director de proyectos encargado de coordinar las operaciones, por último, para el técnico de ensamble y soporte operativo.

Tabla 5. Recursos totales. Fuente: Propia.

Resumen total	
Item	**Precio total (COP)**
Materia prima	$ 15.318.500,00
Software	$ 11.376.900,00
Mano de obra	$ 38.644.000,00
Total	$ 65.339.400,00

La mano de obra representa el costo más alto porque requiere personal especializado en programación, integración y validación de sistemas automatizados. Sin embargo, este costo se justifica porque gran parte del trabajo es de diseño y puesta en marcha inicial; es decir, una vez desarrollado el sistema, puede replicarse en múltiples plantas sin necesidad de invertir nuevamente en todo el proceso técnico. Esto hace que, al escalar la automatización a más instalaciones, el costo de la mano de obra se distribuya y disminuya significativamente por planta, aumentando la rentabilidad del proyecto.

10. Diagnóstico y caracterización del proceso productivo actual

10.1 Levantamiento y modelado del flujo operativo

Como punto de partida del diagnóstico, se realizó el levantamiento del procedimiento actual de producción en planta, representado en la Figura 21, 22 y 23, donde se identifican los principales componentes físicas del sistema: bandas de dosificación y tolvas para material agregado abastecidas externamente por pala cargadora, tornillo sin fin para el transporte del cemento junto a tolva de almacenamiento, bomba de agua, mezclador continuo para la homogeneización suelo–cemento y banda inclinada transportadora para el despacho final hacia volqueta.

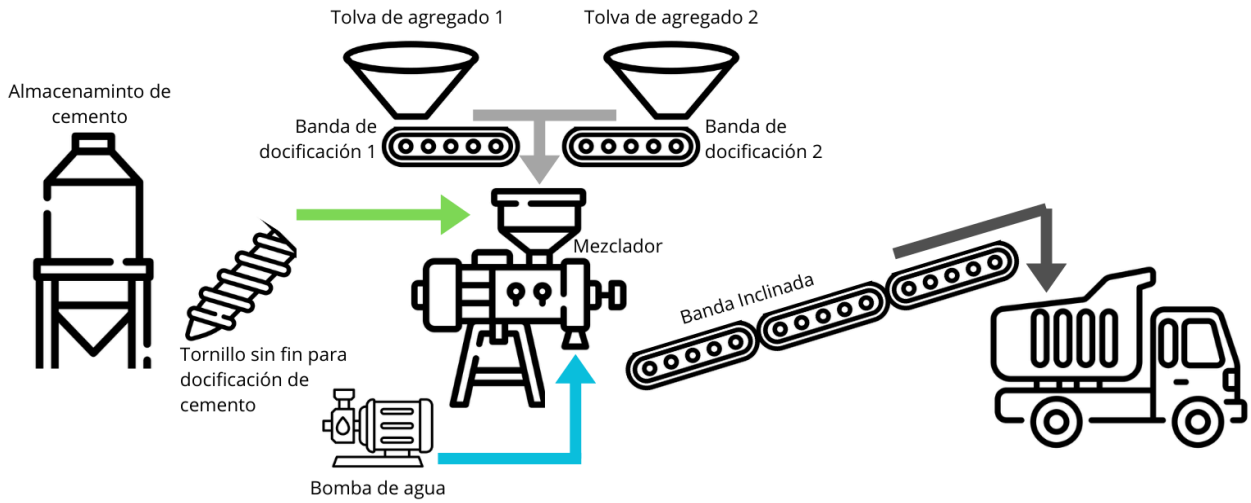


Figura 21. Diagrama descriptivo del proceso actual de producción. Fuente: propia.



Figura 22. Planta de producción de suelo - cemento con explicación. Fuente: propia.



Figura 23. Planta de producción de suelo - cemento con explicación. Fuente: propia.

Complementando el reconocimiento, la figura 24 presenta el esquema del sistema de automatización, así como los actuadores implementados sobre la planta, el cual integra un PLC KINCO como elemento principal de control y una pantalla HMI encargada de la visualización y seguimiento del proceso. Se hace uso de protocolo Modbus con los módulos de control de pesaje BST100-M11S, encargados de adquirir y procesar la señal proveniente de las celdas de carga instaladas en los elementos de dosificación.

Así mismo, el PLC establece comunicación con los drivers de los variadores de frecuencia, responsables del accionamiento y regulación de velocidad de los motores. Esta arquitectura permite el ajuste dinámico de velocidad en función de las condiciones de operación requeridas. El sistema también incorpora sensores tipo encoder para la retroalimentación de velocidad y posición en los elementos rotativos, junto a celdas de carga para control de pesaje, tipo barra y tipo S, además de sensor de flujo tipo paleta. En cuanto a los actuadores, se incluyen motores eléctricos y contactores que permiten ejecutar las órdenes generadas por el controlador.

Adicionalmente en las figuras 25, 26 y 27 se observa el posicionamiento de los sensores, la respectiva relación con los módulos de pesaje y actuadores, así como variadores de velocidad. Donde es necesario recalcar que el proceso realiza el control por medio de los módulos de pesaje, el PLC recibe un datos en miliAmperios y estos son enviados directamente a los variadores.

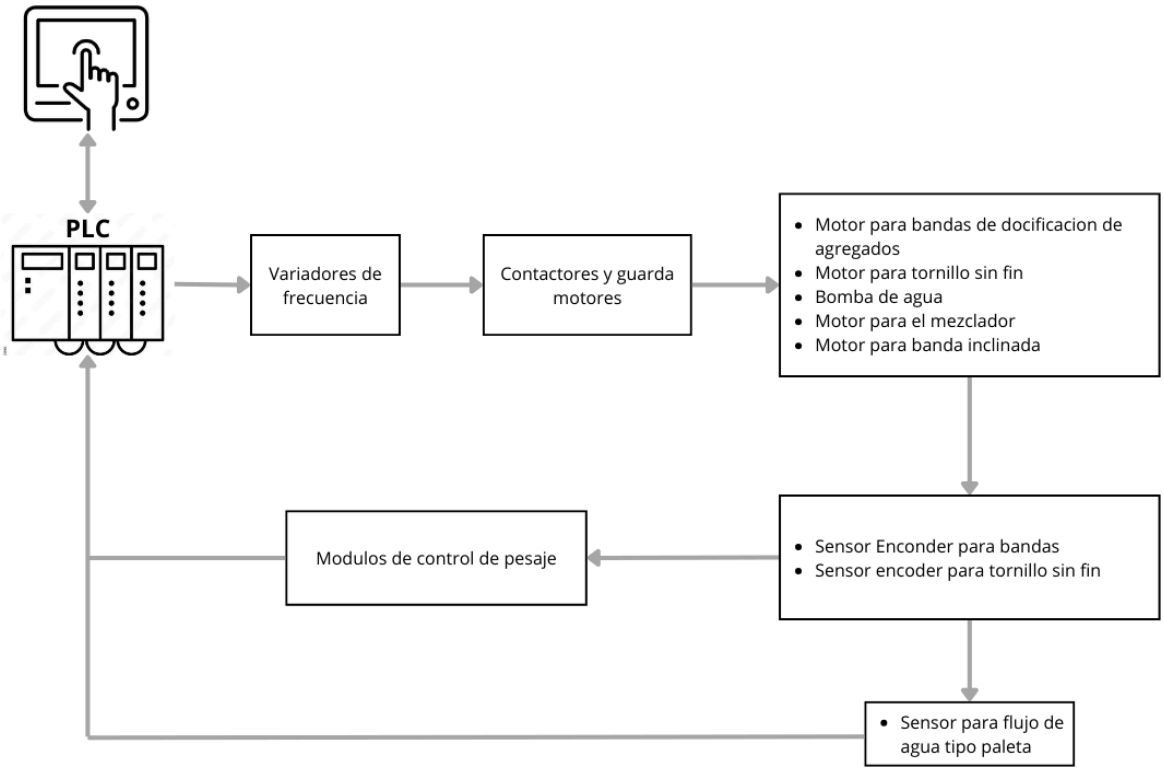


Figura 24. Diagrama de instrumentación. Fuente: propia.

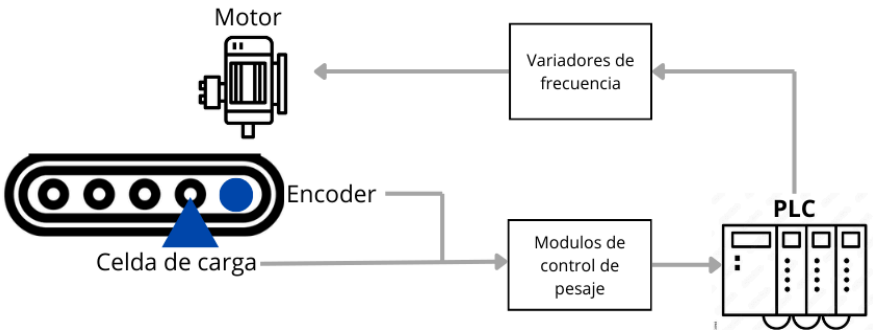


Figura 25. Diagrama de instrumentación de bandas de dosificación. Fuente: propia.

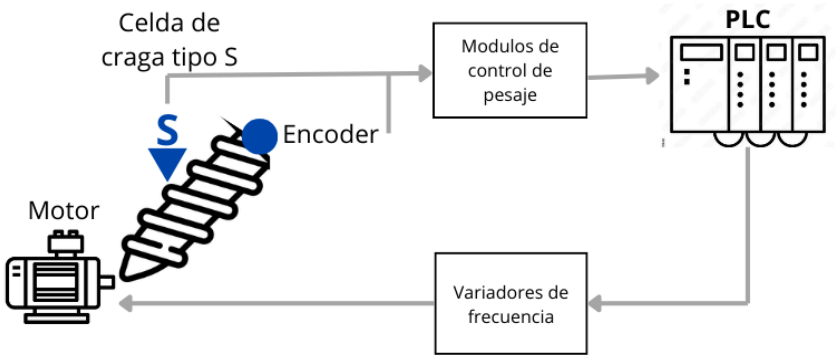


Figura 26. Diagrama de instrumentación de tornillo sin fin. Fuente: propia.

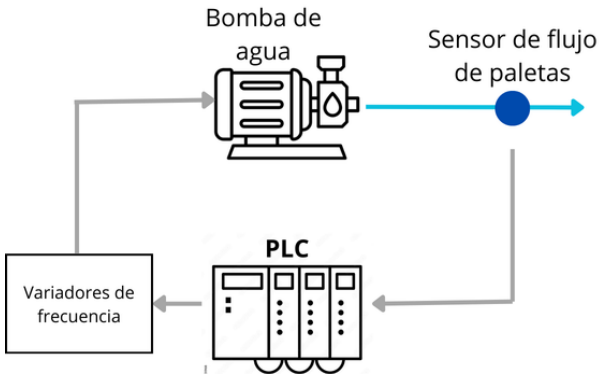


Figura 27. Diagrama de instrumentación para dosificación de agua. Fuente: propia.

Aunque el proyecto cuenta con limitaciones de intervención eléctrica, es necesario definir qué se utiliza elementos como el guardamotor, estos dispositivos magnetotérmico diseñado específicamente para proteger motores eléctricos contra sobrecargas, cortocircuitos y pérdida de fase. Combina la función de un disyuntor y un relé térmico en una sola unidad, cortando el suministro eléctrico al detectar corrientes anormales para evitar que el motor se queme [42]. También se utilizan contactores, son dispositivos electromecánicos diseñados para establecer o interrumpir el flujo de corriente en circuitos eléctricos de alta potencia, actuando como un interruptor automático y remoto [43].

Teniendo en cuenta los elementos mecánicos y de instrumentación previamente descritos, se hace un reconocimiento de señales de entradas y salidas (Tabla 6), además se elaboró un diagrama de flujo explicativo del proceso de control ejecutado por el PLC (Figura 28), con el propósito de representar de manera estructurada la lógica secuencial de operación del sistema.

Tabla 6. Mapa de entradas y salidas. Fuente: Propia.

Nombre	Address	Tipo	Descipcion
Parada_de_Emergencia	%Ix.x	Entrada	Boton fisico de para de emergncia, se cuenta con un total de 6 alrededor de toda la planta
Falla_Guardamotor_Mezcladora	%Ix.x	Entrada	Señal enviada por el guarda motor fisico en el tablero de corriente cuando este se dispara a modo de proteccion devido a sobrecargas de corriente
DI_KM1_Mezclador	%Ix.x	Entrada	Contactor para el mezclador
DI_KM2_Banda_Agregado1	%Ix.x	Entrada	Contactor para la banda de agregados 1
Falla_VFD_Agregado1	%Ix.x	Entrada	Señal de falla que envia el variador de frecuencia del agregado 1
DI_KM3_Banda_Agregado2	%Ix.x	Entrada	Contactor para la banda de agregados 2
Falla_VFD_Agregado2	%Ix.x	Entrada	Señal de falla que envia el variador de frecuencia del agregado 2
DI_KM4_Tornillo_Cemento	%Ix.x	Entrada	Contactor para el tornillo sin fin para cemento
Falla_VFD_Tornillo_Cemento	%Ix.x	Entrada	Señal de falla que envia el variador de frecuencia del tornillo sin fin para el cemento
DI_KM5_Bomba_Agua1_Suelo_Cemento	%Ix.x	Entrada	Contactor para el tornillo sin fin para bomba de agua
Falla_VFD_Bomba_Suelo_Cemento	%Ix.x	Entrada	Señal de falla que envia el variador de frecuencia de la bomba de agua
Confirmacion_Banda_Inclinada	%Ix.x	Entrada	Contactor para la banda inclinada
Falla_Termico_Banda_Inclinada	%Ix.x	Entrada	Señal enviada por el guarda motor fisico en el tablero de corriente cuando este se dispara a modo de proteccion devido a sobrecargas de corriente
Mezcladora	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor del mezclador
Agregados1	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor de la banda 1
Agregados2	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor de la banda 2
Tornillo_Sinfin	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor de tornillo de cemento
Bomba_Suelo_Cemento	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor de la bomba
Banda_Inclinada	%Qx.x	Salida	Señal del PLC para el contactor de la banda inclinada
Piloto_Amarillo	%Qx.x	Salida	Encendido cuando hay una falla
Piloto_Verde	%Qx.x	Salida	Encendido cuando se esta en proceso
Agregados1_Entrada_Modulo_Pesaje_4a20mA	%AIWx	Entrada	Datos enviados a modulos analogicos del PLC desde los modulos de pesaje de la banda de agregados 1
Tornillo_Entrada_Modulo_Pesaje_4a20mA	%AIWx	Entrada	Datos enviados a modulos analogicos del PLC desde los modulos de pesaje del tornillo
Agregados2_Entrada_Modulo_Pesaje_4a20mA	%AIWx	Entrada	Datos enviados a modulos analogicos del PLC desde los modulos de pesaje de la banda de agregados 2
Agregados1_Salida_VDF_4a20mA	%AQWx	Salida	Salida en miliAmperios a los variadores de frecuencia
Agregados2_Salida_VDF_4a20mA	%AQWx	Salida	Salida en miliAmperios a los variadores de frecuencia
Tornillo_Cemento_Salida_VDF_4a20mA	%AQWx	Salida	Salida en miliAmperios a los variadores de frecuencia
Bomba_Suelo_Cemento_Salida_VDF_4a20mA	%AQWx	Salida	Salida en miliAmperios a los variadores de frecuencia
Valvula_Rotativa_Salida_VDF_4a20mA	%AQWx	Salida	Salida en miliAmperios a los variadores de frecuencia

Este diagrama permite visualizar cómo el controlador recibe las señales provenientes de los módulos de pesaje, encoders y demás sensores, procesa la información conforme a la receta programada y genera las órdenes correspondientes hacia los variadores de frecuencia y actuadores del sistema. De esta manera, se establece la secuencia de arranque, dosificación, control de peso objetivo, activación del mezclador y descarga del material. Este análisis es la base para el posterior rediseño del algoritmo de control, orientado a mejorar la estabilidad del proceso, reducir variabilidad y fortalecer la trazabilidad operativa.

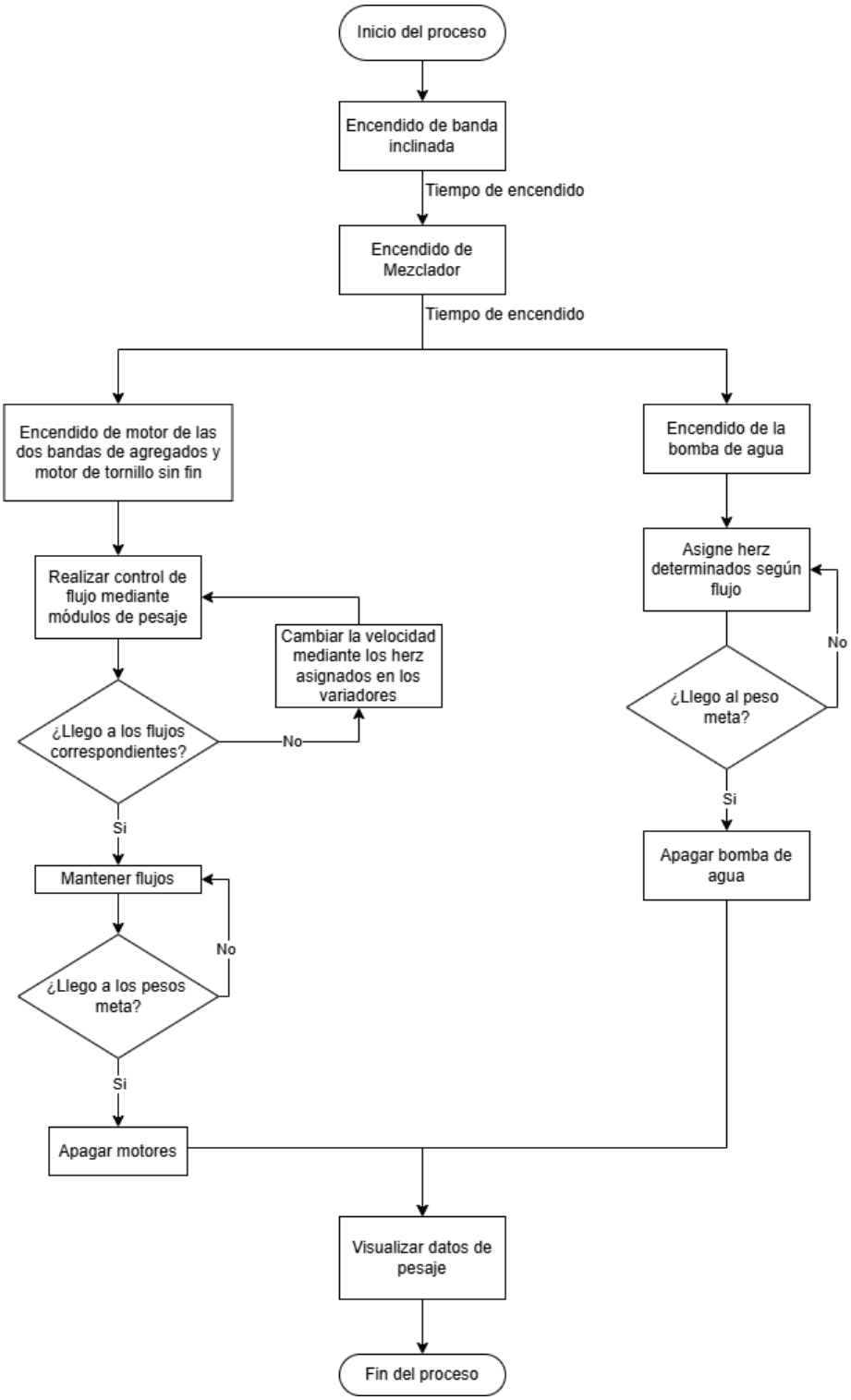


Figura 28. Diagrama de flujo. Fuente: propia.

Por último se hace énfasis en la pantalla HMI, la cual cuenta con una guía visual del proceso además de brindar interacción directa de órdenes de inicio, pare y cantidades del proceso dependiendo de la fórmula, así como activaciones manuales para pruebas mecánicas y alarmas.



Figura 29. HMI. Fuente: propia.

10.2 Identificación de posibilidades de mejora

A partir del análisis detallado del sistema de control y la instrumentación, se identificaron limitaciones técnicas que inciden directamente en la precisión de la dosificación y en la confiabilidad de la información generada por el proceso.

En primer lugar, los módulos de pesaje presentan un comportamiento impreciso durante la etapa de dosificación, evidenciando que no se sigue estrictamente el flujo establecido. Esta condición genera desviaciones acumulativas en la proporción de materiales, afectando la homogeneidad del producto final. Particularmente, en el caso del cemento, se observó que el sistema no realiza un registro

exacto del consumo real por lote, lo que dificulta la verificación del cumplimiento de la receta establecida y limita el control sobre el uso eficiente del insumo.

Por lo tanto, llega a no cumplir con lo establecido en la Norma INVÍAS 350 – Suelo–Cemento, la cual exige el cumplimiento riguroso del contenido de cemento definido en el diseño de mezcla, así como el control preciso de las proporciones para garantizar la resistencia y durabilidad del material. La falta de exactitud en la dosificación compromete el cumplimiento de los parámetros técnicos exigidos por la norma, especialmente en lo relacionado con resistencia a la compresión y uniformidad del material estabilizado.

Adicionalmente, el proceso no cuenta con un control del caudal de agua. Actualmente, el sistema únicamente activa el variador de velocidad asignando una frecuencia en Hertz, sin implementar un lazo de retroalimentación basado en medición real de caudal. La Norma INVÍAS 350 establece que la mezcla debe garantizar una relación agua–cemento acorde con el contenido óptimo determinado en laboratorio (ensayos Proctor y resistencia), siendo este un parámetro crítico para alcanzar la densidad y resistencia especificadas. La ausencia de medición y control automático del caudal compromete directamente esta relación, afectando la calidad mecánica del suelo–cemento producido.

Por otra parte, se identificó que las etapas del proceso no se encuentran optimizadas en términos de sincronización y transición automática, generando tiempos muertos y variaciones en los ciclos de producción. Esta situación impacta la eficiencia global de la planta y puede generar inconsistencias en la homogeneidad de los lotes, lo cual contraviene el principio de uniformidad exigido en los procesos de producción de materiales estabilizados para infraestructura vial.

Considerando que la etapa de mezclado constituye una fase crítica dentro del proceso, y que el sistema cuenta con un mezclador continuo, cualquier falla o interrupción en este equipo no implica necesariamente la detención inmediata de la alimentación de materiales. Esta condición puede provocar la acumulación de producto en el interior del sistema, generando obstrucciones, sobrecargas mecánicas y posibles afectaciones en la calidad de la mezcla.

Finalmente, se evidenció una falta de trazabilidad de la producción, dado que el sistema no consolida de manera automática los datos históricos asociados a cada lote (pesos reales, consumo de materiales y volumen producido). La Norma INVÍAS 350 exige controles y verificaciones que permitan comprobar el cumplimiento de las especificaciones técnicas durante la ejecución. La inexistencia de registros digitales organizados limita la posibilidad de auditoría técnica, control estadístico del proceso y validación documental ante interventoría.

Estas problemáticas confirman la necesidad de rediseñar la arquitectura de automatización y el algoritmo de control, orientándose hacia una dosificación más precisa, integración completa de variables críticas, optimización del ciclo productivo y generación de registros digitales confiables en tiempo real.

11. Propuesta técnica y diseño del sistema automatizado

En esta fase se desarrollará la propuesta técnica del sistema automatizado para la planta de suelo-cemento, definiendo de manera integral los elementos de medición, control y actuación requeridos para optimizar el proceso productivo. La selección de instrumentación para el sistema automatizado se realizó considerando las condiciones operativas de la planta de suelo-cemento, tales como presencia de polvo, vibraciones mecánicas, variaciones de carga, operación continua y requerimientos de precisión en la dosificación. El análisis incluye la comparación de diferentes alternativas disponibles en el mercado, evaluando parámetros técnicos, compatibilidad con sistemas de control industrial, robustez mecánica, facilidad de integración y relación costo-beneficio. Aunque la propuesta no contempla necesariamente la sustitución física inmediata de todos los dispositivos actuales, se establecen criterios técnicos de referencia que permitirían una futura modernización del sistema, garantizando adaptabilidad tecnológica y escalabilidad.

11.1 Selección de instrumentación

El diseño contempla la integración de sensores de peso (celdas de carga) para el control de dosificación de materiales, específicamente del cemento, además de sensor de corriente para el mezclador. Asimismo, se seleccionarán los actuadores necesarios, tales como válvulas de control.

11.1.1 Selección de sensores de peso

Para el control de dosificación de cemento se requiere una medición precisa y estable del peso en tolvas, donde es necesario evaluar parámetros como; Rango de medición (kg o toneladas), precisión (%FS), protección ambiental (IP65, IP67, IP68), señal de salida (mV/V o 4–20 mA mediante transmisor), resistencia a vibraciones, material de fabricación (acero inoxidable). Se evaluaron celdas de carga tipo:

Viga (Shear Beam): Funciona como un voladizo, es una barra de acero inoxidable, aleación de acero niquelado o aleación de aluminio anodizado, se deforma ligeramente bajo carga, permitiendo que las galgas o transductores extensométricos en su interior convierta la señal eléctrica, son utilizadas para medir peso con alta precisión en plataformas, básculas y tolvas [44]. Estas celdas soportan entre 100 – 5000 kg y su costo es medio a bajo [45].



Figura 30. Celda de carga tipo viga. Fuente: MAVIN [44].

Compresión: Es un transductor de fuerza diseñado para medir cargas de aplastamiento o empuje hacia abajo, convirtiendo la deformación mecánica en una señal eléctrica medible, son dispositivos de forma cilíndrica, tienen un núcleo central o columna que funciona como elemento de soporte de peso [46], son de acero inoxidable, diseñadas para sobresalir en entornos exigentes, se usan para básculas para camiones y ferrocarriles, pesaje de tanques y silos. Con un rango de capacidad de 1 tonelada a 470 toneladas y un costo medio - alto [47].



Figura 31. Celda de carga tipo compresión. Fuente: BASCOSTA [48].

Teniendo en cuenta las celdas de carga mencionadas, es necesario realizar una matriz de selección para determinar el sensor idóneo para la planta:

Tabla 7. Matriz de decisión para selección de sensores de peso. Fuente: Propia.

Criterio Tecnico	**Celda Tipo Viga**	**Celda Tipo Compresión**	**Evaluación**
Rango de capacidad	100 kg - 5ton	1 ton - 470 ton	La tolva de cemento es de capacidad media, teniendo capacidad de 3 toneladas aprox.
Instalación y Distribución de carga	Fácil montaje en varios puntos. Se usa como elemento estructural en 3 o 4 puntos.	Requiere de base estructural. Ideal para cargas concentradas centrales.	El chasis ya cuenta con una base de 4 puntos.
Costo	Medio - Bajo	Medio - Alto	Se requiere ahorrar costos ya que se trata

			de un rediseño.
Mantenimiento	Bajo	Bajo	Se cuenta con un equipo encargado del mantenimiento de toda la planta.

Considerando las opciones del mercado, para la dosificación de cemento en tolvas de capacidad media se selecciona un sistema compuesto por cuatro celdas de carga tipo viga, debido a los criterios de la tabla 6. Este arreglo permite obtener una medición más precisa y confiable, minimizando errores por desbalance estructural o vibraciones propias del proceso. Asimismo, se establece como requisito mínimo un grado de protección IP67, considerando la presencia constante de polvo de cemento y posibles condiciones de humedad en la planta. La señal de salida se acondiciona a 4–20 mA mediante transmisores, garantizando inmunidad al ruido eléctrico y compatibilidad directa con los módulos analógicos del PLC.

Como referencia tecnológica del mercado, se consideran soluciones industriales de fabricantes reconocidos como Flintec, HBM, Mettler Toledo, Siemens y Vishay Precision Group, los cuales ofrecen celdas de carga con certificaciones industriales, alta precisión y compatibilidad con sistemas de automatización.

11.1.2 Selección de sensor de corriente

Para el monitoreo del estado operativo de los motores del sistema de dosificación y mezclado, se propone la implementación de sensores de corriente tipo efecto Hall con salida analógica 4–20 mA, permitiendo su integración directa al PLC. Este tipo de dispositivo proporciona aislamiento galvánico, alta precisión y adecuada respuesta ante variaciones de carga, lo cual resulta fundamental para la detección temprana de sobrecargas, bloqueos mecánicos o funcionamiento en vacío.



Figura 32. Sensor de corriente. Fuente: Amazon [49].

11.1.4 Selección de flujometro

En el proceso de suelo-cemento, el control del caudal de agua es una variable crítica, ya que influye directamente en la homogeneidad de la mezcla, actualmente se maneja con un sensor de paletas como el de la figura 33, este resulta una lectura con pequeñas variaciones. Por ello, se requiere un sistema de medición preciso, estable y robusto ante condiciones industriales.



Figura 33. Sensor de flujo de rueda de paletas. Fuente: Viaindustrial [50].

Caudalímetro electromagnético: Es un dispositivo de alta precisión para medir el volumen de líquidos conductores (agua, lodos, ácidos) basado en la ley de Faraday, genera un campo magnético y mide el voltaje inducido por el fluido (que debe ser conductor) al cruzarlo [50], tienden a ser costosos, especialmente en diámetros grandes. Al ser electromagnético, no contiene partes móviles, lo que reduce el desgaste mecánico, es estable y garantiza alta repetibilidad.



Figura 34. Sensor caudalímetro electromagnético. Fuente: Supmea[51].

Caudalímetro ultrasónico: Mide la velocidad de un fluido mediante ultrasonidos para calcular el caudal volumétrico. Utiliza el principio de las ondas ultrasónicas y el desplazamiento de frecuencia para medir el caudal volumétrico [52]. Tienen un rango de precio intermedio y pueden medirse sin contacto directo con el agua, lo que simplifica la instalación y mantenimiento.



Figura 36. Sensor caudalímetro electromagnético. Fuente: Mercadolibre[53].

Caudalímetro tipo turbina: Es un dispositivo mecánico que mide el caudal mediante un rotor interno que gira proporcionalmente a la velocidad del fluido. El paso del fluido genera el movimiento de la turbina, y un sensor magnético o de efecto Hall detecta la frecuencia de giro, obteniendo una señal eléctrica proporcional al caudal [54]. Requiere de un fluido sin sedimentos para evitar obstrucciones y cuenta con un costo medio - bajo.



Figura 37. Sensor caudalímetro tipo turbina. Fuente: Directindustry[55].

Teniendo en cuenta las celdas de carga mencionadas, es necesario realizar una matriz de selección para determinar el sensor idóneo para la planta:

Tabla 8. Matriz de decisión para selección de caudalimetro. Fuente: Propia.

Criterio Tecnico	**Caudalimetro tipo paleta**	**Caudalimetro tipo turbina**	**Caudalímetro electromagnético**	**Caudalímetro ultrasónico**
Precisión	± 2 - 5%	± 0.5 - 1%	± 0.5 - 1%	± 0.2 - 0.5%
Partes móviles	Si	Si	No	No
Mantenimiento	Requiere de mantenimiento constante, limpieza periódica y recalibración.	Requiere de mantenimiento preventivo periodico	No tiene partes móviles, sólo requiere de inspecciones eléctricas.	No tiene partes móviles, sólo requiere de inspecciones eléctricas
Sensibilidad a la suciedad	La acumulación de sedimento puede frenar el giro.	La acumulación de sedimento puede frenar el giro.	No depende de elementos mecánicos, por lo que no se ve afectado por fluidos con partículas.	Puede verse afectado por partículas en el fluido.
Estabilidad en	Baja, en caudales bajos puede no girar de forma	Tiene un diseño mecánico robusto, pero no	Mide directamente la velocidad del fluido, no depende	No depende de aceleraciones mecánicas,detecta

caudal variable	uniforme y presenta oscilaciones en cambios de flujos.	es ideal para variaciones frecuentes.	de aceleraciones mecánicas. Tiene un amplio rango dinámico	variaciones en tiempo real, su desempeño puede verse afectado por turbulencias.
Instalación	Requiere de intervención en tubería.	Requiere de intervención en tubería.	Requiere de intervención en tubería.	Es tipo brida, no requiere de cortes de tubería.
Costo	Bajo	Medio	Alto	Medio - Alto

Considerando que en el proceso de suelo-cemento el caudal de agua influye directamente en la homogeneidad y resistencia final de la mezcla, se requiere un sistema de medición con alta estabilidad, buena precisión y mínima susceptibilidad a variaciones mecánicas.

El sensor tipo paleta actualmente instalado presenta fluctuaciones en la lectura debido a su principio de funcionamiento mecánico y a la presencia de partes móviles, lo que afecta la repetibilidad del proceso de dosificación. Asimismo, los caudalímetros tipo turbina, aunque ofrecen mejor precisión, continúan dependiendo de elementos móviles susceptibles a desgaste y a variaciones ante cambios bruscos de caudal.

Por otra parte, tanto los caudalímetros electromagnéticos como los ultrasónicos mejoran la estabilidad de la señal. Sin embargo, dado que el fluido a medir es agua industrial con conductividad suficiente y que se requiere alta precisión para el control automático mediante PLC, el caudalímetro electromagnético se considera la alternativa más adecuada. Este tipo de sensor ofrece mayor exactitud, repetibilidad y señal de salida estandarizada 4–20 mA, garantizando una integración confiable al sistema de control.

11.1.3 Selección de válvula

A raíz de la implementación de celdas de carga en el sistema de dosificación de cemento, es necesario implementar una válvula a la salida de la tolva, para poder obtener una lectura del peso total antes del inicio del proceso. Las válvulas tipo mariposa o guillotina cumplen la función de apertura y cierre del flujo de material. Estas válvulas son accionadas neumáticamente, por lo que requieren electroválvulas que controlan el suministro y escape de aire comprimido hacia el actuador.

Debido a que el sistema opera en un entorno con alta presencia de polvo de cemento y requiere maniobras frecuentes de apertura y cierre, se selecciona una electroválvula 5/2 vías, 24VDC, con protección mínima IP65, capaz de operar dentro del rango de presión del sistema neumático y con capacidad de caudal suficiente para garantizar tiempos de respuesta adecuados.

11.2 Diseño de arquitectura implementada en PLC

Con el fin de corregir las desviaciones en la dosificación, mejorar la trazabilidad y asegurar el cumplimiento de la Norma INVÍAS 350 – Suelo–Cemento, se propone el rediseño de la arquitectura de control, estableciendo un PLC como núcleo central de supervisión, procesamiento y toma de decisiones del sistema. Donde se realiza el diseño por medio de diagramas de flujo que evidencian, las implementaciones, junto una tabla explicativa para la visualización de los cambios y soluciones del proceso.

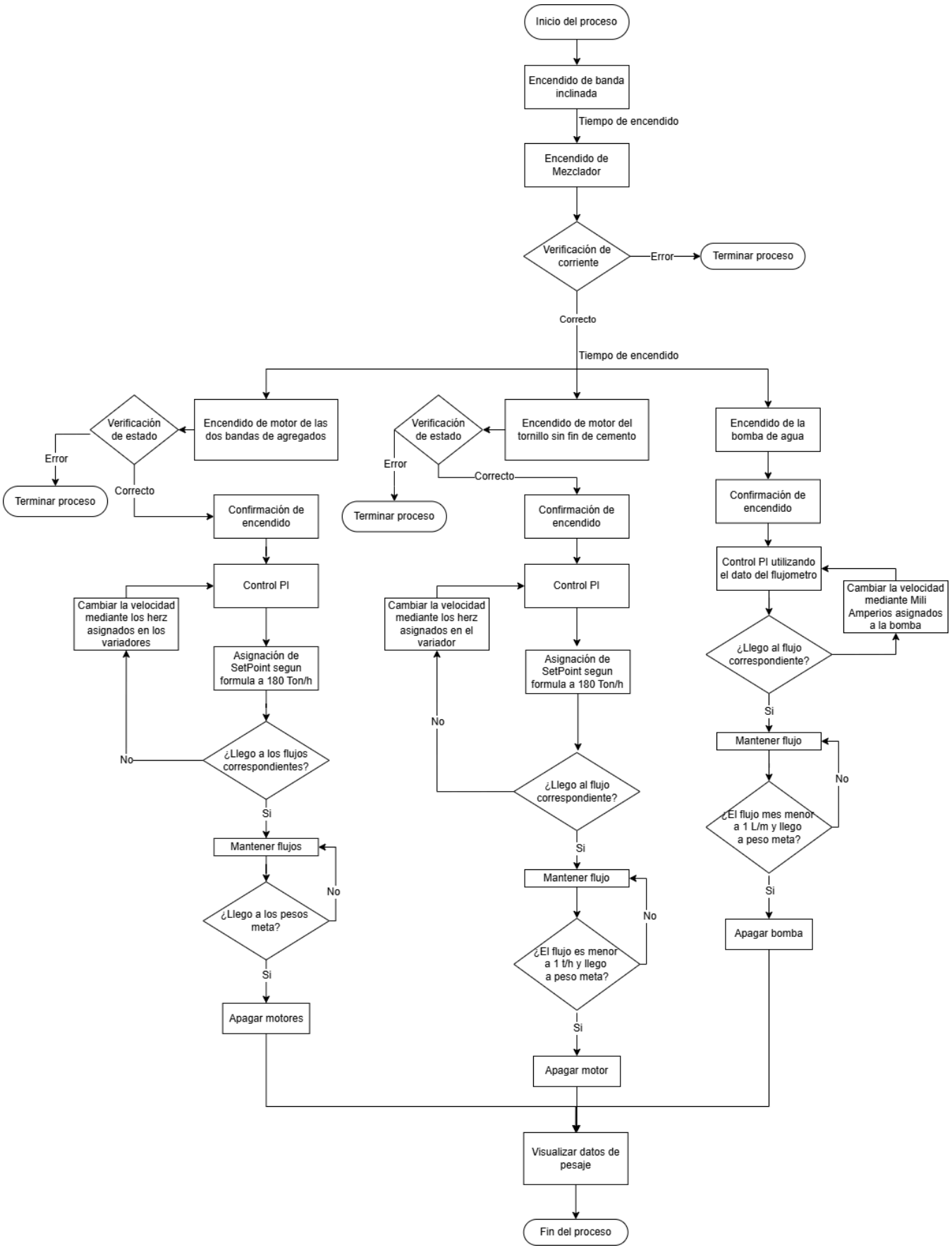

Inicio del proceso
Encendido de banda inclinada
Tiempo de encendido
Encendido de Mezclador
Verificación de corriente
Error
Terminar proceso
Correcto
Tiempo de encendido
Encendido de motor de las dos bandas de agregados
Verificación de estado
Error
Terminar proceso
Correcto
Confirmación de encendido
Control PI
Cambiar la velocidad mediante los herz asignados en los variadores
Asignación de SetPoint segun formula a 180 Ton/h
¿Llego a los flujos correspondientes?
No
Si
Mantener flujos
¿Llego a los pesos meta?
No
Si
Apagar motores
Encendido de motor del tornillo sin fin de cemento
Verificación de estado
Error
Terminar proceso
Correcto
Confirmación de encendido
Control PI
Cambiar la velocidad mediante los herz asignados en el variador
Asignación de SetPoint segun formula a 180 Ton/h
No
¿Llego al flujo correspondiente?
Si
Mantener flujo
¿El flujo es menor a 1 t/h y llego a peso meta?
No
Si
Apagar motor
Encendido de la bomba de agua
Confirmación de encendido
Control PI utilizando el dato del flujometro
Cambiar la velocidad mediante Mili Amperios asignados a la bomba
¿Llego al flujo correspondiente?
Si
Mantener flujo
¿El flujo mes menor a 1 L/m y llego a peso meta?
No
Si
Apagar bomba
Visualizar datos de pesaje
Fin del proceso

Figura 38. Diagrama de flujo de rediseño de arquitectura. Fuente: Propia.

En el diagrama describe la secuencia de operación del sistema, iniciando con el encendido de la banda inclinada, seguido del arranque del mezclador, asegurando un tiempo previo de estabilización. Posteriormente, se realiza una verificación de corriente para comprobar que el motor opera dentro de los parámetros establecidos; en caso de detectar una condición anormal, el sistema finaliza el proceso por seguridad.

Una vez validado el funcionamiento correcto. Posteriormente, se activan los sistemas de dosificación de agregados, cemento y agua, cada uno con su respectiva verificación de estado.

Para cada subsistema se implementa un controlador de lazo cerrado, cuya variable controlada es el flujo (o caudal) y cuya variable manipulada es la velocidad del actuador correspondiente:

- En las bandas de agregados y el tornillo sin fin, el controlador ajusta la frecuencia de los variadores de velocidad (Hz), utilizando la retroalimentación de los sensores encoder.
- En la bomba de agua, el controlador regula la señal analógica en miliamperios (4–20 mA) para modificar la velocidad de bombeo, utilizando la retroalimentación del sensor de flujo. Si el proceso puede que no requiera de agua (dependiendo de la fórmula), puede iniciar sin encender la bomba.

El controlador PI actúa corrigiendo el error entre el valor de referencia (setpoint) y el valor medido por los sensores (celdas de carga, encoder y caudalímetro). El término proporcional responde de forma inmediata al error actual, mientras que el término integral elimina el error acumulado en el tiempo, garantizando estabilidad y precisión en régimen permanente.

Los valores de referencia (setpoints) para cada subsistema son calculados a partir de las cantidades de material requeridas en la fórmula de dosificación y de la capacidad nominal de producción de la planta, correspondiente a 180 toneladas por hora. A partir de estos parámetros se determina el flujo objetivo de agregados, cemento y agua, permitiendo establecer relaciones proporcionales entre todos los elementos del sistema.

Durante la operación, el flujo real de cemento es utilizado como variable principal de sincronización del proceso. Si el sistema detecta que el flujo medido difiere del flujo requerido, el PLC calcula el error correspondiente y ajusta dinámicamente los setpoints de los demás subsistemas mediante incrementos o decrementos proporcionales. De esta manera, las velocidades de las bandas de agregados y el caudal de agua son corregidos automáticamente para mantener la relación de dosificación establecida y garantizar la sincronización entre todos los elementos del proceso.

El sistema evalúa continuamente si el flujo alcanza el valor correspondiente. En caso contrario, el controlador ajusta la variable manipulada hasta minimizar el error. Una vez alcanzado el flujo objetivo, se mantiene estable hasta cumplir la condición de peso meta o volumen programado. Al alcanzarse las metas de dosificación, los actuadores se desactivan de manera controlada y se procede a la visualización y registro de los datos de pesaje, finalizando el ciclo automático.

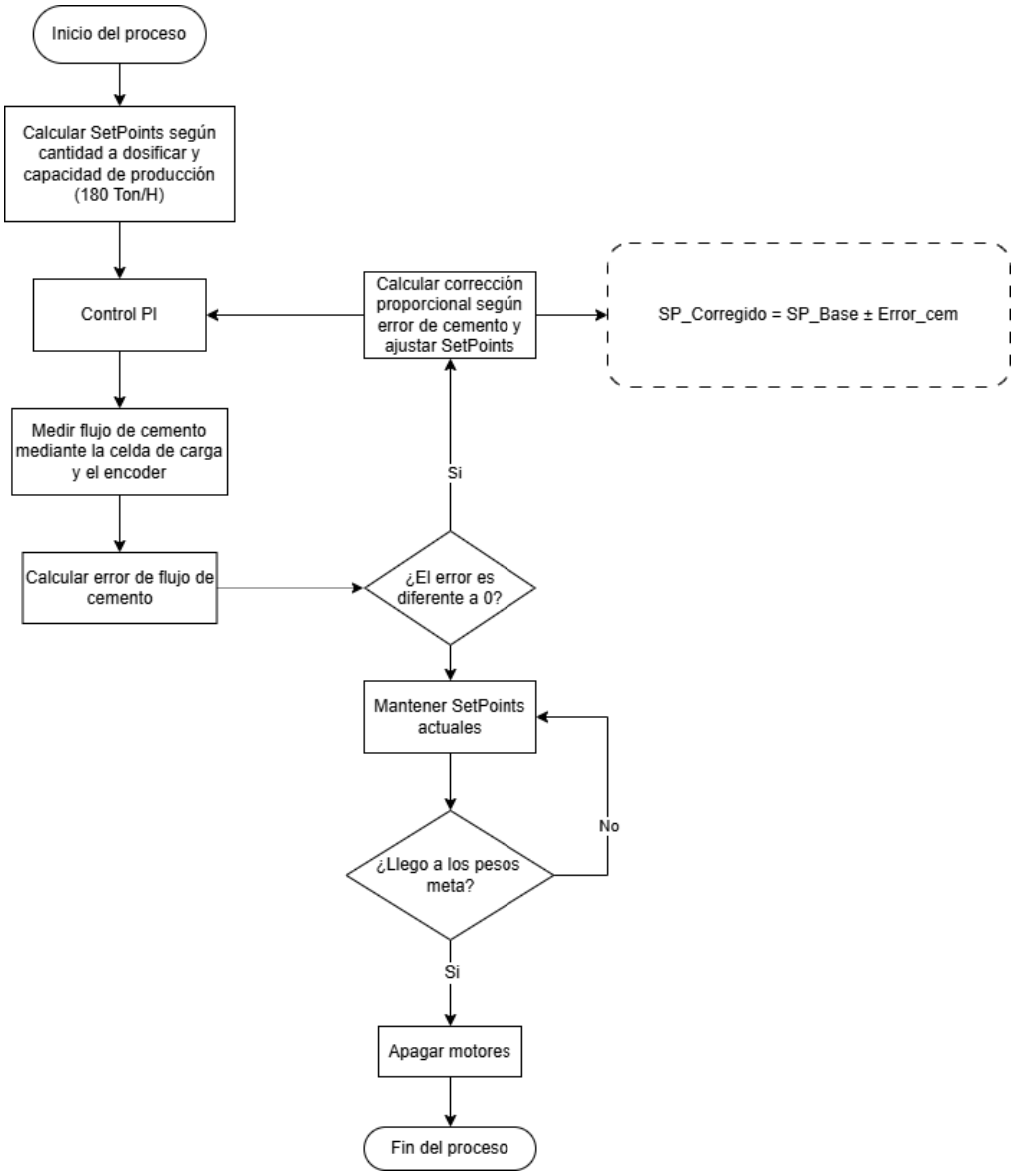


Figura 38. Diagrama de flujo de retroalimentación de error. Fuente: Propia.

Las diferencias entre el sistema productivo actual y el rediseño propuesto se observan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Diferencias de proceso actual vs. rediseño. Fuente: Propia.

Proceso Actual	**Rediseño**
El encendido de los elementos de dosificación dependen del tiempo de encendido del mezclador	El encendido de los elementos de dosificación dependen del tiempo de encendido y verificación de corriente del mezclador
El control de flujo se realiza por medio de los módulos de pesaje	El control de flujo se realiza directamente en el PLC
Se asignan unos MiliAmperios predeterminados a la bomba de agua durante todo el proceso	Se implementa un control de flujo para el caudal del agua, directamente en el PLC, variando los MiliAmperios
No se cuenta con un sistema de almacenamiento e histórico de datos	Implementación de histórico de datos y consumos de materiales
No hay visualización en tiempo real de variables relevantes para el proceso	Implementación de visualización de datos, como caudal, velocidad de dosificación de materiales, y material entregado.
El proceso no se encuentra optimizado con respecto a sincronización de elementos	El control por medio del PLC permite a los elementos tener información entre ellos, ajustándose según la variable principal.

Por otro lado, el modo manual está pensado para interacción directa con el operador de la planta, de manera que se pueda encender o apagar los elementos por separado, este modo es únicamente para realizar pruebas mecánicas y vaciados de material fuera del proceso, por lo tanto debe funcionar de la siguiente manera:

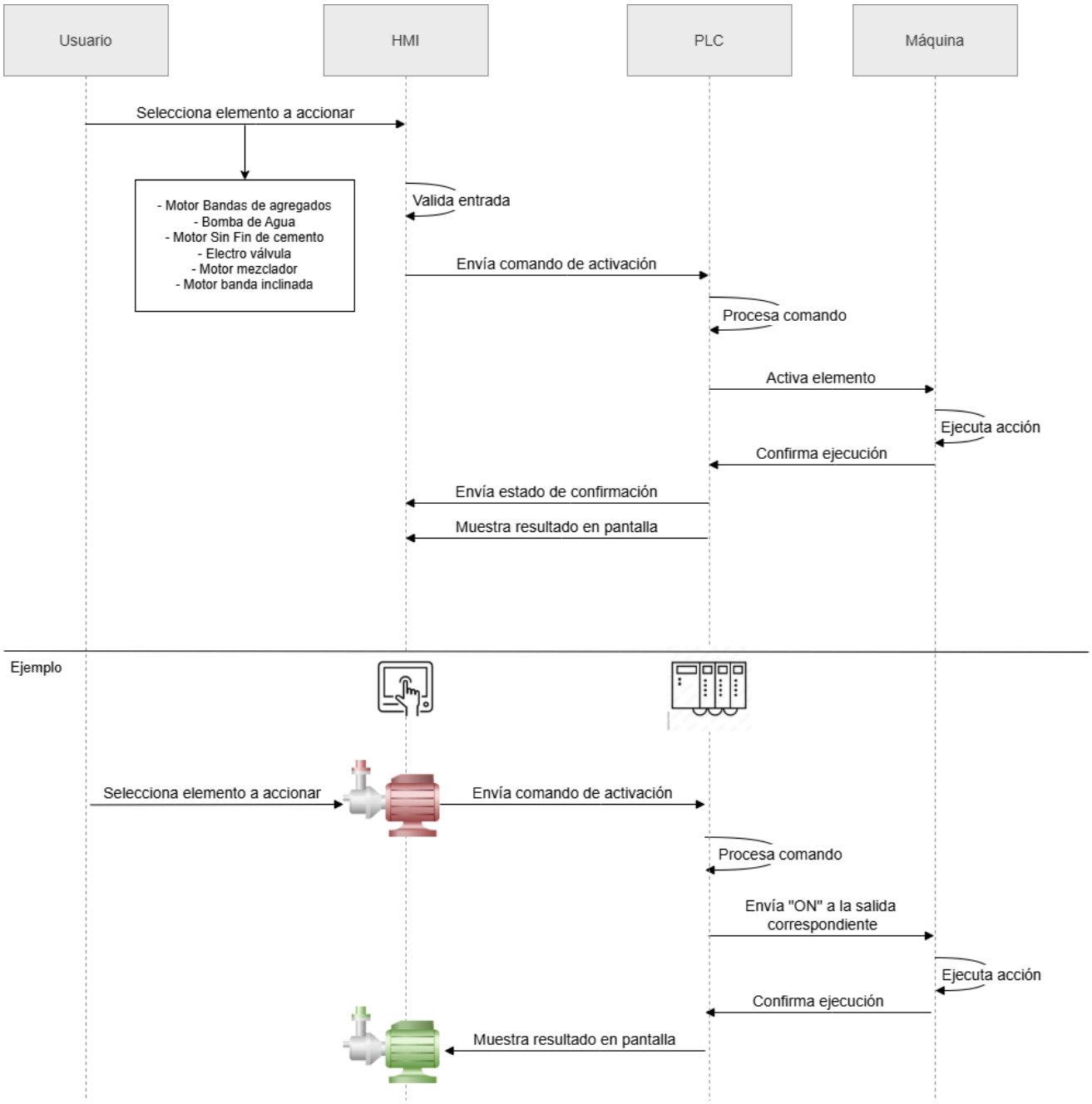


Figura 39. Diagrama explicativo de control manual. Fuente: Propia.

11.3 Diseño de HMI

Con el fin de optimizar la supervisión y operación del proceso de dosificación de suelo-cemento, se propone el mejoramiento de la Interfaz HMI, permitiendo la visualización en tiempo real de las variables críticas del sistema, el estado de los equipos y la gestión de alarmas operativas. El rediseño de la HMI tiene como objetivo principal proporcionar al operador una herramienta clara, intuitiva y confiable que facilite la toma de decisiones y reduzca errores humanos durante la operación del proceso.

11.2.1 Variables críticas a visualizar

La interfaz permitirá la visualización en tiempo real del proceso, incluyendo variables de pesajes y flujos, estados del sistema y ajustes de parámetros adicionales, junto a tiempos de encendido de los elementos:

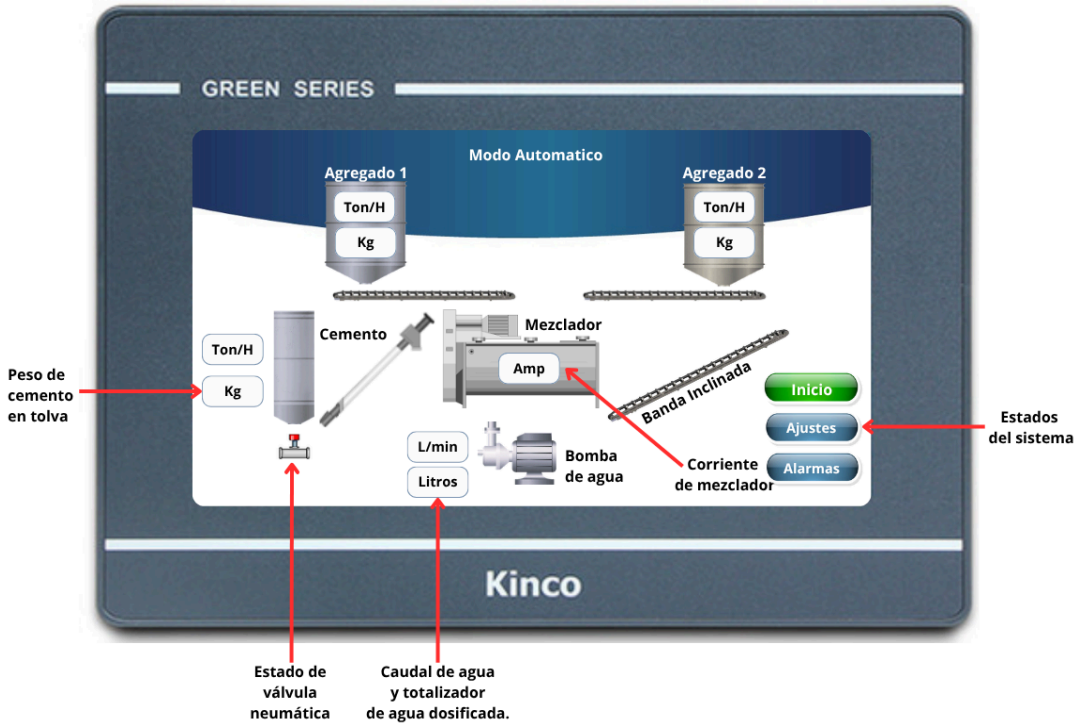


Figura 40. Pantalla propuesta modo automático. Fuente: Propia.

11.2.2 Gestión de alarmas

La HMI incorporará un sistema de alarmas visuales y registro histórico, incluyendo:

- Pérdida de señal de caudal.
- Error en la confirmación de encendido de elementos.
- Sobreconsumo o sobrecarga de corriente en motores.
- Error de comunicación con PLC.



Figura 41. Pantalla propuesta alarmas vigentes e histórico de alarmas. Fuente: Propia.

Las alarmas estarán clasificadas por prioridad (crítica, media, informativa) y contarán con registro de fecha y hora para análisis posterior.

11.2.3 Estructura de pantallas

El diseño contempla las siguientes pantallas principales:

- Pantalla de dosificación automática
- Pantalla modo manual
- Pantalla de alarmas activas e histórico de alarmas.
- Pantalla de configuración de parámetros.
- Pantalla de tendencias históricas y producción.

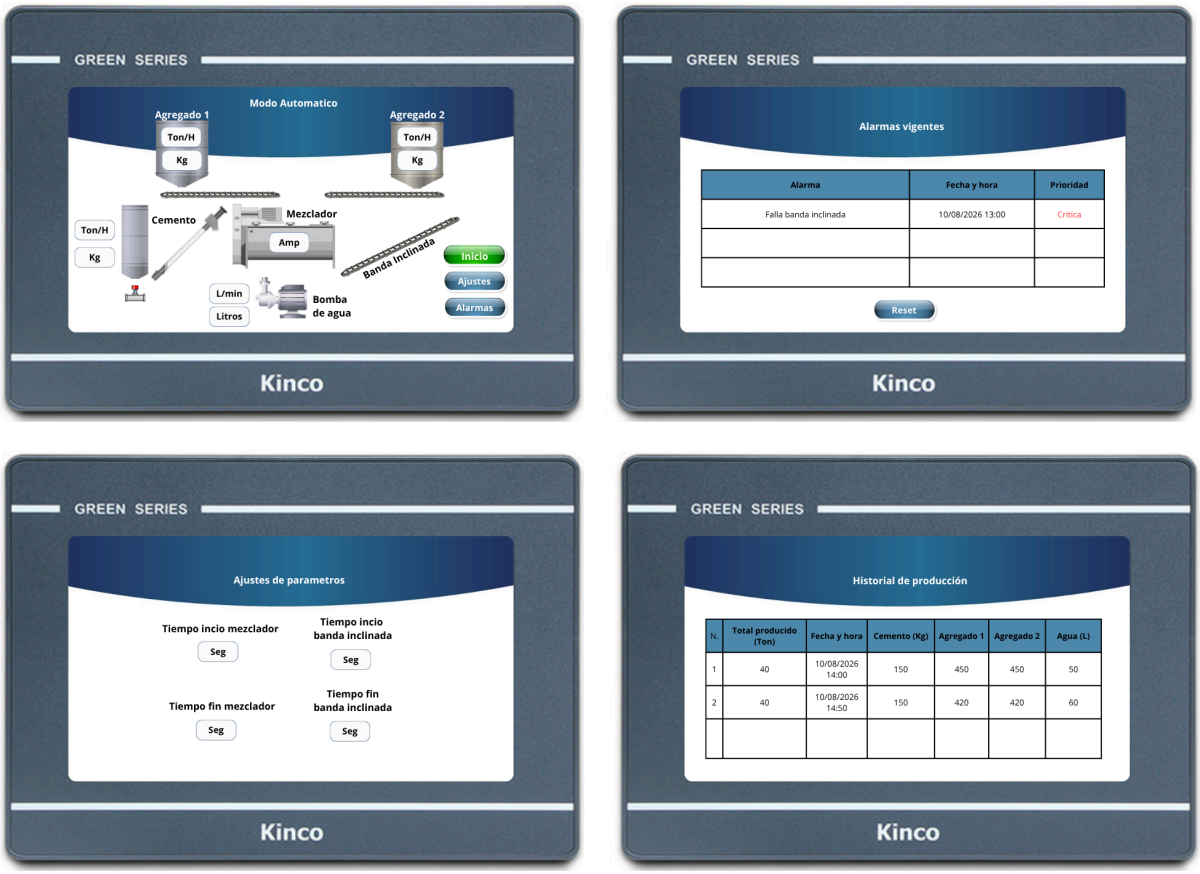


Figura 42. Pantallas propuestas para mejorar la automatización. Fuente: Propia.

El mejoramiento de la HMI fortalece el sistema de control al integrar supervisión en tiempo real, gestión de alarmas y trazabilidad del proceso, aumentando la confiabilidad y eficiencia operativa de la planta. Donde se pretende tener mayor control y estabilidad del proceso, reducción de errores operativos, mejor diagnóstico de fallas, registro histórico para análisis de desempeño y de esta manera una mejora notoria en la calidad del producto final.

12. Implementación del Algoritmo de Control y Supervisión HMI

En esta fase se desarrolla la arquitectura lógica que gobierna el funcionamiento automático del sistema de dosificación de suelo-cemento, integrando la programación del PLC y el diseño de la interfaz HMI. Se establecen las secuencias de operación, condiciones de arranque y paro, temporizadores, enclavamientos y rutinas de seguridad que garantizan un funcionamiento estable y seguro del proceso.

Esta fase consolida la integración entre control automático y supervisión, asegurando repetibilidad, confiabilidad y trazabilidad en la operación del sistema.

12.1 Implementación de la lógica de control en el PLC

12.1.1 Arquitectura del programa

Se desarrolla la programación del PLC con lenguaje Ladder, integrando las rutinas de control, supervisión y protección necesarias para garantizar una operación estable, repetible y segura. La lógica implementada permite coordinar el funcionamiento secuencial de bandas transportadoras, tornillo sin fin de cemento, bomba de agua y mezclador, asegurando que cada etapa del proceso se ejecute bajo condiciones previamente verificadas.

Dentro de la lógica de control se incluyen temporizadores de arranque, verificaciones de estado, validación de señales provenientes de sensores y manejo de condiciones de fallo. De esta manera, el sistema puede identificar eventos anormales como sobrecorriente en motores, ausencia de flujo, pérdida de señal o errores de operación, ejecutando acciones de protección y detención controlada del proceso. Tomando como referencia el diagrama de flujo realizado en la fase anterior (Figura 38), se implementa de la siguiente manera:

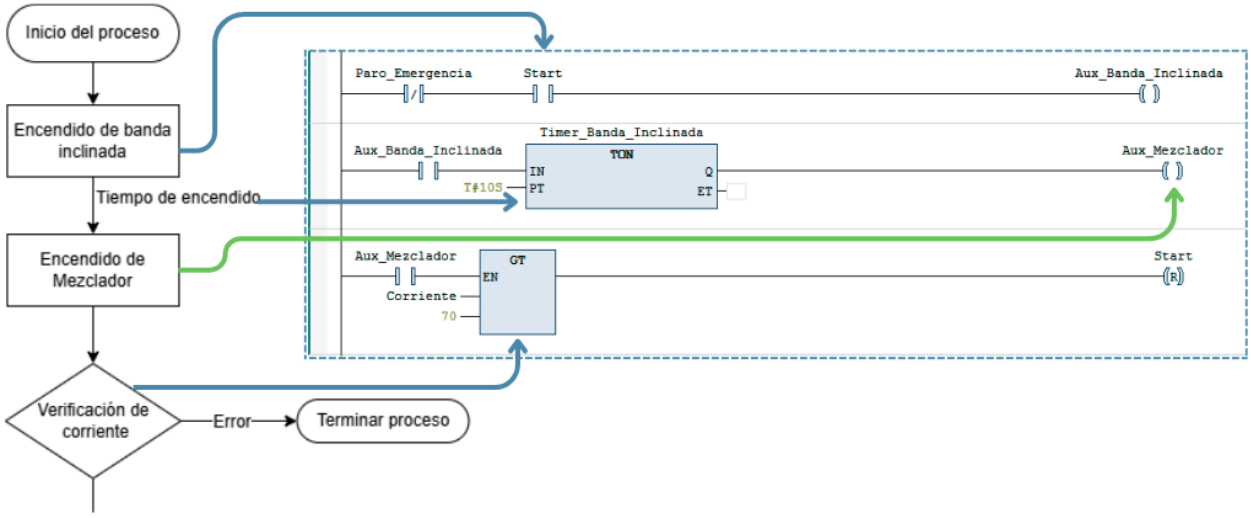


Figura 42. Secuencia de inicio de procesos implementado en PLC. Fuente: Propia.

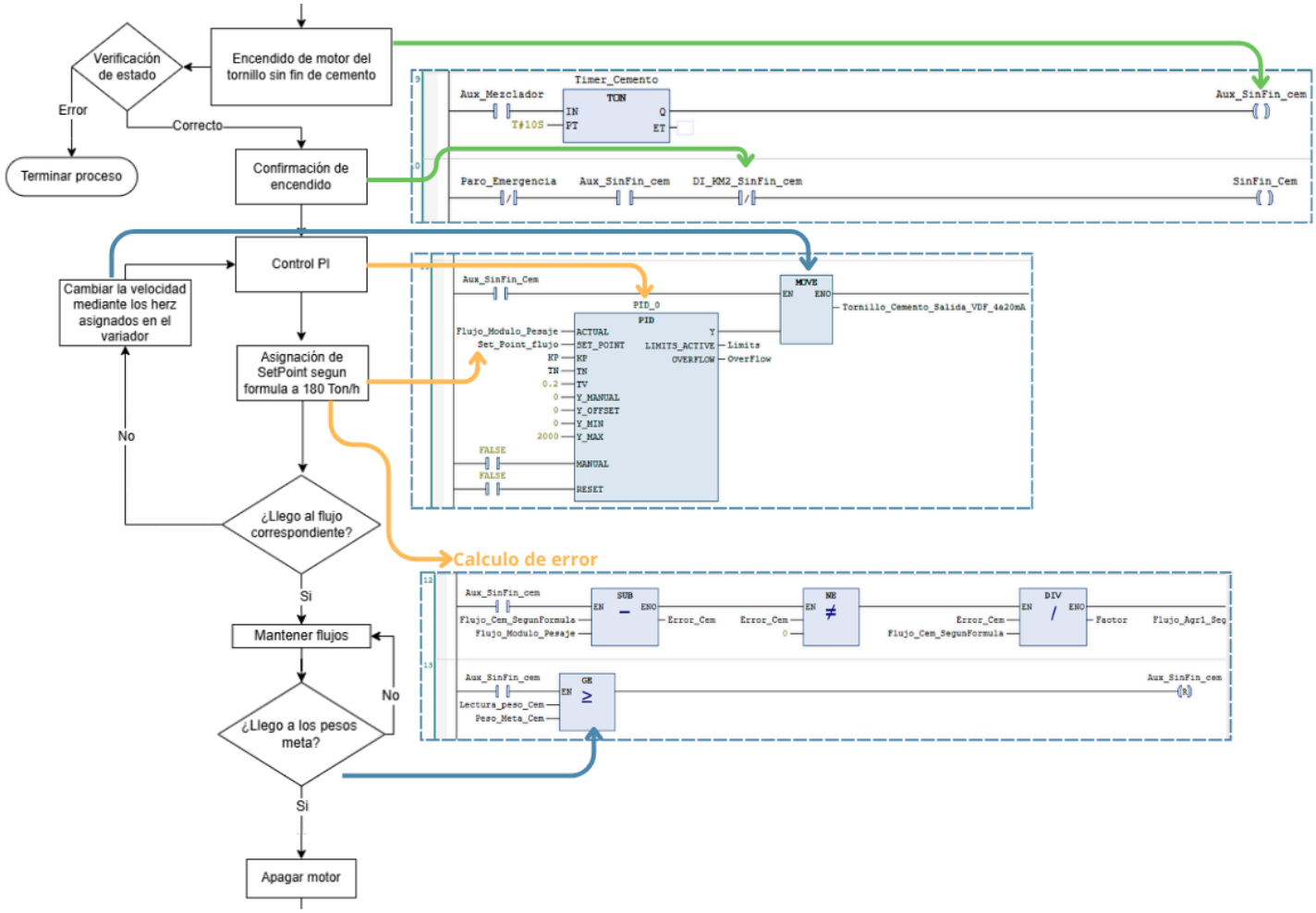


Figura 43. Dosificación de cemento implementado en PLC. Fuente: Propia.

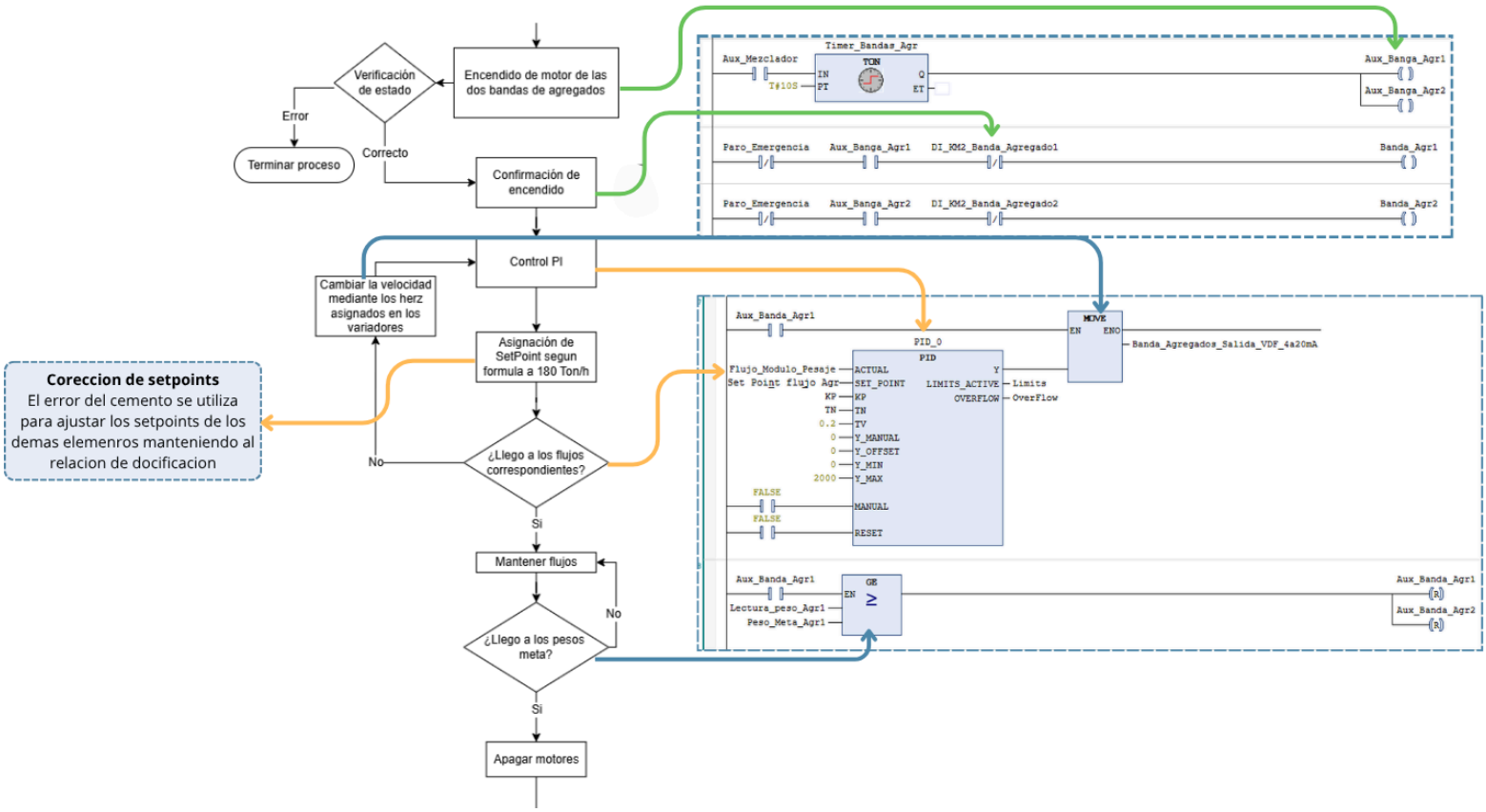


Figura 44. Dosificación de agregado en bandas implementado en PLC. Fuente: Propia.

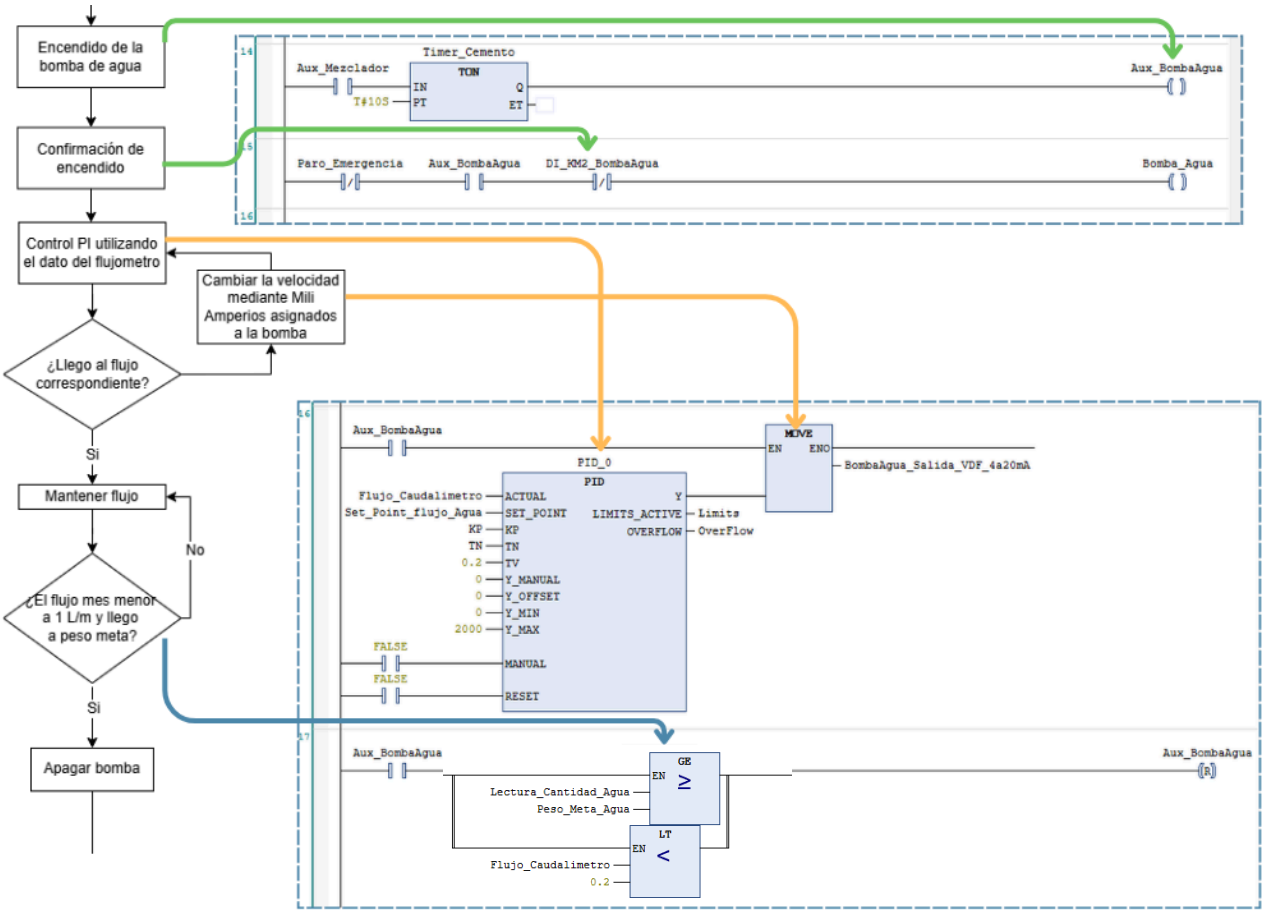


Figura 44. Dosificación de agua implementado en PLC. Fuente: Propia.

12.1.2 Control PI y Calculo de error

Como estrategia de mejoramiento, se incorpora un esquema de control en lazo cerrado mediante controladores PI, orientado a estabilizar las variables de flujo y dosificación. Donde de primera mano, con datos de entrada, en este caso la fórmula de dosificación (kilogramo de cada material por tonelada) y capacidad nominal de producción de la planta, correspondiente a 180 toneladas por hora, se realiza el cálculo de la velocidad la cual debe seguir cada elemento, por lo tanto:

$$Total = Cantidad_{Agr1} + Cantidad_{Agr2} + Cantidad_{Cem} + Cantidad_{Agua} \quad (1)$$

Cálculo de porcentajes:

$$\%Agr1 = \frac{Cantidad_{Agr1}}{Total}, \quad \%Agr2 = \frac{Cantidad_{Agr2}}{Total} \quad (2)$$

$$\%Cem = \frac{Cantidad_{Cem}}{Total} \quad (3)$$

$$\%Agua = \frac{Cantidad_{Agua}}{Total} \quad (4)$$

Con estos se obtienen los flujos:

$$Flujo_{Agr1} = \%Agr1 * 180\ ton/h\ , \quad Flujo_{Agr2} = \%Ag21 * 180\ ton/h \quad (5)$$

$$Flujo_{Cem} = \%ACem * 180\ ton/h \quad (6)$$

Para obtener el agua en litros por minuto:

$$Flujo_{Agua} = \frac{(\%Agua*180\ ton/h)*100}{60} \quad (7)$$

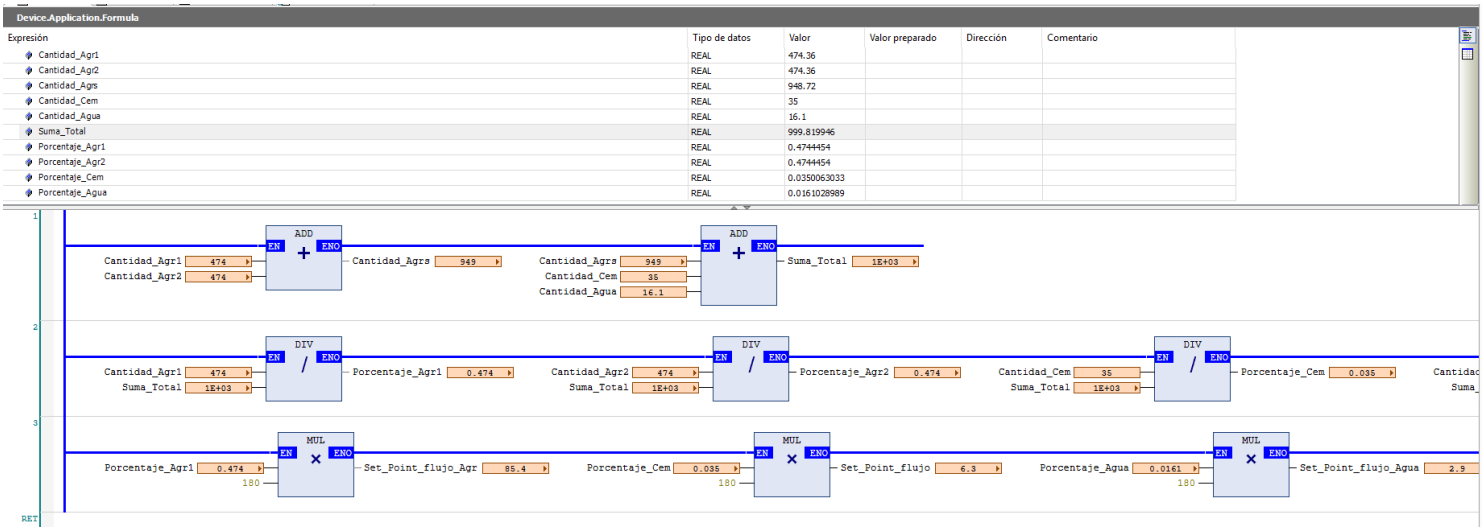


Figura 45. Cálculo de fórmula implementado en PLC. Fuente: Propia.

Este flujo calculado será los valores de referencia (Setpoints) que debe seguir el control PI de cada elemento. Al iniciar el proceso el PLC recibe continuamente las señales de realimentación provenientes de las celdas de carga y el caudalímetro, comparándolas con los valores de referencia, donde además se implementa el cálculo del error en lazo cerrado del cemento:

$$e(t) = Setpoint(t) - PV(t) \qquad (8)$$

Donde PV(t) corresponde al valor medido por los sensores, es decir el flujo del módulo de pesaje. Este error representa la diferencia entre el flujo de cemento requerido y el flujo real medido por el sistema de pesaje. Cuando el valor del error es positivo, el sistema identifica un déficit de material; si es negativo, existe un exceso de dosificación. La acción de control PI implementada en el PLC se define mediante la ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \qquad (9)$$

Donde:

- $u(t)$: señal de control enviada al actuador.
- K_p: ganancia proporcional.
- K_i: ganancia integral.
- e(t): error instantáneo del sistema.

El término proporcional permite una respuesta inmediata frente a variaciones del proceso, ajustando rápidamente la velocidad de los actuadores ante desviaciones del flujo. Por otra parte, el término integral elimina el error acumulado en régimen permanente, permitiendo alcanzar con mayor precisión el valor de referencia deseado.

Para los motores de bandas transportadoras y el tornillo sin fin, la salida del controlador PI modifica la frecuencia de operación de los variadores de velocidad (Hz). En el caso de la bomba de agua, la acción de control ajusta la señal analógica de salida del PLC en el rango de 4–20 mA, regulando la velocidad del sistema de bombeo.

Con el fin de garantizar sincronización entre todos los materiales del proceso, el flujo de cemento se establece como variable maestra de referencia. A partir del comportamiento real del cemento, se calcula un factor dinámico de sincronización:

$$Factor = \frac{PV_{Cem}}{Setpoint_{Cem}} \qquad (10)$$

Este factor permite corregir automáticamente los setpoints de agregados y agua manteniendo las proporciones de dosificación establecidas inicialmente. De esta manera:

$$SP_{Agr1} = Flujo_{Agr1} * Factor \qquad (11)$$

$$SP_{Agr2} = Flujo_{Agr2} * Factor \qquad (12)$$

$$SP_{Agua} = Flujo_{Agua} * Factor \qquad (13)$$

Mediante esta estrategia, si el flujo real de cemento disminuye o aumenta respecto al objetivo, el sistema ajusta proporcionalmente los demás flujos para conservar la relación de mezcla y evitar desbalances durante la producción.

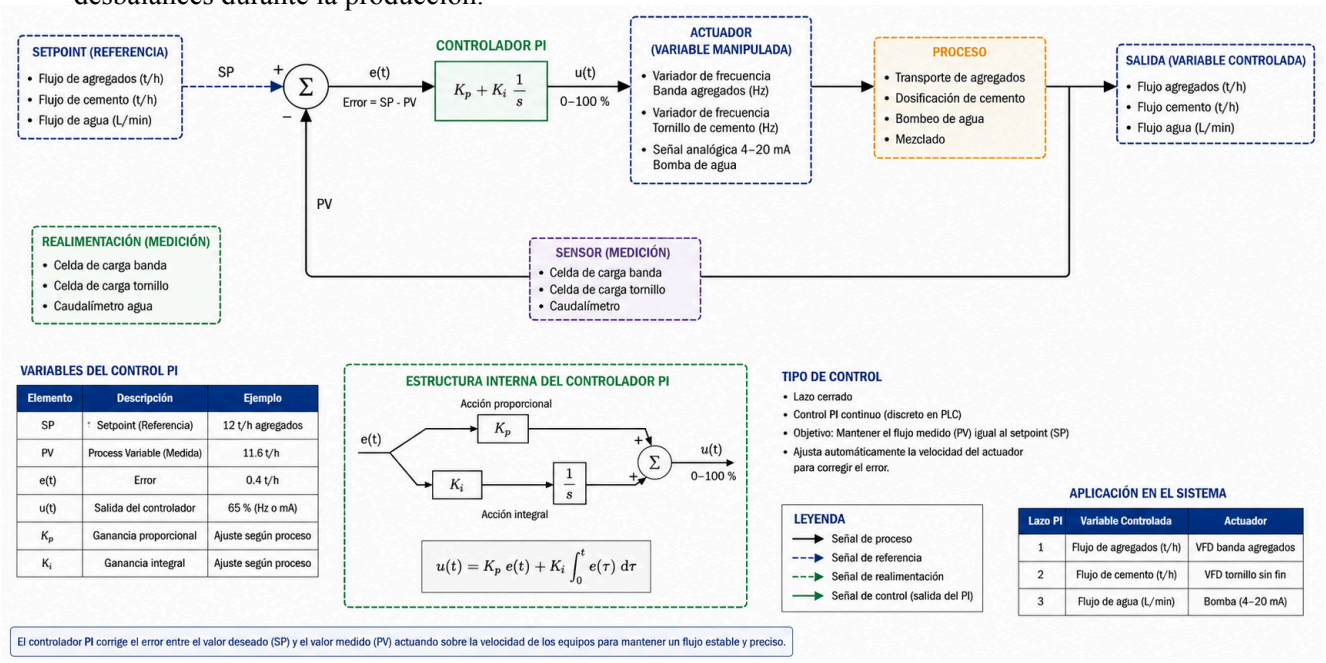


Figura 46. Diagrama de control PI. Fuente: Propia.

La sintonización de los controladores PI se realizó considerando la respuesta dinámica de cada subsistema, buscando minimizar el tiempo de establecimiento, reducir el sobreimpulso y eliminar el error estacionario. Para ello, se evaluaron experimentalmente diferentes combinaciones de ganancias Kp y Ki verificando la estabilidad del sistema ante perturbaciones y variaciones de carga. Los parámetros seleccionados permiten mantener una respuesta estable y continua, adecuada para las condiciones reales de operación de la planta.

La implementación de este esquema de control en lazo cerrado mejora significativamente la precisión de dosificación, la estabilidad del proceso y la coordinación entre equipos, permitiendo un sistema más robusto, automatizado y adaptable a variaciones operativas.

12.1.3 Implementación del modo manual de operación

Con el fin de facilitar las labores de prueba, mantenimiento, diagnóstico y verificación individual de equipos, se implementó un modo manual de operación dentro de la lógica de control del PLC. Este modo permite al operador accionar directamente los diferentes elementos del sistema desde la interfaz HMI, sin necesidad de ejecutar la secuencia automática completa del proceso.

La activación manual se realiza mediante comandos enviados desde la HMI, donde el operador puede interactuar individualmente con equipos como bandas transportadoras, tornillo sinfin, mezclador, bomba de agua y válvulas neumáticas. Cada elemento cuenta con controles independientes de encendido y apagado, permitiendo realizar pruebas funcionales, validación de señales y revisión de comportamiento operativo en tiempo real. Dentro de la programación del PLC, el modo manual se implementa mediante activaciones directas sobre las salidas correspondientes, manteniendo siempre las condiciones de seguridad y protección del sistema. Antes de habilitar cualquier actuador. Adicionalmente, el modo manual permite la ejecución controlada de pruebas de instrumentación y ajuste de variables, facilitando la calibración de sensores, verificación de actuadores y validación del comportamiento de los controladores implementados.

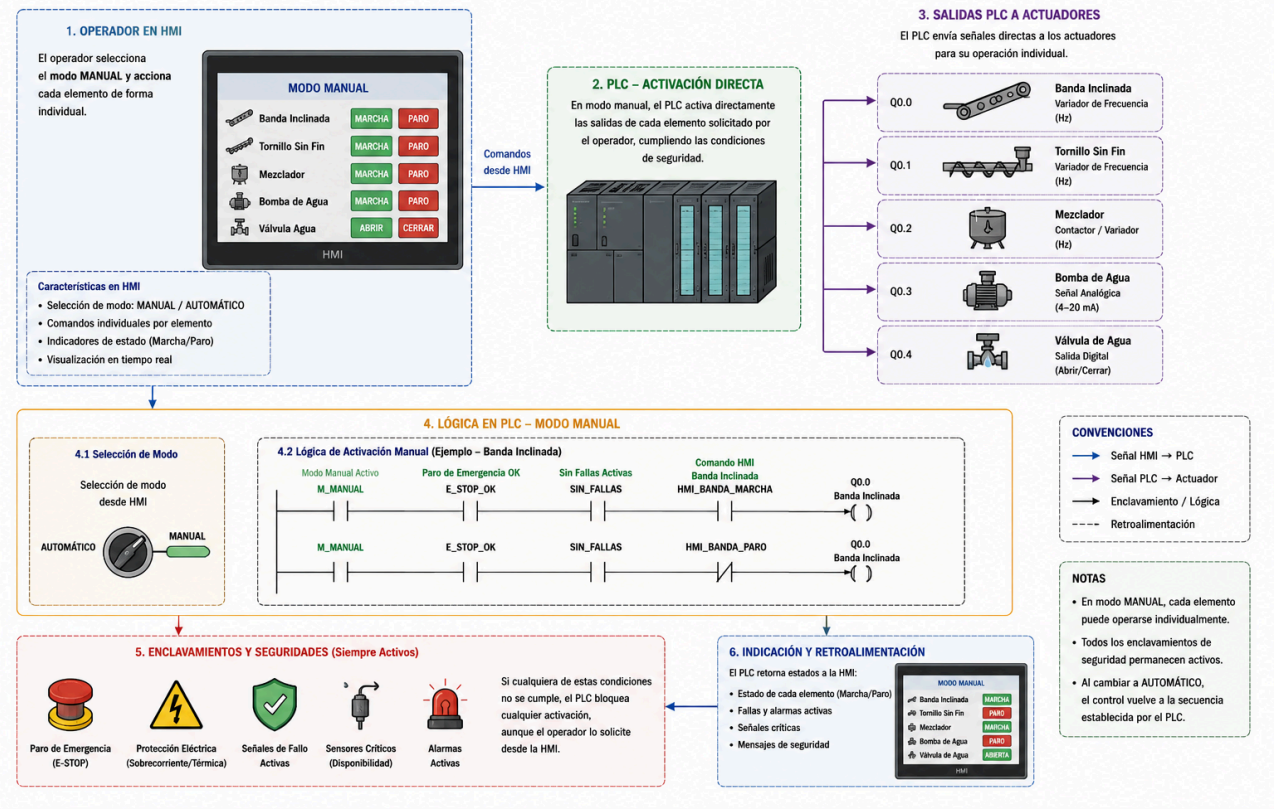


Figura 46. Modo manual. Fuente: Propia a través de Chat GPT.

12.1.4 Manejo de alarmas y seguridad

Con el propósito de garantizar una operación segura, confiable y supervisada del sistema automatizado, se implementó una estrategia de manejo de alarmas y condiciones de seguridad dentro de la lógica del PLC. Esta estrategia permite detectar eventos anormales durante la operación, ejecutar acciones de protección automáticas y notificar al operador mediante la interfaz HMI.

El sistema supervisa continuamente variables críticas del proceso, el PLC evalúa condiciones lógicas previamente definidas para determinar la existencia de fallos o estados inseguros. Entre las principales alarmas implementadas se encuentran:

- Sobrecorriente en motores.
- Disparo de guardamotor o protección térmica.
- Pérdida de señal en sensores.
- Ausencia de flujo en la línea de agua.
- Error de comunicación entre PLC y HMI.
- Activación de paro de emergencia.
- Falla en actuadores o condiciones de no respuesta.
- Valores fuera de rango en variables de proceso.

La lógica de alarmas fue desarrollada mediante comparaciones, enclavamientos y validaciones temporizadas dentro del PLC. Cuando se detecta una condición anormal, el sistema genera automáticamente una bandera de fallo interna, ejecutando acciones como:

- Desactivación controlada de actuadores.
- Bloqueo de secuencias automáticas.
- Inhibición de nuevos arranques.
- Activación de indicadores visuales en HMI.
- Registro de eventos para trazabilidad operativa.

Donde se implementaron enclavamientos de seguridad que garantizan la secuencia correcta de operación entre los equipos. De esta manera, ciertos elementos no pueden activarse si no se cumplen previamente condiciones mínimas de funcionamiento, como disponibilidad del mezclador, validación de sensores o ausencia de alarmas activas.

La interfaz HMI permite visualizar en tiempo real el estado de las alarmas, identificando el tipo de fallo y facilitando el diagnóstico por parte del operador. Asimismo, el sistema puede mantener registros históricos de eventos críticos, permitiendo análisis posteriores sobre comportamiento operativo, fallas recurrentes y mantenimiento preventivo.

12.2 Implementación de diseño HMI

La implementación de la interfaz HMI se desarrolló con el objetivo de proporcionar una herramienta de supervisión y operación intuitiva para el sistema automatizado de dosificación de suelo-cemento. La interfaz fue diseñada para permitir al operador monitorear en tiempo real las variables críticas del proceso, interactuar con los equipos y visualizar el estado general de la planta desde un entorno gráfico centralizado.

La comunicación entre la HMI y el PLC se estableció mediante protocolo de comunicación Ethernet TCP-IP, permitiendo el intercambio continuo de variables de proceso, estados operativos, señales de alarma y comandos de control. De esta manera, las acciones ejecutadas por el operador desde la interfaz son procesadas directamente por la lógica implementada en el controlador. El diseño de la HMI se estructuró bajo una filosofía de navegación simple y jerarquizada, priorizando claridad visual y facilidad de operación. Para ello, se implementaron diferentes pantallas orientadas a funciones específicas del proceso, entre las cuales se incluyen:

- Pantalla principal de supervisión del proceso.
- Pantalla de operación manual.
- Pantalla de alarmas y fallos.
- Pantalla de tendencias y monitoreo de variables.

Dentro de la pantalla principal se integró una representación sinóptica del proceso, permitiendo visualizar en tiempo real el estado de bandas transportadoras, mezclador, tornillo sin fin, bomba de agua y válvulas neumáticas. Asimismo, se incorporaron indicadores dinámicos para variables como:

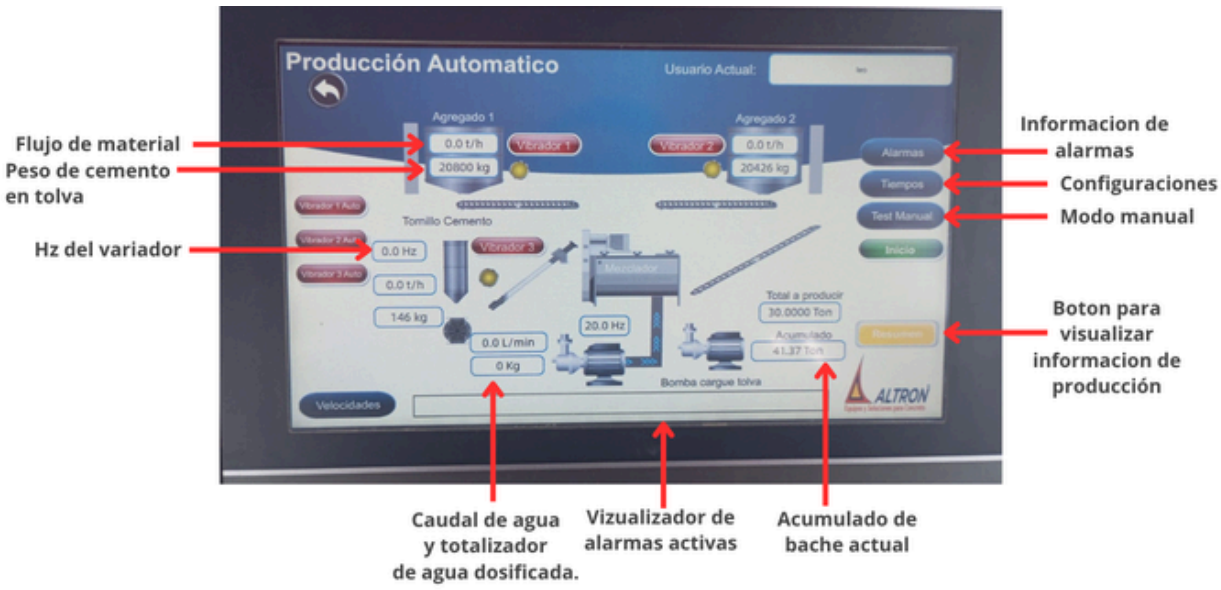
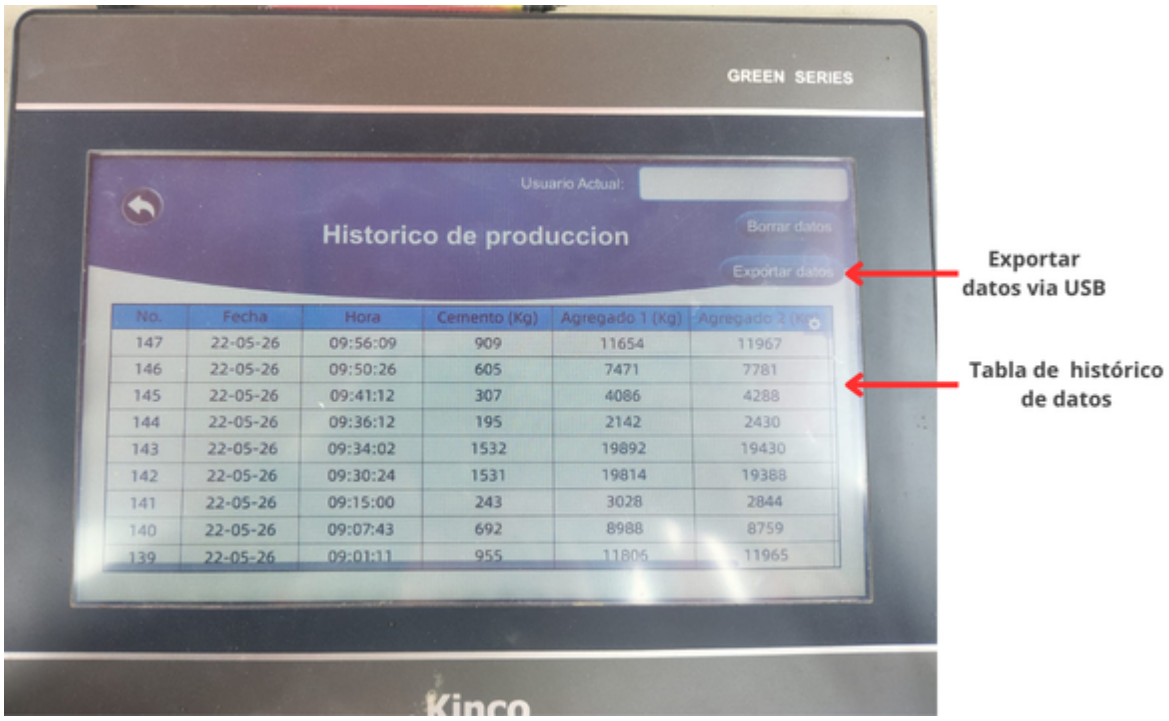


Figura 47. HMI Automático. Fuente: Propia.

También se implementa una pantalla de visualización de histórico de datos, consumos de materiales, totalizado de producción, incluyendo fecha y hora, con el fin de tener una trazabilidad de proceso y garantizar la calidad del material final entregado, implementando informes detallados de cada bache que se pueden descargar en una USB para su posterior uso.



No.	Fecha	Hora	Cemento (Kg)	Agregado 1 (Kg)	Agregado 2 (Kg)
147	22-05-26	09:56:09	909	11654	11967
146	22-05-26	09:50:26	605	7471	7781
145	22-05-26	09:41:12	307	4086	4288
144	22-05-26	09:36:12	195	2142	2430
143	22-05-26	09:34:02	1532	19892	19430
142	22-05-26	09:30:24	1531	19814	19388
141	22-05-26	09:15:00	243	3028	2844
140	22-05-26	09:07:43	692	8988	8759
139	22-05-26	09:01:11	955	11806	11965

Figura 48.Historico de datos en HMI. Fuente: Propia.

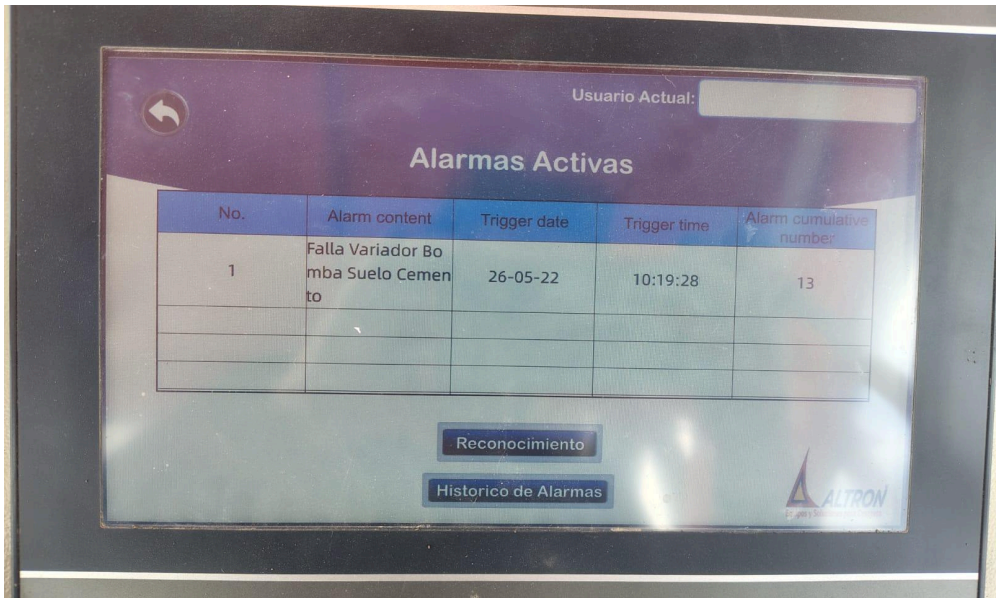


Figura 49. Alarmas en HMI. Fuente: Propia.

La implementación de la HMI mejora significativamente la interacción operador–proceso, proporcionando mayor trazabilidad, capacidad de supervisión y control operativo sobre la planta automatizada. Esto permite optimizar la toma de decisiones, reducir tiempos de respuesta ante fallos y aumentar la confiabilidad general del sistema.

13. Validación mediante simulación, aplicación real y análisis de datos

En esta fase se realiza la validación funcional del sistema de automatización propuesto mediante simulaciones digitales, permitiendo verificar el comportamiento del proceso antes de su implementación física. Para ello, se evalúa la respuesta del sistema frente a diferentes condiciones de operación, incluyendo variaciones en el flujo de materiales, cambios en los tiempos de dosificación y modificaciones en las consignas de producción. La estrategia desarrollada es implementada en una planta física de dosificación de suelo-cemento, con el propósito de validar el comportamiento real del sistema bajo condiciones operativas reales. Durante esta etapa se comprueba la correcta ejecución de las secuencias de control, la estabilidad de las variables del proceso y la respuesta del sistema ante perturbaciones propias de la operación. Adicionalmente, se realiza el análisis y tratamiento de los datos obtenidos tanto en simulación como en la implementación física, con el fin de identificar oportunidades de mejora en términos de eficiencia operativa, precisión en la dosificación y reducción de variaciones en la mezcla de suelo-cemento. También se evalúa la trazabilidad de la información generada por el sistema, garantizando el

registro adecuado de variables de proceso, alarmas, estados operativos y eventos relevantes para control y supervisión.

13.1 Simulación del proceso

Para realizar la comprobación del proceso, se implementa la simulación en el programa Codesys, donde se emplea la lógica de programación explicada en el apartado 12, donde se desarrolla un HMI como guía visual del proceso, esta guía se realiza lo más cercana al proceso real, simulando imperfecciones y variaciones, tanto en flujo, como mediciones de corriente.

De primera mano se observa el correcto seguimiento secuencial de la lógica implementada, así como los cálculos teóricos para determinación de puntos de referencia y seguimiento de los puntos de referencia con respecto al cemento. La simulación brinda información visual clave, como lo es gráficas de comportamiento de flujos, posibles errores de implementación, comprobación de paro de emergencia y posibles alarmas por sobre flujo.

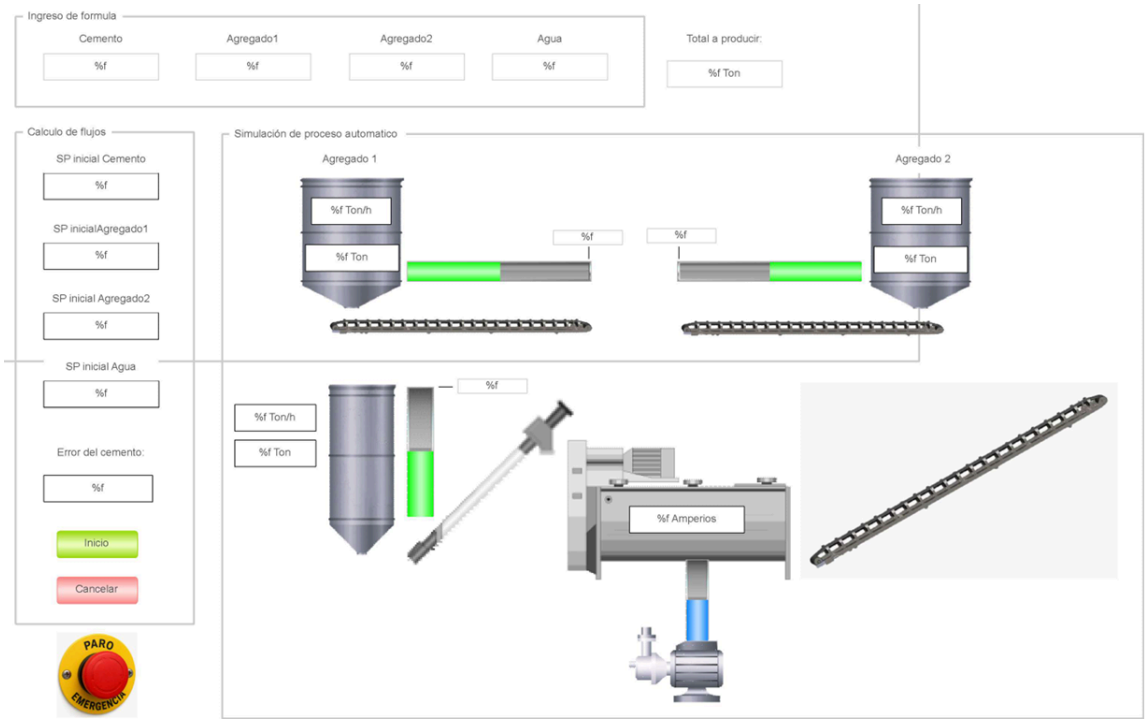


Figura 50. Simulación de proceso industrial. Fuente: Propia.

La simulación del sistema considera una variable de frecuencia asociada al variador de velocidad del alimentador de agregados. Esta frecuencia representa la velocidad de operación de las bandas de agregado. A partir de datos experimentales del proceso, se estableció una relación aproximada entre la frecuencia del motor y el flujo de material transportado:

- 20 Hz ≈ 40 ton/h
- 60 Hz ≈ 115 ton/h

Con base en esta relación, se implementó una ecuación lineal que permite calcular el flujo objetivo en función de la frecuencia aplicada a los motores, con esto se realiza el flujo de agregados, calculando dinámicamente en toneladas por hora (ton/h), generando un comportamiento realista, no se realiza un cambio instantáneo del flujo, sino que se implementa una rampa de estabilización. Esta rampa simula: La aceleración del motor mediante el variador de velocidad y la inercia mecánica de la banda transportadora. De esta manera, el flujo aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor objetivo, generando una respuesta similar a la observada en sistemas industriales reales.

La estabilización obtenida permite además evaluar el comportamiento del controlador PI implementado en el PLC.

Con el objetivo de representar el comportamiento eléctrico del mezclador principal de la planta, se implementó una simulación de corriente consumida por el motor, la corriente simulada depende directamente del estado operativo del mezclador y de la presencia de material dentro del sistema.

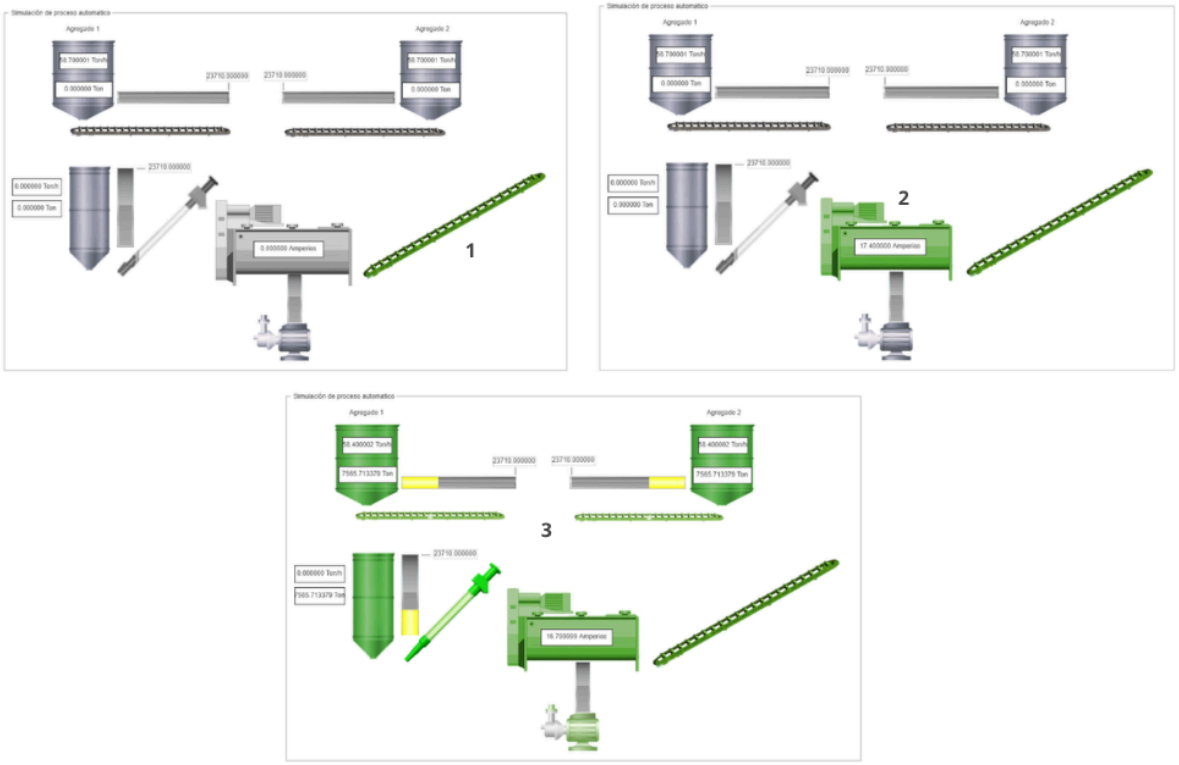


Figura 51. Secuencia de encendido de elementos industriales en simulación. Fuente: Propia.

13.2 Implementación física

La implementación física del sistema automatizado se realizó sobre la planta de producción de suelo-cemento, integrando los elementos de instrumentación, control y supervisión diseñados en las fases anteriores. La validación se enfocó en comprobar el funcionamiento coordinado de los actuadores, sensores y algoritmos de control implementados en el PLC, así como la correcta interacción con la interfaz HMI. Para ello, se efectuó la configuración e integración de los equipos de automatización. Durante la puesta en marcha se verificó el correcto funcionamiento de las secuencias de control, el accionamiento de las bandas transportadoras y tornillo dosificador. Los resultados obtenidos permitieron validar el comportamiento esperado del sistema bajo condiciones reales de producción.

Tabla 10. Tiempos de secuencia de encendido. Fuente: Propia.

ID	Timepo de inicio	Elemento encendido
1	0:00	Banda inclinada
2	0:05	Mezclador
3	0:13	Bandas de agregados, tornillo sin fin y bomba de agua

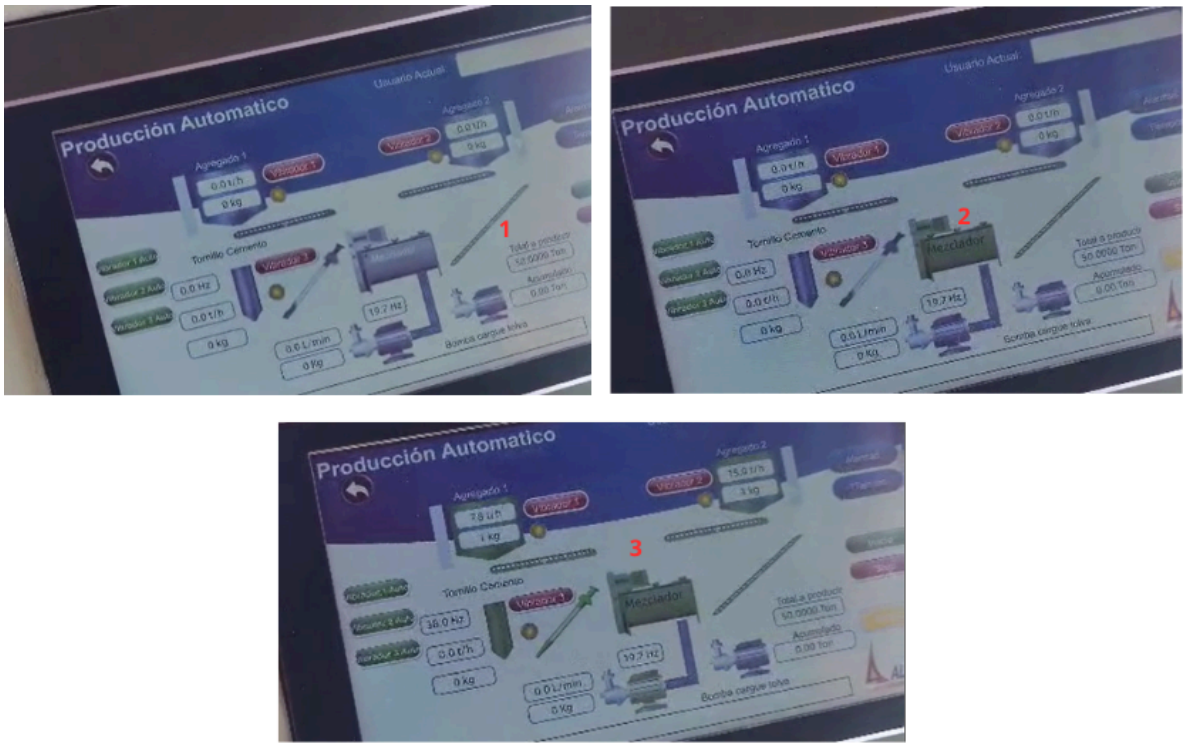
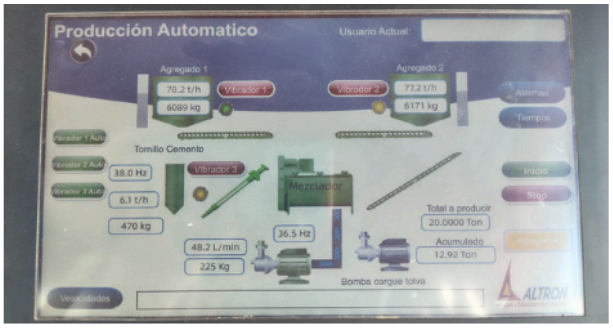


Figura 52. Secuencia de encendido de elementos industriales en planta. Fuente: Propia.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de sincronización según el comportamiento del cemento y estabilidad operacional, obteniendo seguimiento de punto de referencia manteniendo el flujo estable, tiempos de respuesta adecuados y una mejora en la continuidad del proceso de dosificación. Los resultados, tanto de sincronización, como de operación se presentan en la figura 53.

Elemento	Flujo (Ton/h)
Agregado 1	86,6
Agregado 2	83,1
Cemento	6,7
Agua	3,46
Total	179,86



Elemento	Flujo (Ton/h)
Agregado 1	78,2
Agregado 2	77,2
Cemento	6.1
Agua	2,9
Total	158,3

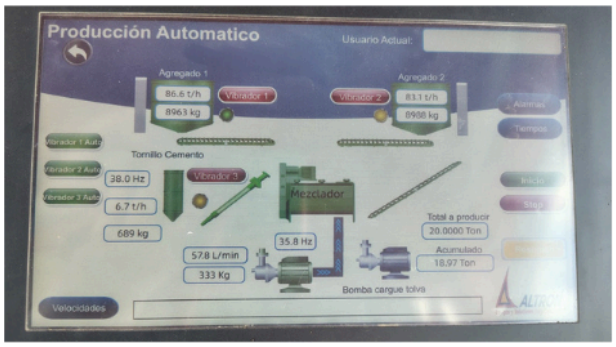


Figura 53. Sincronización de dosificación según el flujo del cemento. Fuente: Propia.

Tabla 11. Tiempos finales por elemento. Fuente: Propia.

Cantidad de Bache (Ton)	Tiempo total del bache	Tiempo final Agregado 1	Tiempo final Agregado 1	Tiempo final Cemento	Tiempo final Agua
20	7:23:00.30	7:18.99	7:19.99	7:21.99	7:23.99

En la Tabla 11 se observa el tiempo de finalización de cada uno de los elementos del sistema, evidenciándose diferencias de detención entre 1 y 5 segundos respecto al instante de llegada al peso objetivo.

En cuanto a la infraestructura física de la planta, aunque las modificaciones mecánicas no hacen parte del alcance principal del presente proyecto, se implementaron mejoras complementarias orientadas a optimizar el comportamiento del proceso de dosificación. Entre estas se destaca la incorporación de un sistema de fluidización en la tolva de cemento y la instalación de tornillos sin fin adecuado para el transporte del material. Estas adecuaciones permitieron reducir fenómenos de compactación y formación de bóvedas en la tolva, garantizando un flujo más uniforme y continuo hacia el sistema de dosificación..



Figura 54. Visualización real del proceso de dosificación. Fuente: Propia.

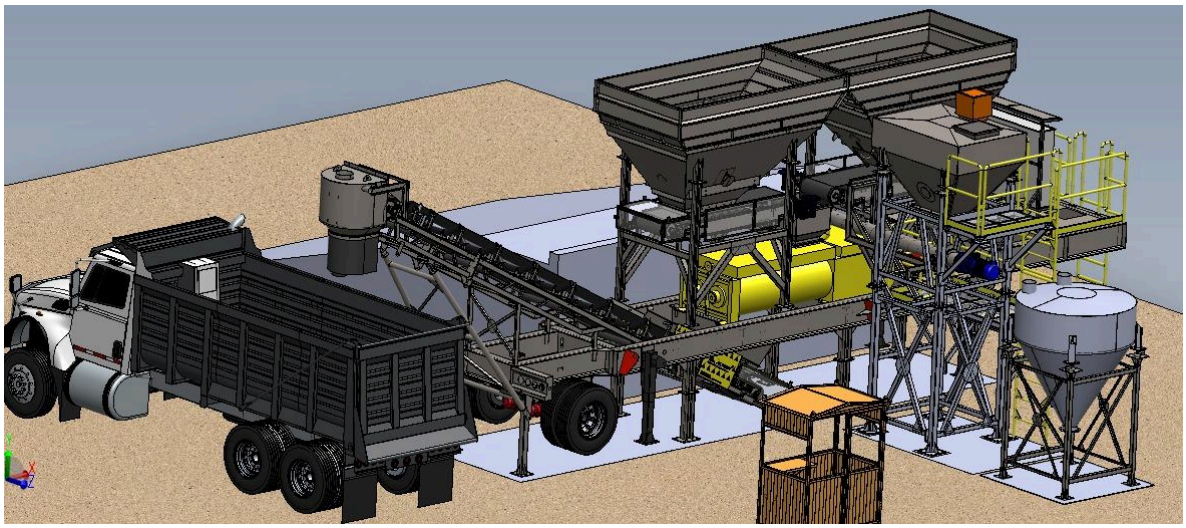


Figura 55. Render de la planta actual con modificaciones mecánicas. Fuente: Altron Ingenieria.



Figura 56. Planta actual con modificaciones mecánicas. Fuente: Propia.

13.3 Análisis de datos

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema automatizado en condiciones reales de operación, se realizó el seguimiento de una jornada completa de producción. Durante la prueba se registraron 20 baches consecutivos con una producción total aproximada de 958 toneladas de suelo-cemento. Es importante recalcar que la implementación de la interfaz HMI y del sistema de registro histórico permitió almacenar de forma automática la información generada durante la producción, incluyendo variables como hora de operación, cantidad producida, consumo de cemento, agregados y agua. Gracias a esta funcionalidad fue posible generar los reportes presentados en la Tabla 12, la disponibilidad de estos registros proporciona trazabilidad sobre cada lote producido, facilitando el análisis de desempeño, la verificación de consumos y el seguimiento de las condiciones de operación. Asimismo, el almacenamiento histórico permite identificar desviaciones, generar reportes de producción y disponer de información confiable para actividades de control de calidad, mantenimiento y toma de decisiones operativas.

Los resultados de la jornada muestran una producción de 50 toneladas por bache, evidenciando una alta repetibilidad del proceso y una adecuada estabilidad operacional. Asimismo, se compararon los valores de dosificación obtenidos físicamente con los registrados por el software de control, observándose diferencias tanto positivas como negativas alrededor del valor teórico establecido.

Tabla 12. Registro de jornada de producción. Fuente: Propia.

Bache	Hora	Producción (ton)	Cemento (kg)	Error Cemento (kg)	Agregado 1 (kg)	Agregado 2 (kg)	Agua (L)
1	7:18	50	1864	-60	23462	23353	1164
2	7:44	50	1870	-19	23511	23446	1158
3	8:08	50	1866	-2	23457	23411	1245
4	8:30	49	1827	25	23121	23096	1246
5	8:52	50	1876	18	23410	23454	1292
6	9:20	49	1821	42	23096	23162	1250
7	9:41	50	1850	19	23278	23218	1258
8	10:05	50	1854	28	23284	23171	1332
9	10:39	50	1867	31	23401	23201	1345
10	11:00	49	1831	39	23102	23123	1350
11	11:26	50	1876	14	23400	23429	1350
12	11:47	50	1873	7	23422	23355	1232
13	12:08	50	1862	45	23371	23403	1232
14	12:29	50	1858	22	23382	23407	1232
15	12:55	50	1832	-5	23381	23432	1228
16	13:16	50	1872	-2	23414	23394	1335
17	13:41	50	1875	6	23414	23415	1245
18	14:01	50	1873	-60	23358	23297	1245
19	14:32	30	1107	-7	13817	13815	1340
20	15:03	50	1875	-2	23391	23432	1340

Respecto a la dosificación de cemento, se estableció como referencia un valor objetivo de 1875 kg para lotes de 50 toneladas. Los registros obtenidos muestran desviaciones inferiores a ±40 kg en la mayoría de los baches, presentando únicamente un valor puntual ligeramente superior. El error promedio fue cercano a 11 kg, equivalente a una precisión superior al 98 %, lo que demuestra la capacidad del sistema automatizado para mantener una dosificación estable y repetible durante la operación continua. Con estos datos se obtiene error promedio y error máximo:

$$\%Error = \frac{|Error\ (Kg)\ prom|}{1875} * 100 \qquad (14)$$

$$\%Error_{Prom} = \frac{453}{1875} * 100 = 1.21\% \qquad (15)$$

$$\%Error_{Max} = \frac{60}{1875} * 100 = 3.20\% \qquad (16)$$

Asimismo, los registros de agregados y agua muestran un comportamiento uniforme a lo largo de la jornada, evidenciando una adecuada sincronización entre los diferentes subsistemas de dosificación y contribuyendo a la homogeneidad de la mezcla producida.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la automatización implementada permite mantener una producción estable, repetible y con niveles de precisión adecuados para garantizar la homogeneidad de la mezcla y la continuidad operacional de la planta. Donde, en la tabla 13 presenta la distribución porcentual de los materiales utilizados durante el proceso de producción de suelo-cemento en un bache de 20 toneladas. Se observa que la proporción de cemento se mantuvo cercana al valor de diseño establecido para la producción de suelo-cemento, presentando desviaciones reducidas respecto al punto de referencia. De igual manera, el control del

caudal de agua permitió conservar condiciones uniformes de humedad durante la fabricación, favoreciendo la correcta hidratación del cemento y la calidad final del producto.

Los resultados obtenidos demuestran que la estrategia de control implementada logra mantener un equilibrio adecuado entre los componentes de la mezcla, contribuyendo al cumplimiento de los requisitos de dosificación y mejorando la estabilidad operacional de la planta.

Tabla 13. Proporcionalidad de materiales en diferentes tomas en un bache. Fuente: Propia.

Muestra	Agregado 1 (%)	Agregado 2 (%)	Cemento (%)	Agua (%)
Muestra 1 (12.92 ton)	49.51	47.77	1.44	1.28
Muestra 2 (18.97 ton)	49.89	47.18	1.76	1.17
Muestra 3 (20.12 ton)	49.28	48.81	1.58	0.90
Promedio	**49.56%**	**47.92%**	**1.59%**	**1.12%**

Adicionalmente, se realizaron pruebas de laboratorio sobre muestras obtenidas durante la producción, evaluando propiedades mecánicas del material mediante ensayos de resistencia a compresión en briquetas, teniendo en cuenta una fórmula preestablecida que comunmente para la vías principales de Colombia requiere una resistencia superior a 5 MPa [56]. Los resultados obtenidos permitieron verificar el cumplimiento de los requerimientos de calidad establecidos para la mezcla de suelo-cemento.



Figura 57. Prueba de resistencia a la compresión. Fuente: Propia.

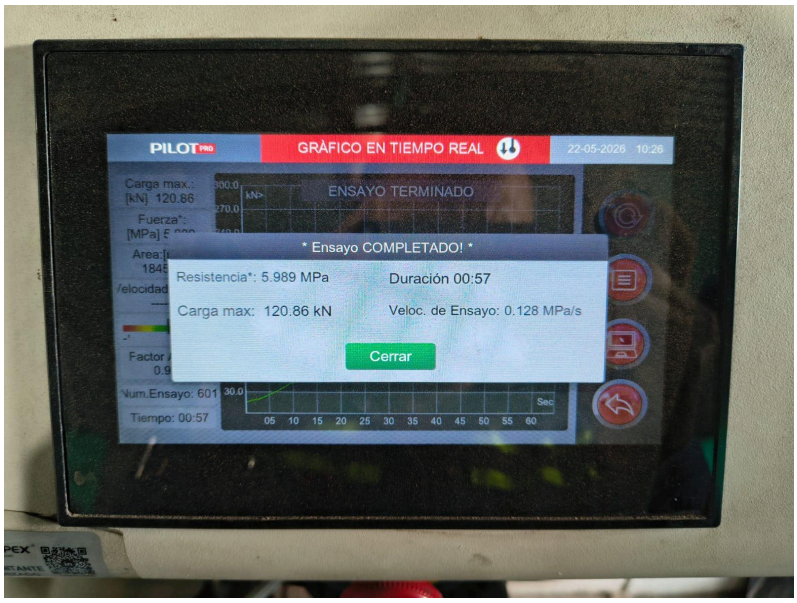


Figura 58. Resultados en MPa de la prueba de resistencia. Fuente: Propia.

Con esta información es posible determinar los cambios con respecto al inicio y la implementación:

Tabla 14. Sistema inicial VS. Sistema implementado. Fuente: Propia.

Indicador	Sistema anterior	Sistema automatizado
Ajustes manuales	Frecuentes	Mínimos
Trazabilidad	Manual	Automática
Control de agua	Sensor de paleta	Control PI
Control de cemento	Sin retroalimentación	Con realimentación
Alarmas	No disponibles	Disponibles
Registro histórico	No	Sí

14. CONCLUSIONES

A partir de la implementación del sistema automatizado propuesto, se evidenció una mejora en la estabilidad y sincronización del proceso de dosificación de suelo-cemento, donde a lo largo del desarrollo se obtuvieron resultados de primera mano como:

- El diagnóstico realizado permitió identificar que las principales falencias del proceso estaban relacionadas con la imprecisión en la dosificación del cemento, la ausencia de control real del caudal de agua y la limitada trazabilidad de la información de producción.
- Se evidenció que la arquitectura existente dependía en gran medida de ajustes manuales y de señales indirectas de control, lo que generaba variaciones en la proporción de materiales y dificultaba el cumplimiento constante de los parámetros establecidos por la normativa INVÍAS para suelo-cemento.
- El análisis del flujo operativo permitió identificar oportunidades de mejora en la sincronización entre equipos, especialmente durante las etapas de dosificación y mezclado, donde se presentaban tiempos muertos y posibles desbalances de material.

Por otro lado, el rediseño propuesto:

- Integró instrumentación adecuada para las condiciones de operación de una planta de suelo-cemento, incluyendo celdas de carga, sensores de corriente, medición de caudal y elementos de actuación compatibles con entornos industriales de alta exigencia.
- La arquitectura basada en PLC y HMI permitió centralizar la supervisión y el control del proceso, facilitando la integración de las variables críticas de producción y mejorando la capacidad de monitoreo en tiempo real.
- La selección de tecnologías de medición más robustas, especialmente para el control de peso y caudal, proporciona una base técnica para incrementar la precisión de la dosificación y reducir la variabilidad del proceso productivo.

La implementación del algoritmo de control:

- El controlador PI permitió mejorar la estabilidad de los flujos de dosificación, reduciendo las desviaciones entre los valores de referencia y las variables reales del proceso.
- La estrategia de sincronización basada en el flujo de cemento permitió coordinar automáticamente los sistemas de agregados y agua, logrando una relación más uniforme entre los componentes de la mezcla.
- La incorporación de alarmas, validaciones de estado y supervisión de corriente incrementó la confiabilidad operativa del sistema, permitiendo detectar oportunamente condiciones anormales y ejecutar acciones de protección automáticas.
- El desarrollo del modo manual desde la HMI facilitó las actividades de mantenimiento, pruebas y puesta en marcha, mejorando la capacidad de diagnóstico de los equipos de campo.

Así mismo, los resultados finales, tanto simulados como físicos indican:

- El sistema automatizado mantiene una operación estable y repetible durante la producción de suelo-cemento.
- El análisis de los registros de producción evidenció una adecuada sincronización entre los subsistemas de dosificación, permitiendo conservar proporciones homogéneas entre cemento, agregados y agua durante la fabricación.
- Las pruebas de resistencia a compresión realizadas sobre las muestras obtenidas permitieron verificar el cumplimiento de los requisitos de calidad establecidos para la mezcla de suelo-cemento utilizada en aplicaciones viales.
- La implementación propuesta contribuye al mejoramiento general del proceso productivo mediante una mayor precisión de dosificación, mejor trazabilidad de la información y aumento de la confiabilidad operacional de la planta.

15. Aportes y sugerencias

15.1 Aportes del proyecto

1. Se desarrolló una propuesta integral de automatización para plantas de suelo-cemento que combina instrumentación industrial, control automático y supervisión mediante HMI.
2. Se incorporó una estrategia de sincronización dinámica de materiales basada en el flujo real de cemento, permitiendo mejorar la proporcionalidad de la mezcla durante la producción.
3. Se implementó un sistema de almacenamiento histórico de datos que fortalece la trazabilidad de la información y facilita procesos de auditoría, control de calidad y análisis de desempeño.
4. El proyecto establece una metodología adaptable a otros procesos de dosificación industrial que requieran control simultáneo de sólidos y líquidos.

15.2 Sugerencias para trabajos futuros

1. Implementar un caudalímetro electromagnético industrial en reemplazo de sensores mecánicos de paleta, con el fin de mejorar aún más la precisión y estabilidad de la medición de agua.
2. La integración del amperímetro así como se realizó en la simulación, ya que esto evitará atascamiento por paro del mezclador.
3. Incorporar una válvula neumática de control proporcional para la dosificación de agua, permitiendo regular el caudal de forma continua y no únicamente mediante variación de velocidad de la bomba.

4. Integrar sensores adicionales para medición automática de humedad del material, permitiendo realizar correcciones dinámicas en la cantidad de agua adicionada según las condiciones reales del agregado.
5. Implementar herramientas de análisis predictivo y mantenimiento basado en condición utilizando los datos históricos generados por el sistema de automatización.
6. Desarrollar una integración con plataformas SCADA o sistemas en la nube para facilitar el monitoreo remoto, la generación automática de reportes y el análisis avanzado de indicadores de producción.
7. Evaluar la incorporación de tecnologías de visión artificial e inteligencia artificial para el control de calidad automático y la optimización continua del proceso productivo.

Bibliografía

[1] INVIAS, “Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022,” 2022. Available: https://www.dvconsultoriayconstruccion.com/wp-content/uploads/2023/08/Capitulo-1.pdf. [Accessed: Feb. 27, 2026]

[2] ASTM, “Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids,” *Astm.org*, 2024. Available: https://store.astm.org/d0653-22.html. [Accessed: Feb. 27, 2026]

[3] E. V. Céspedes, “Implementación de la automatización del proceso de dosificación de concreto premezclado para mejorar la calidad y tiempo de entrega del concreto,” *Upn.edu.pe*, 2020, doi: https://doi.org/670.427%20CESP%202020. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/items/7f0ecb8f-00cd-4ff2-aa61-9d19b8227bb0. [Accessed: Aug. 27, 2025]

[4] INVIAS, “SECCIÓN 200 -AGREGADOS PÉTREOS,” 2012. Available: https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-002_V1_Normas__Invia_Seccion__200-13.pdf

[5] Q. Castillo and W. Daniel, “Optimización de la productividad de una planta de concreto en proyectos de vivienda económica masiva aplicando conceptos de la filosofía Lean Construction,” *Pucp.edu.pe*, Jan. 23, 2024. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/items/7f0ecb8f-00cd-4ff2-aa61-9d19b8227bb0. [Accessed: Feb. 27, 2026]

[6] O. J. SILVA, “GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO-CEMENTO: ¿QUÉ Y PARA QUÉ? - 360 EN CONCRETO,” *360 EN CONCRETO*, Jun. 10, 2022. Available: https://360enconcreto.com/blog/detalle/caracteristicas-del-suelo-cemento-que-y-para-que/

[7] Texas Department of Transportation, “7.1 Hydraulic Cements,” *Txdot.gov*, 2021. Available: https://www.txdot.gov/manuals/mnt/pdm/materials_investigation_and_selection_information/concrete_mat-i1014264/_hydraulic_cements-i1014270.html. [Accessed: Oct. 28, 2025]

[8] ARGOS, “CONSTRUCCIÓN DE SUELO CEMENTO GUÍA BÁSICA.” Available: https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/Cartilla-Suelo-cemento-soluciones-viales.pdf

[9] I. Tecnológico, S. Domingo, R. Dominicana, and T. Corral, “Ciencia y Sociedad.” Available: https://www.redalyc.org/pdf/870/87012672003.pdf

[10] K. Singh, “Soil Cement- Composition, Types, Advantages, And Disadvantages - Civil Engineering Portal,” *Civil Engineering Portal - Biggest Civil Engineering Information Sharing Website*, Jul. 29, 2023. Available: https://www.engineeringcivil.com/soil-cement-composition-types-advantages-and-disadvantages.html

[11] GeotechTips, *X (formerly Twitter)*, 2026. Available: https://x.com/GeotechTips/status/1704920831820980724. [Accessed: Mar. 02, 2026]

[12] https://www.facebook.com/proroadglobal, “Diseño del Suelo Cemento | Pro-Road Global,” *Pro-Road Global*, 2026. Available: https://www.proroadglobal.com/diseno-del-suelo-cemento/. [Accessed: Mar. 02, 2026]

[13] O. R. GARCÍA TORO , “Bot Detection,” *Ucatolica.edu.co*, 2026. Available: https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/140c5ce1-5c92-4735-a9fd-69ed64b95d9e/content. [Accessed: Mar. 02, 2026]
[14] N. Ali Lakho and M. Auchar Zardari, “Neville, A.M. (2011) Properties of Concrete. Pearson Education Limited, Essex. - References - Scientific Research Publishing,” *www.scirp.org*, 2011. Available: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1855282
[15] A. SYSTEM, “Soil Cement Mixing Ratio Guide for Construction Projects - AMIX Systems,” *AMIX Systems*, May 14, 2025. Available: https://amixsystems.com/soil-cement-mixing-ratio/. [Accessed: Mar. 02, 2026]
[16] ICONTEC, “NTC 673:2021 Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.,” 2021.
[17] ASTM, “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement,” *Astm.org*, 2022. Available: https://store.astm.org/c0114-18.html
[18] L. Flores, “Client Challenge,” *Slideshare.net*, 2026. Available: https://es.slideshare.net/slideshow/ensayo-de-contenido-de-humedad-y-ensayo-de-porcentaje-que-pasa-la-numero-200/48224804. [Accessed: Mar. 02, 2026]
[19] viaindustrial, “Densimetro nuclear Humboldt HS-5001 HS-5001EZ humboldt P186909 PIDN534T Colombia,” *Viaindustrial.com*, 2026. Available: https://www.viaindustrial.com/densimetro-nuclear-humboldt-hs-5001-hs-5001ez-humboldt/pp/P186909/. [Accessed: Mar. 02, 2026]
[20] AUTEXOPEN, “La automatización industrial: ¿Qué es? Sus características más relevantes - AUTEXOPEN,” *AUTEXOPEN*, Aug. 19, 2022. Available: https://www.autex-open.com/automatizacion-industrial/automatizacion-industrial/
[21] Ramírez Cadena, Miguel de Jesús, Macías Hidalgo, IsraeL, báñez Viruega, Karlo Isaac, “La pirámide de la automatización,” *Repositorio.tec.mx*, Nov. 05, 2019. Available: https://repositorio.tec.mx/items/5b2e25ed-b985-4ca4-8750-871b50e580d5
[22] SAP, “¿Qué es la Industria 4.0? | Definición, tecnologías, beneficios | SAP Insights,” *SAP*. Available: https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html
[23] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, “The Future of the Human–Machine Interface (HMI) in Society 5.0,” *Future Internet*, vol. 15, no. 5, p. 162, Apr. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/fi15050162
[24] G. A. Mazur and W. J. Weindorf, *Programmable logic controllers : principles and applications*. Orland Park, Illinois: American Technical Publishers, 2021.
[25] Oxmaint, “What Is a Programmable Logic Controller (PLC)? A Comprehensive Guide,” *OXMaint*, May 29, 2024. Available: https://oxmaint.com/blog/post/what-is-a-plc
[26] R. Netto and A. Bagri, “Programmable logic controllers,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 77, Art. no. 11, 2013.
[27] IEC, “Programmable controllers - Part 3: Programming languages Automates programmables - Partie 3: Langages de programmation,” 2003. Available: https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_31/ourdev_569653.pdf

[28] Žydrūnas Kavaliauskas, Giedrius Blažiūnas, Igor Šajev, Aleksandras Iljinas, and Dovilė Gimžauskaitė, “Development and Optimization of an Automated Industrial Wastewater Treatment System Using PLC and LSTM Neural Network,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 16, pp. 8990–8990, Aug. 2025, doi: https://doi.org/10.3390/app15168990. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/16/8990. [Accessed: Sep. 16, 2025]

[29] S. Hudson, “Best PLC Brands Compared - controlcircuitry.com,” *controlcircuitry.com*, Oct. 05, 2025. Available: https://controlcircuitry.com/best-plc-brands-compared. [Accessed: Nov. 05, 2025]

[30] D. Y. Arce Santillan, L. A. Nolasco Sandoval, A. I. Martinez Santillán, P. J. Avalos Yataco, H. S. Presentación Quispe, and N. R. Hercilla Huapaya, “Industrial process optimization through advanced HMI systems: exploring the integration of IoT and AI,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 36, no. 2, p. 817, Nov. 2024, doi: https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i2.pp817-825. Available: https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/36604

[31] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, “Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, Jun. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006

[32] B. Joshi, “A Study of the Various Communication Protocols Used in PLC Systems: Modbus, Profibus, EthernetIP and their implementations, evolution and comparative analysis,” *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 06, no. 04, Apr. 2024, doi: https://doi.org/10.56726/irjmets52882. Available: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_4_april_2024/52882/final/fin_irjmets1713198034.pdf. [Accessed: Jan. 29, 2025]

[33] S. Sharma, “Modbus RTU: A Comprehensive Guide to Understanding and Implementing the Protocol,” *Wevolver*, Jul. 18, 2023. Available: https://www.wevolver.com/article/modbus-rtu-a-comprehensive-guide-to-understanding-and-implementing-the-protocol

[34] Ujjval Shah, “modbus RTU interframe and intermessage delay considerations,” *Ni.com*, May 16, 2012. Available: https://forums.ni.com/t5/Instrument-Control-GPIB-Serial/modbus-RTU-interframe-and-intermessage-delay-considerations/td-p/1993285?lightbox-message-images-1993285=75437i7714A85CC6728DC6. [Accessed: Nov. 06, 2025]

[35] Z. Lin and S. Pearson, “An inside look at industrial Ethernet communication protocols Strategic Marketing Manager Texas Instruments,” 2018. Available: https://www.ti.com/lit/wp/spry254b/spry254b.pdf. [Accessed: Nov. 06, 2025]

[36] C. W. de Silva, *Sensors and Actuators*. European Organization for Nuclear Research, 2015. doi: https://doi.org/10.1201/b18739

[37] DOMAT, “Plantas dosificadoras y mezcladoras DOMAT | Series DMA, DMPE y DMC,” *DOMAT*, Oct. 23, 2025. Available: https://domatltda.com/plantas-dosificadoras-y-mezcladoras-domat-series/. [Accessed: Mar. 02, 2026]

[38] M. Haist *et al.*, “DIGITIZATION OF THE CONCRETE PRODUCTION CHAIN USING COMPUTER VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE,” 2022. Available: https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/ipi/publications/2022/fib_Oslo_Digitization_out.pdf. [Accessed: Nov. 10, 2025]

[39] W. Yu, Z. Zhiduo, X. Xiaoyu, and S. Lei, “An intelligent soil-cement mixing column driver,” *Automation in Construction*, vol. 142, p. 104474, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104474. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522003478

[40] C. Torregrosa Bonet, F. A. Lloret Abrisqueta, and A. Guerrero González, “Integration of Industry 5.0 Technologies in the Concrete Industry: An Analysis of the Impact of AI-Based Virtual Assistants,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 18, p. 10147, Sep. 2025, doi: https://doi.org/10.3390/app151810147. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/18/10147. [Accessed: Nov. 10, 2025]

[41] SENA, “Compilación Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA - Decreto 611 de 2025,” *Sena.edu.co*, 2025. Available: https://normograma.sena.edu.co/compilacion/docs/decreto_0611_2025.htm#1. [Accessed: Nov. 18, 2025]

[42]Dielco, “Guardamotor: Funciones, diferencias y aplicaciones,” *Dielco.co*, Jun. 20, 2023. Available: https://www.dielco.co/articulos/guardamotor-funciones-diferencias-y-aplicaciones

[43]Schneider Electric, “¿Qué es un contactor? ¿Cómo seleccionar un contactor? | Schneider Electric España,” *www.se.com*, Dec. 05, 2023. Available: https://www.se.com/es/es/faqs/FAQ000263192/

[44]

Flintec, “¿Qué es una Celda de Carga de Viga? Tipos de Corte y Flexión Explicados,” *Flintec.com*, 2026. Available: https://www.flintec.com/es/aprender/sensor-de-peso/celulas-de-carga/viga. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[45]Alif Vasaya, “Load Cell Price – How to Choose Affordable and Accurate Load Cells,” *Sensors & Gauges*, Sep. 19, 2025. Available: https://sensorsandgauges.com/blogs/latest/load-cell-price?utm_source=chatgpt.com. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[46]MAVIN, “Profesional Celda de carga de viga de corte de alta precisión con sensor aprobado por NB2 OIML C3 proveedores,China Celda de carga de viga de corte de alta precisión con sensor aprobado por NB2 OIML C3 fabricante,” *Mavin.cn*, 2026. Available: https://es.mavin.cn/nb2-oiml-c3-approved-sensor-high-accuracy-shear-beam-load-cell_p96.html. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[47]Flintec, “Explicación de la Celda de Carga de Compresión: Qué es y Cómo Funciona,” *Flintec.com*, 2026. Available: https://www.flintec.com/co/aprender/sensor-de-peso/celulas-de-carga/compresion. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[48]MICROTESS, “Celdas de carga de compresión - Microtess,” *Microtess*, 2024. Available: https://www.micro-tess.com/es/product-category/compression-load-cells/. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[49]BASCOSTA, “Celdas a compresión de bajo perfil Serie CPA - Bascosta,” *Bascosta - Soluciones inteligentes de pesaje*, Jan. 29, 2024. Available: https://www.bascosta.com/producto/pesaje-atex/celdas-de-carga-atex/celdas-a-compresion-de-bajo-perfil-serie-cpa/. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[50]Amazon, “Amazon.com: HEXEH Hall Effect Sensor AC/DC Current transducer Hall Effect Current Transmitter ac Current Sensor 50 amps Input (Color : 0-5v Out, Size : 0-500A DC_AC 220V) : Industrial & Scientific,” *Amazon.com*, 2026. Available: https://www.amazon.com/-/es/HEXEH-Transductor-corriente-Transmisor-amperios/dp/B0CKZ2FRCG?th=1. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[51]Viaindustrial, “Sensor De Flujo De Rueda De Paletas 2536 signet- P247460 IDNT Colombia,” *Viaindustrial.com*, 2026. Available: https://www.viaindustrial.com/sensor-de-flujo-de-rueda-de-paletas-2536-signet-/pp/P247460/. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[52]Supmea, “Caudalímetro electromagnético con cuerpo de acero inoxidable SUP-LDG,” *Supmea Automation Co.,Ltd*, 2026. Available: https://es.supmeaauto.com/magnetic-flowmeter/caudalimetro-electromagnetico-con-cuerpo-de-acero-inoxidable. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[53]A. BARRA, “Cómo funciona un caudalímetro ultrasónico: descubra la tecnología de los caudalímetros ultrasónicos,” *Fuji Electric*, Jul. 27, 2023. Available: https://www.fujielectric.fr/es/blog/como-funcionan-los-caudalimetros-ultrasonicos-descubra-la-tecnologia-de-los-caudalimetros-ultrasonicos/?srsltid=AfmBOors_PNmX8c7pvTk-sJh2S366vqc4L9TYpyhBJX35BnYpDHHQ00B. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[54]Mercado Libre, “Dn80 Medidor De Flujo De Agua Líquida Ultrasónico Con Brida,” *Mercadolibre.com.co*, 2026. Available: https://www.mercadolibre.com.co/dn80-medidor-de-flujo-de-agua-liquida-ultrasonico-con-brida/p/MCO2041662534#polycard_client=search-desktop&search_layout=grid&position=3&type=product&tracking_id=bfa559ef-0efd-4943-a4de-51235412086f&wid=MCO3341954902&sid=search. [Accessed: Mar. 26, 2026]

[55]Directindustry, “caudalímetro de turbina Feejoy Technology,” *http://twitter.com/DirectIndustry*, 2016. Available: https://www.directindustry.es/prod/feejoy-technology/product-168093-2291574.html. [Accessed: Mar. 28, 2026]

[56]O. J. SILVA, “GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO-CEMENTO: ¿QUÉ Y PARA QUÉ? - 360 EN CONCRETO,” *360 EN CONCRETO*, Jun. 10, 2022. Available: https://360enconcreto.com/blog/detalle/caracteristicas-del-suelo-cemento-que-y-para-que/