

Arquitectura de control centralizado para el área de digestión y prensado en extractora de aceite de palma

Jesús David García Fontecha

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Daniel Alfonso Sierra Bueno
Doctor en Ingeniería Biomédica

Codirector externo

Jorge Armando Rojas Hernández
Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería Electrónica
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

A mi madre, Yenith Fontecha, con todo mi amor le dedico este título. Por su amor inmenso, por su fortaleza y por cada esfuerzo que hizo posible este camino; por estar conmigo en cada paso, incluso en aquellos que no se vieron, y por esa manera tan suya de creer en mí aun en los momentos más difíciles. Muchas veces sus sacrificios hablaron más fuerte que cualquier palabra y hoy este logro también lleva su entrega, su paciencia y todo el amor con el que me acompañó hasta llegar aquí.

Agradecimientos

Agradezco a AGROINCE por abrirme las puertas para realizar mi práctica empresarial y desarrollar este trabajo de grado en un entorno industrial real. Más allá del área específica abordada en el proyecto, esta experiencia me permitió acercarme al proceso de extracción de aceite de palma, comprender la dinámica de una planta en operación y reconocer la importancia de la ingeniería aplicada a necesidades reales de la industria.

Al ingeniero Jorge Armando Rojas Hernández, codirector externo del proyecto, por su acompañamiento, disposición y orientación durante el desarrollo del trabajo. Su experiencia en planta y sus aportes técnicos fueron fundamentales para comprender mejor el proceso, contrastar las decisiones de diseño y mantener la propuesta alineada con el contexto operativo de la empresa.

Al profesor Daniel Alfonso Sierra Bueno, director de este trabajo de grado, por su guía constante durante el desarrollo del proyecto. Agradezco su acompañamiento, sus observaciones y su disposición para orientar cada etapa del trabajo, ayudándome a desarrollarla con mayor claridad, rigor y compromiso.

Finalmente, agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por la formación recibida durante mi carrera y por brindarme las bases académicas y humanas para enfrentar este reto. Orgullosamente UIS.

Tabla de Contenido

	pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco Referencial	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Marco Teórico	15
2.2.1 Digestión y prensado en extractoras de aceite de palma	15
2.2.2 Variables críticas e instrumentación del proceso	16
2.2.3 Automatización industrial por niveles	16
2.2.4 Control mediante PLC	17
2.2.5 Interfaz HMI para supervisión local	18
2.2.6 Estrategias de control regulatorio	19
2.2.7 Estrategias de control secuencial	19
3. Desarrollo de la solución	21
3.1 Caracterización del sistema actual y reto de automatización	22
3.2 Filosofía de control definida	26
3.3 Arquitectura PLC-HMI desarrollada	27
3.4 Matriz causa–efecto e interlocks del sistema	32
3.5 Estrategias de control implementadas	33
3.5.1 Control de temperatura en digestores	33

3.5.2	Control de carga en digestores	38
3.5.3	Control por histéresis en prensas	39
3.6	Control secuencial mediante GRAFCET	40
3.7	Interfaz HMI desarrollada	41
3.8	Validación funcional en simulación	44
4.	Conclusiones	46
5.	Recomendaciones y trabajos futuros	49
	Referencias Bibliográficas	51
	Apéndices	53

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Pirámide de automatización industrial.	17
Figura 2. Arquitectura lógica del sistema de control basado en PLC.	18
Figura 3. Elementos básicos de secuencia GRAFCET.	20
Figura 4. Flujo metodológico del proyecto ARCODIP.	21
Figura 5. Equipos del área de digestión y prensado considerados en el alcance del proyecto.	22
Figura 6. Diagrama del proceso actual del área de digestión y prensado.	23
Figura 7. Configuración de la red PLC-HMI desarrollada en TIA Portal.	28
Figura 8. Configuración hardware de la arquitectura PLC y módulos en TIA Portal.	30
Figura 9. Respuesta simulada del controlador PI de temperatura del digestor.	38
Figura 10. Ley de control por bandas para la válvula de fondos del digestor.	39
Figura 11. Control por histéresis para el sistema hidráulico de prensas.	40
Figura 12. Pantallas HMI implementadas en TIA Portal.	43
Figura 13. GRAFCET principal del área de digestión y prensado.	55

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de alimentación	24
Tabla 2. Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de digestión	24
Tabla 3. Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de prensado	25
Tabla 4. Criterios operativos definidos para digestión y prensado	27
Tabla 5. Modos de operación definidos para ARCODIP	27
Tabla 6. Resumen general de señales de la arquitectura	29
Tabla 7. Módulos físicos considerados para la arquitectura PLC	30
Tabla 8. Bloques principales de la arquitectura software del PLC	31
Tabla 9. Matriz causa–efecto de nivel conceptual	33
Tabla 10. Resultado del diseño del controlador de temperatura	37
Tabla 11. Secuencias GRAFCET desarrolladas	41
Tabla 12. Pantallas HMI y relación funcional con la arquitectura PLC	42
Tabla 13. Resultados de validación funcional en simulación	44

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Repositorio digital de informes técnicos de avance	53
Apéndice B. Proyecto desarrollado en TIA Portal	54
Apéndice C. GRAFCET principal del área de digestión y prensado	55

Resumen

Título: Arquitectura de control centralizado para el área de digestión y prensado en extractora de aceite de palma. *

Autor: Jesús David García Fontecha **

Palabras Clave: Automatización industrial, control centralizado, digestión y prensado, PLC, HMI.

Descripción: El área de digestión y prensado de AGROINCE opera con supervisión local de variables críticas, ajustes manuales en digestores y control independiente en prensas, condición que dificulta la integración de información, la trazabilidad de eventos y la estandarización de criterios operativos entre turnos. Dado que esta etapa incide directamente en el acondicionamiento del fruto, la extracción mecánica de aceite y la estabilidad de la línea de proceso, el trabajo desarrolló una arquitectura PLC-HMI orientada a centralizar la lógica de operación, supervisión, gestión de alarmas e interlocks sin modificar mecánicamente los equipos existentes. El desarrollo articuló diagnóstico técnico, filosofía de control, selección de señales y módulos, matriz causa-efecto, secuencias GRAFCET, estrategias de control para digestores y prensas, pantallas HMI y validación funcional en PLCSIM. El resultado es una base de ingeniería verificable para una implementación progresiva en planta, con criterios técnicos para reducir la dependencia de maniobras manuales no estandarizadas, mejorar la trazabilidad operativa y apoyar una operación más segura y supervisada.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Daniel Alfonso Sierra Bueno. Codirector externo: Jorge Armando Rojas Hernández.

Abstract

Title: Centralized control architecture for the digestion and pressing area in an oil palm extraction plant. *

Author: Jesús David García Fontecha **

Keywords: Industrial automation, centralized control, digestion and pressing, PLC, HMI.

Description: The digestion and pressing area at AGROINCE operates with local supervision of critical variables, manual adjustments in digesters and independent control in presses, a condition that limits information integration, event traceability, and the standardization of operating criteria between shifts. Since this stage directly affects fruit conditioning, mechanical oil extraction, and process line stability, this work developed a PLC-HMI architecture aimed at centralizing operation logic, supervision, alarm and interlock management without mechanically modifying the existing equipment. The development integrated technical diagnosis, control philosophy, signal and module selection, cause-and-effect matrix, GRAFCET sequences, control strategies for digesters and presses, HMI screens, and functional validation in PLCSIM. The result is a verifiable engineering basis for progressive implementation in the plant, providing technical criteria to reduce dependence on non-standardized manual operations, improve operational traceability, and support safer and supervised operation.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Daniel Alfonso Sierra Bueno. Codirector externo: Jorge Armando Rojas Hernández.

Introducción

En Colombia, la agroindustria de la palma de aceite juega un papel esencial en la producción de aceite vegetal y en el desarrollo económico de las regiones productoras. Sin embargo, el éxito de esta actividad no solo depende del volumen de racimos de fruta fresca que se procesan en una planta extractora, sino también de la capacidad para mantener una transformación constante y eficiente del fruto en aceite crudo de palma. Por esta razón, indicadores técnicos y económicos como la tasa de extracción de aceite (*Oil Extraction Rate*, OER) y el control de las pérdidas de aceite en fibra son fundamentales para evaluar el desempeño del proceso (BBVA Colombia, 2024; Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2025; García et al., 2025).

Dentro de la cadena de extracción, el área de digestión y prensado cumple una función crítica. En los digestores, el fruto esterilizado se somete a acondicionamiento térmico y mecánico para favorecer la liberación del aceite; posteriormente, la masa digerida ingresa a las prensas, donde se realiza la extracción mecánica. El comportamiento de esta etapa incide sobre la eficiencia de extracción, el contenido de aceite residual en fibra y la continuidad operativa de la línea de proceso (Baryeh, 2001; Yosri et al., 2019).

En la planta extractora AGROINCE, el área de digestión y prensado opera de manera funcional y cumple su propósito productivo. Sin embargo, el diagnóstico técnico permitió identificar una operación con supervisión local de variables críticas, ajustes manuales en digestores y control automático independiente en prensas. Esta condición no representa una falla del proceso, pero sí limita la integración de información, la trazabilidad de eventos y la estandarización de criterios operativos entre turnos. Además, algunas maniobras asociadas a vapor, equipos calientes y elementos mecánicos exigen intervención cercana del operador, lo que evidencia la necesidad de una supervisión más centralizada y controlada.

Problemas similares en procesos industriales se han abordado mediante la integración de

instrumentación de campo, controladores programables, interfaces HMI, alarmas, históricos y estrategias de control regulatorio o secuencial. En plantas de beneficio y procesos de extracción, la automatización permite ordenar la operación, reducir variabilidad, mejorar la supervisión de variables críticas y apoyar la toma de decisiones del operador (Chuchee et al., 2025; Rincón et al., 2012). No obstante, una solución de automatización debe ajustarse a las condiciones reales de cada planta, evitando imponer cambios mecánicos o estrategias de control que no correspondan al comportamiento físico del proceso.

En este contexto, ARCODIP plantea el diseño de una arquitectura de control centralizado para el área de digestión y prensado de AGROINCE, basada en una estructura PLC-HMI. La propuesta concentra en el PLC la lógica de operación, los lazos de control, las secuencias, alarmas e interlocks, mientras que la HMI se concibe como medio de supervisión local y mando autorizado. Esta decisión permite conservar la operación manual local como respaldo, incorporar operación manual supervisada desde HMI y mantener la lógica de decisión en el controlador, sin contemplar modificaciones mecánicas sobre los equipos existentes ni una implementación física en planta dentro del alcance del trabajo.

El desarrollo del proyecto produjo una arquitectura PLC-HMI verificable en entorno simulado, junto con la caracterización del sistema actual, la filosofía de control, la lista de señales, la matriz causa–efecto, las secuencias GRAFCET, las estrategias de control, las pantallas HMI y la validación funcional en PLCSIM.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial. En el desarrollo de este documento se utilizó ChatGPT, de OpenAI, como apoyo para la mejora de redacción técnica, la organización de secciones, la elaboración de tablas y la generación de figuras ilustrativas. Estas herramientas no fueron utilizadas para generar resultados experimentales, desarrollar la lógica de control, programar el sistema en TIA Portal, definir criterios de ingeniería ni establecer conclusiones técnicas. Todo el contenido fue revisado, verificado y validado críticamente por el autor, quien asume la

responsabilidad plena sobre las afirmaciones, resultados y conclusiones del trabajo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar una arquitectura de control centralizada para el área de digestión y prensado que formalice la lógica operativa existente, integre regulación continua y control secuencial bajo una filosofía unificada y permita estabilizar estructuralmente las variables dinámicas críticas del proceso mediante validación en entorno simulado.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar técnicamente la lógica operativa actual del área de digestión y prensado, identificando las decisiones dinámicas que actualmente dependen del criterio del operador.

Formalizar la filosofía de control del proceso definiendo jerarquías claras entre nivel de campo, regulación continua y control secuencial.

Diseñar los lazos de control asociados a las variables dinámicas críticas, garantizando coherencia con la lógica operativa existente.

Modelar estructuralmente las secuencias operativas mediante metodología GRAFCET, sustituyendo la ejecución empírica por lógica formal documentada.

Integrar regulación continua y control secuencial dentro de una arquitectura PLC centralizada, definiendo matriz causa–efecto y estructura modular.

Validar la coherencia lógica y funcional de la arquitectura propuesta mediante simulación en entorno virtual.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

La eficiencia en plantas extractoras de aceite de palma está asociada al control de las condiciones térmicas y mecánicas que intervienen en la recuperación del aceite. Estudios sobre procesamiento de fruto de palma han mostrado que variables como temperatura, acondicionamiento de la masa y condiciones de prensado inciden en el rendimiento de extracción y en el aceite residual retenido en la fibra (Baryeh, 2001; Yosri et al., 2019).

En este contexto, la automatización industrial permite reducir la variabilidad operativa mediante la integración de instrumentación, controladores y criterios formales de operación. Experiencias en plantas de beneficio han evidenciado la importancia de estructurar sistemas de control capaces de supervisar variables críticas, ejecutar lógica automática y apoyar la toma de decisiones del proceso (Chucheep et al., 2025; Rincón et al., 2012).

A partir de estos antecedentes, ARCODIP se ubica como una propuesta de automatización aplicada al área de digestión y prensado, orientada al diseño de una arquitectura PLC-HMI que centralice la lógica de control, formalice la operación y establezca una base técnica para futuras etapas de implementación industrial.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Digestión y prensado en extractoras de aceite de palma

La digestión y el prensado son etapas consecutivas dentro del proceso de extracción de aceite crudo de palma. En la digestión, el fruto esterilizado es sometido a agitación mecánica e inyección de vapor, con el fin de acondicionar la masa antes de su ingreso a las prensas. Este acondicionamiento favorece la ruptura de estructuras celulares, la liberación del aceite y la reducción de su viscosidad (Baryeh, 2001).

El prensado corresponde a la extracción mecánica del aceite contenido en la masa digerida.

En esta etapa, la presión ejercida sobre el material debe ser suficiente para recuperar aceite, pero sin generar condiciones de sobrecarga que afecten el funcionamiento del equipo. Por ello, variables como la corriente del motor, la presión hidráulica y la continuidad de alimentación son relevantes para evaluar el estado operativo de las prensas (Yosri et al., 2019).

2.2.2 Variables críticas e instrumentación del proceso

Una variable crítica es aquella cuyo comportamiento incide directamente sobre la estabilidad, seguridad o eficiencia del proceso. En el área de digestión y prensado se destacan variables como temperatura de digestores, nivel de llenado, presión de vapor, corriente de motores, presión hidráulica, estado de válvulas, compuertas y equipos de transporte.

Desde el punto de vista de instrumentación y control, estas variables pueden clasificarse en medidas, manipuladas y supervisadas. Las variables medidas permiten conocer el estado del proceso; las manipuladas corresponden a los elementos sobre los cuales actúa el sistema de control; y las variables supervisadas permiten generar alarmas, permisos, bloqueos o condiciones de operación. Esta clasificación es necesaria para definir qué señales ingresan al PLC, qué actuadores son comandados y qué información debe presentarse en la HMI.

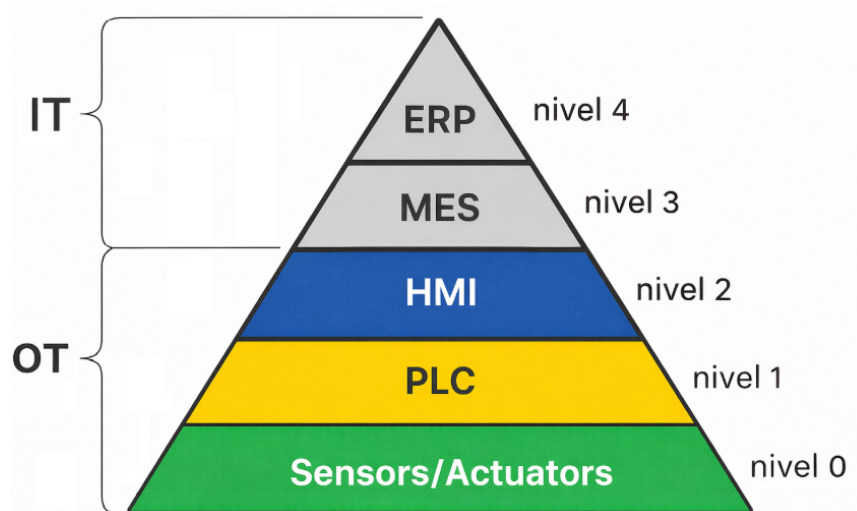
2.2.3 Automatización industrial por niveles

La automatización industrial organiza las funciones de un sistema productivo en niveles jerárquicos. Una representación ampliamente utilizada es la pirámide de automatización industrial, en la cual el nivel de campo agrupa sensores y actuadores, el nivel de control corresponde al PLC, el nivel de supervisión local se asocia a la HMI y los niveles superiores se relacionan con sistemas de gestión de producción y administración (International Society of Automation, s. f.). La Figura 1 muestra esta organización y permite ubicar el alcance técnico de ARCODIP.

En este proyecto, los niveles superiores de gestión se consideran únicamente como referencia conceptual. El alcance técnico se concentra en la integración de señales de campo, la ejecución de lógica de control en PLC y la supervisión operativa mediante HMI.

Figura 1

Pirámide de automatización industrial.



2.2.4 Control mediante PLC

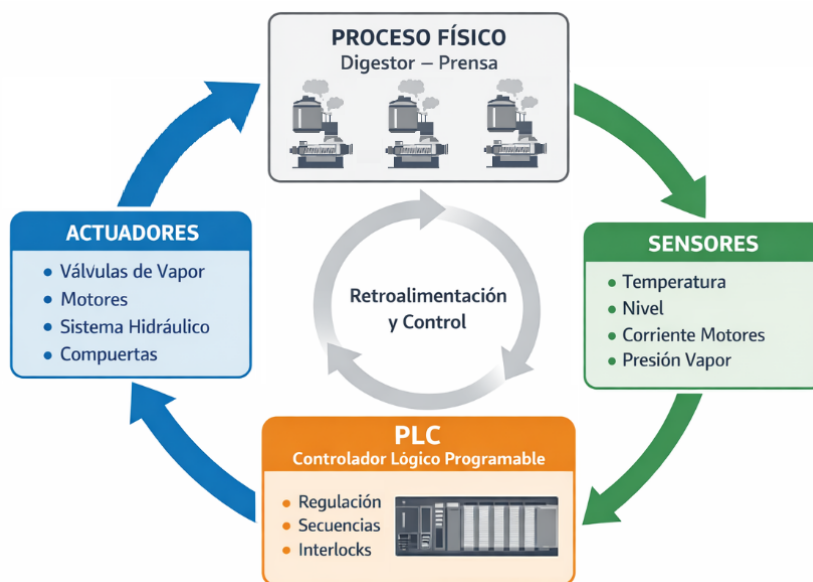
El controlador lógico programable, o PLC, es el elemento central del nivel de control en un sistema automatizado. Su función consiste en leer señales provenientes de sensores, procesar la lógica programada y activar las salidas correspondientes hacia los actuadores. De esta manera, el PLC permite integrar medición, decisión y actuación dentro de una misma plataforma industrial.

En la Figura 2 se representa la interacción básica entre proceso físico, sensores, PLC y actuadores. Este esquema resume el principio de funcionamiento de un sistema de control industrial, donde el estado del proceso es medido, evaluado por el controlador y corregido mediante acciones sobre válvulas, motores, compuertas o sistemas hidráulicos.

La programación de PLC se encuentra normalizada por la IEC 61131-3, la cual define lenguajes como diagrama de escalera, bloques de función, texto estructurado y diagrama funcional secuencial (PLCopen, 2025). Esta normalización facilita la organización modular de la lógica, su documentación y el mantenimiento posterior del sistema.

Figura 2

Arquitectura lógica del sistema de control basado en PLC.



2.2.5 Interfaz HMI para supervisión local

La interfaz hombre-máquina, o HMI, es el medio mediante el cual el operador interactúa con el sistema automatizado. Su función es presentar información del proceso de forma clara y ordenada, permitiendo visualizar variables, estados de equipos, alarmas, tendencias y parámetros operativos.

Una HMI industrial debe diferenciar las funciones de visualización, mando, configuración y alarmas. Además, el acceso a parámetros críticos debe restringirse mediante perfiles o niveles de usuario, con el fin de evitar modificaciones no autorizadas sobre consignas, límites o tiempos de operación. Esta separación contribuye a una operación más segura, trazable y coherente con la filosofía de control definida.

2.2.6 Estrategias de control regulatorio

El control regulatorio se emplea cuando una variable debe mantenerse cercana a un valor de referencia. En digestores, la temperatura puede regularse mediante un controlador que actúe sobre la apertura de una válvula de vapor, reduciendo el error entre la temperatura medida y la consigna establecida (Ogata, 2010).

Cuando la acción de control no requiere una regulación continua, pueden emplearse estrategias por bandas o histéresis. Este tipo de control permite mantener una variable dentro de un intervalo operativo y evitar conmutaciones excesivas. En el prensado, la corriente del motor puede utilizarse como una referencia indirecta de carga mecánica para accionar el sistema hidráulico dentro de límites definidos (Yosri et al., 2019).

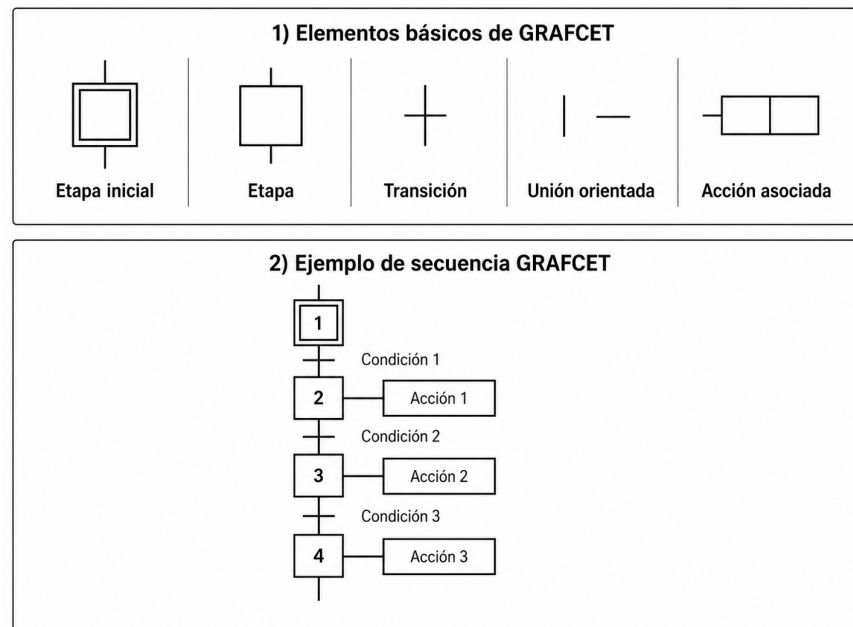
2.2.7 Estrategias de control secuencial

Además del control regulatorio, el proceso requiere control secuencial para coordinar etapas como alimentación, digestión, descarga, prensado, limpieza y parada. GRAFCET permite representar estas secuencias mediante etapas, transiciones y acciones, convirtiendo la lógica operativa en una estructura formal, documentada y verificable antes de su implementación en PLC (International Electrotechnical Commission, 2013).

En un GRAFCET, una etapa representa un estado del proceso; una transición define la condición lógica que permite avanzar hacia la siguiente etapa; y una acción corresponde a la operación ejecutada mientras una etapa se encuentra activa. La Figura 3 presenta los elementos básicos de esta representación.

Figura 3

Elementos básicos de secuencia GRAFCET.



Finalmente, los interlocks son condiciones lógicas que impiden acciones no permitidas cuando no se cumplen requisitos mínimos de operación o seguridad. Su función es proteger equipos, evitar maniobras contradictorias y reducir riesgos para el personal. En una arquitectura PLC-HMI, estos interlocks deben ejecutarse en el PLC y mantenerse activos tanto en operación automática como durante intervenciones manuales supervisadas desde la HMI.

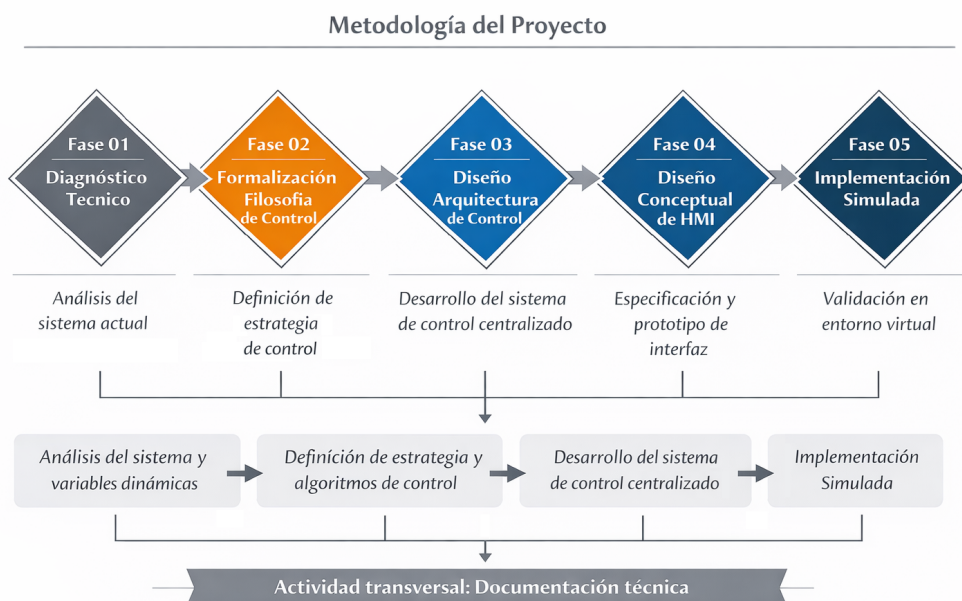
3. Desarrollo de la solución

El desarrollo de ARCODIP se abordó como un proceso de diseño progresivo orientado a transformar la operación observada en planta en una arquitectura de control PLC-HMI estructurada, documentada y verificable. La solución no se planteó como una implementación física inmediata, sino como una base de ingeniería para centralizar la lógica de operación del área de digestión y prensado, conservar la posibilidad de intervención manual y validar funcionalmente el comportamiento del sistema en un entorno virtual.

La Figura 4 resume la metodología seguida. El proceso se organizó en cinco fases: diagnóstico técnico, formalización de la filosofía de control, diseño de la arquitectura PLC-HMI, diseño de la interfaz HMI e implementación simulada. La documentación técnica se desarrolló como actividad transversal, con el fin de registrar criterios de análisis, decisiones de diseño y evidencias de validación.

Figura 4

Flujo metodológico del proyecto ARCODIP.



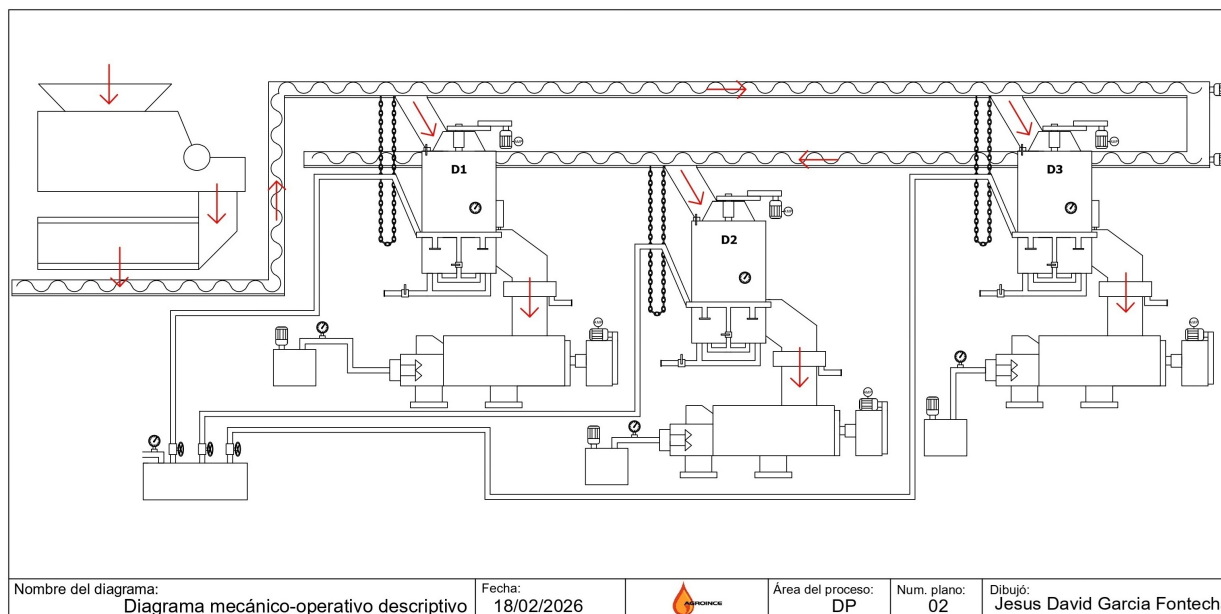
Las fases iniciales permitieron caracterizar el proceso real, identificar las variables críticas y formalizar una filosofía de control coherente con la operación de la planta. Posteriormente, estas decisiones se llevaron a una arquitectura desarrollada en TIA Portal, compuesta por lógica de control, secuencias GRAFCET, alarmas, interlocks, pantallas HMI y pruebas funcionales mediante PLCSIM. Los informes técnicos de avance y el proyecto desarrollado en TIA Portal se relacionan como soporte en los apéndices A y B del trabajo.

3.1 Caracterización del sistema actual y reto de automatización

El diagnóstico del área de digestión y prensado permitió delimitar los equipos y funciones incluidas en el alcance del proyecto. La Figura 5 presenta los equipos considerados durante esta etapa.

Figura 5

Equipos del área de digestión y prensado considerados en el alcance del proyecto.



La caracterización evidenció que el proceso opera bajo una condición mixta. Los digestores dependen principalmente de maniobras manuales para alimentación, regulación de vapor y

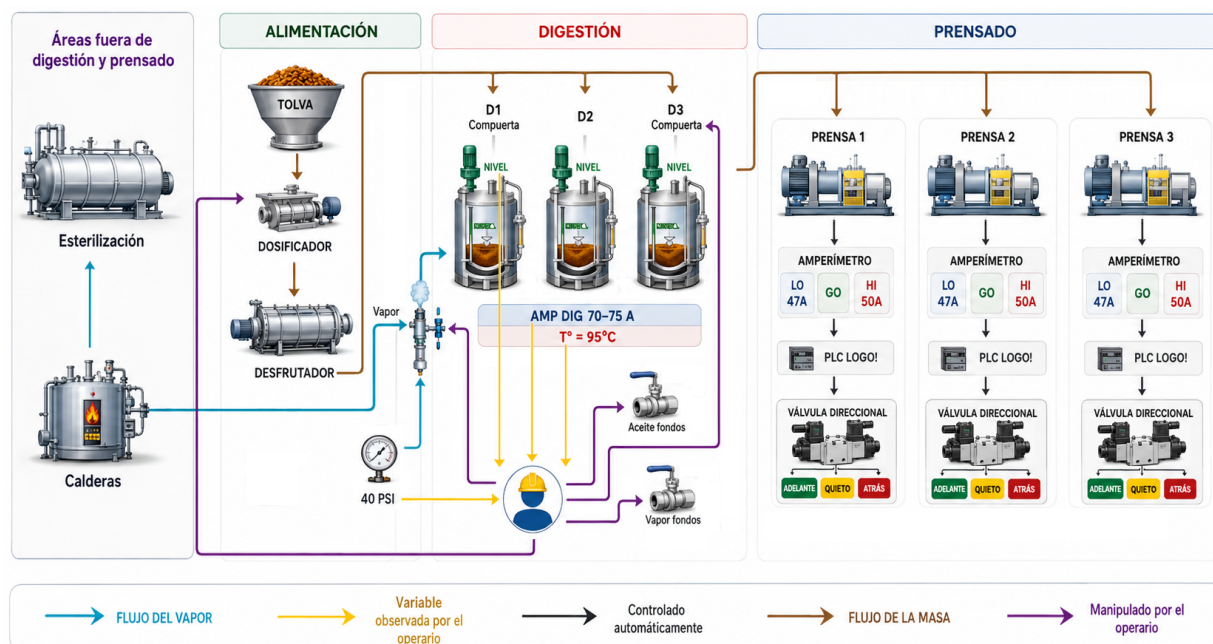
descarga, mientras que las prensas cuentan con control automático local basado en corriente de motor. Esta condición permite sostener la producción, pero limita la integración de variables, la trazabilidad de eventos y la estandarización de criterios operativos.

El diagnóstico también permitió diferenciar las líneas principales de producción y la línea auxiliar del área. Aunque la Figura 5 muestra los tres digestores del área, el alcance de automatización de lazos de control se concentró en D1 y D3, por corresponder a las líneas principales de operación. El digestor D2 se mantiene como línea auxiliar o de contingencia; por tanto, en esta versión de ARCODIP solo se contempla su supervisión de variables y estados, dejando su automatización completa como una expansión futura.

La Figura 6 resume la condición actual del proceso, incluyendo el flujo de material, las líneas de vapor, las variables observadas y los puntos donde la operación se realiza de forma manual o automática.

Figura 6

Diagrama del proceso actual del área de digestión y prensado.



A partir del diagnóstico, los hallazgos se organizaron según las tres secciones funcionales del área: alimentación, digestión y prensado. Esta separación permite relacionar de forma más clara la condición actual del proceso con los criterios adoptados en la arquitectura PLC-HMI.

Tabla 1

Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de alimentación

Elemento	Evidencia del diagnóstico	Criterio adoptado en ARCODIP
Tolva y alimentador de fruto	Después de la esterilización, el fruto es transportado hacia una tolva elevada que actúa como pulmón de alimentación. Desde allí, el alimentador dosifica el fruto hacia el desfrutador mediante tres velocidades discretas asociadas al variador de frecuencia. La velocidad se selecciona según la cantidad de digestores habilitados por el operador y las señales discretas de lleno.	Centralizar en el PLC la habilitación de digestores, la lectura de señales discretas de lleno, la selección automática de velocidad del alimentador y los permisos de alimentación, manteniendo la supervisión desde HMI.
Compuertas de alimentación a digestores	Después del desfrutado, el fruto separado de la tusa es transportado por sinfines hacia los digestores. La distribución final se realiza actualmente mediante compuertas manuales ubicadas en los conductos de alimentación hacia cada digestor, lo que permite dirigir o restringir el ingreso de fruto según la operación definida por el operador.	Automatizar el mando de las compuertas de alimentación hacia cada digestor, de forma que la distribución de fruto responda a la disponibilidad de digestores, señales de lleno, permisos de operación e interlocks definidos en el PLC.

Tabla 2

Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de digestión

Elemento	Evidencia del diagnóstico	Criterio adoptado en ARCODIP
Temperatura del digestor	Cada digestor cuenta con un indicador local de temperatura instalado en el cuerpo del equipo. La regulación térmica se realiza manualmente mediante la apertura de la válvula de vapor correspondiente. Debido a esta condición, la estabilidad de temperatura depende de la vigilancia continua del operador y pueden presentarse desviaciones o picos durante el turno, especialmente cuando el operador atiende otras labores o cambia la presión de vapor disponible.	Diseñar un lazo cerrado de control de temperatura, en el cual el PLC compare la temperatura medida con la consigna de operación y ajuste la apertura de la válvula de vapor para reducir desviaciones térmicas y mantener más estable el acondicionamiento del fruto.

Continúa en la siguiente página

Tabla 2*Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de digestión (continuación)*

Elemento	Evidencia del diagnóstico	Criterio adoptado en ARCODIP
Presión de vapor al área	El vapor proveniente de calderas llega a un distribuidor del área de digestión y desde allí se reparte hacia cada digestor. La presión disponible puede disminuir cuando otras áreas, como esterilización, demandan vapor, o aumentar cuando dicha demanda se reduce. Esta presión no se controla directamente desde el área de digestión y prensado.	Supervisar la presión de vapor disponible en el distribuidor e incorporar señalización de presión baja y presión alta mediante pilotos o alarmas en HMI, para que el operador identifique desviaciones y coordine con calderas la regulación dentro de una banda aceptable.
Carga mecánica del digestor	La corriente del motor se usa como referencia operativa de carga mecánica. En la operación actual, cuando la corriente aumenta, el operador puede cerrar parcialmente la válvula de aceite de fondos. Al reducir el drenaje, se retiene mayor cantidad de aceite libre dentro del digestor, lo que modifica la condición reológica de la masa y puede disminuir el esfuerzo requerido por las paletas del agitador.	Supervisar la corriente desde el PLC y aplicar una ley por bandas sobre la válvula de aceite de fondos, manteniendo la mayor apertura posible para favorecer el drenaje y reduciéndola progresivamente cuando la corriente indique aumento de carga mecánica.
Vapor por fondos del digestor	El digestor cuenta con una línea de vapor por fondos utilizada para limpieza interna y apoyo operativo cuando se presenta acumulación de masa o aumento de carga sobre el agitador. En la operación actual, esta acción depende del criterio del operador o de rutinas de limpieza definidas durante el turno.	Incorporar la válvula de vapor por fondos dentro de la lógica del PLC, habilitando su activación por limpieza programada cada 3 horas y como acción de apoyo ante condiciones de sobrecarga del agitador.
Descarga hacia prensas	Durante el arranque, el digestor se llena y realiza una maceración inicial durante un tiempo definido por el supervisor. Finalizado este tiempo, se habilita la apertura de la compuerta del pantalón de descarga para transferir masa digerida hacia la prensa. Esta apertura debe depender de que la prensa correspondiente se encuentre encendida, disponible y sin fallas, con el fin de evitar atascamientos o alimentación indebida.	Condicionar la descarga mediante una secuencia e interlocks en el PLC, verificando tiempo de maceración cumplido, prensa disponible, ausencia de fallas críticas y permisos de operación antes de abrir la compuerta de transferencia hacia la prensa.

Tabla 3*Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de prensado*

Elemento	Evidencia del diagnóstico	Criterio adoptado en ARCODIP
Medición de corriente	La corriente del motor de cada prensa llega a un amperímetro digital con límites configurables HI y LO. A partir de estos límites, el amperímetro activa salidas por relés internos que indican si la corriente está por debajo del valor LO, por encima del valor HI o dentro de la banda definida.	Incorporar la corriente de prensa como variable de supervisión dentro de la arquitectura PLC-HMI, manteniendo los límites de operación definidos para identificar baja carga, zona de trabajo y sobrecarga.

Continúa en la siguiente página

Tabla 3*Diagnóstico técnico y criterios adoptados en el sistema de prensado (continuación)*

Elemento	Evidencia del diagnóstico	Criterio adoptado en ARCODIP
Control local de prensas	Las señales digitales generadas por el amperímetro ingresan a un PLC Siemens LOGO!, el cual ordena el avance o retroceso del cono hidráulico para mantener la corriente del motor en una zona de banda muerta. La señal analógica de corriente no llega directamente al LOGO!, sino que este recibe estados discretos desde el amperímetro.	Conservar el criterio operativo de control por histéresis, pero centralizar en el PLC principal la lógica de avance, reposo y retroceso del cono hidráulico a partir de la señal analógica de corriente del motor. La lógica queda integrada con estados de prensa, alarmas, permisos e interlocks.
Presión hidráulica	La presión hidráulica no se controla automáticamente desde el sistema actual. Su verificación se realiza de forma manual mediante registros periódicos, aproximadamente cada dos horas.	Incorporar la presión hidráulica como variable supervisada en el PLC y visualizada en HMI, sin plantearla como variable manipulada.
Disponibilidad hidráulica	La verificación periódica de presión permite confirmar que el sistema hidráulico dispone de presión suficiente para accionar el avance y retroceso del cono y ejercer presión sobre la masa dentro de la prensa.	Usar la supervisión de presión hidráulica para apoyar la detección de condiciones anormales y confirmar la disponibilidad del sistema hidráulico para la operación de prensado.

Nota. Las Tablas 1, 2 y 3 sintetizan el levantamiento técnico realizado en planta y documentado en el informe de avance de la Fase 1.

3.2 Filosofía de control definida

A partir del diagnóstico, la operación observada se transformó en una filosofía de control organizada en tres niveles: campo, control y supervisión local. En esta estructura, los sensores y actuadores conforman el nivel de campo; el PLC concentra la lógica de decisión, secuencias, alarmas e interlocks; y la HMI actúa como medio de supervisión y mando autorizado.

Los criterios operativos presentados en la Tabla 4 fueron definidos a partir del diagnóstico en planta, la observación del proceso, la orientación técnica del personal operativo y el criterio de los ingenieros de mantenimiento y producción de AGROINCE.

Tabla 4*Criterios operativos definidos para digestión y prensado*

Variable	Criterio definido	Función en la filosofía de control
Temperatura de digestor	90 °C	Mantener el acondicionamiento térmico del fruto mediante regulación automática de vapor.
Nivel de digestor	Lleno	Evitar operación con bajo nivel de masa y condicionar la alimentación del digestor.
Corriente motor digestor	< 50 A	Supervisar carga mecánica y activar acciones de limitación o protección ante sobrecarga.
Corriente motor prensa	47–50 A	Mantener la prensa en zona de esfuerzo operativo mediante control por histéresis.
Presión hidráulica	1000 PSI	Verificar disponibilidad del esfuerzo hidráulico requerido para el prensado.
Presión de vapor	40–60 PSI	Supervisar disponibilidad de energía térmica para calentamiento de digestores.

También se definieron tres formas de operación: manual local, automática y manual supervisada desde HMI. Esta separación permitió conservar la flexibilidad operativa del tablero físico, integrar funciones automáticas en el PLC y habilitar intervenciones parciales desde HMI sin desactivar completamente la arquitectura de supervisión y protección.

Tabla 5*Modos de operación definidos para ARCODIP*

Modo / condición	Fuente de mando	Resultado funcional
Manual local	Tablero de control	Permite maniobras cableadas/locales para mantenimiento, pruebas y contingencias, manteniendo las restricciones definidas por la planta.
Automático	PLC	Ejecuta secuencias, lazos de control, alarmas e interlocks del área de digestión y prensado.
Manual supervisado	HMI + PLC	Permite inhibir funciones automáticas específicas y ejecutar comandos desde HMI, manteniendo validaciones e interlocks en el PLC.

3.3 Arquitectura PLC-HMI desarrollada

Sobre la base de la filosofía de control establecida, se desarrolló en TIA Portal la arquitectura PLC-HMI como una estructura de control centralizada para el área de digestión y prensado. El

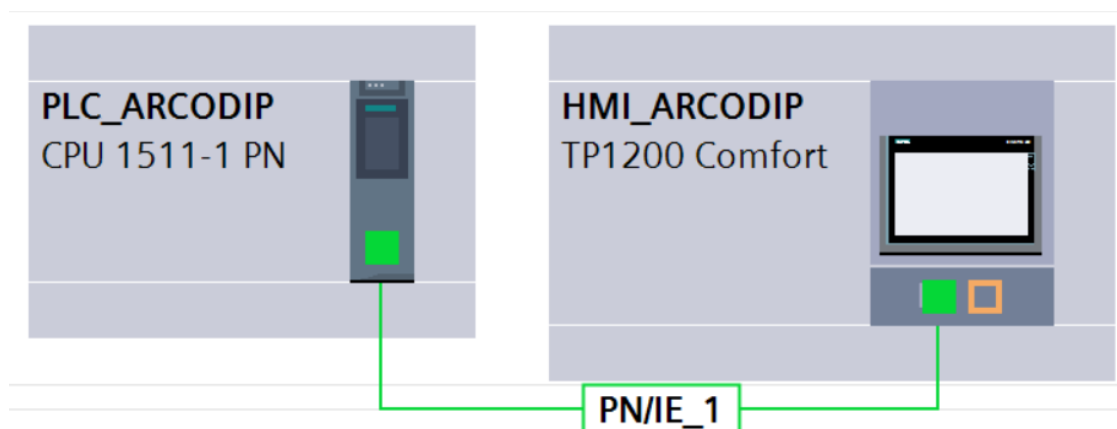
diseño se basó en un PLC Siemens S7-1500 CPU 1511-1 PN y una HMI TP1200 Comfort, elegidos como plataforma de control y supervisión local. La arquitectura no sólo se planteó como una selección de hardware, sino como la integración entre las señales de campo, los módulos de entrada/salida, los bloques funcionales de programación, la comunicación PLC-HMI y las pantallas de operación.

Desde el punto de vista funcional la arquitectura se estructuró en cuatro capas de ingeniería: adquisición de señales, procesamiento de control, acción sobre el proceso y supervisión local. En la primera capa, se reciben las señales analógicas y discretas, procedentes de digestores, prensas, alimentación, instrumentación y tablero. En la segunda capa el PLC ejecuta los bucles de control, secuencias, alarmas, permisos e interlocks. En la tercera capa se generan las acciones de salida hacia válvulas modulantes, compuertas, pilotos e hidráulicos. Por último, la HMI se encarga de concentrar la visualización de variables, estados y comandos de operación.

La Figura 7 muestra la red PLC-HMI configurada en TIA Portal. Esta red permitió establecer la comunicación entre la CPU y la interfaz HMI para el intercambio de variables de proceso, estados, setpoints, alarmas, inhibiciones y solicitudes de mando.

Figura 7

Configuración de la red PLC-HMI desarrollada en TIA Portal.



El dimensionamiento de la arquitectura se realizó a partir de la lista de señales definida para el área. Esta lista permitió determinar la cantidad de entradas y salidas requeridas para incorporar las variables del proceso. Como resultado se obtuvo la siguiente Tabla 6.

Tabla 6

Resumen general de señales de la arquitectura

Tipo de señal	Cantidad
Entradas analógicas (AI)	13
Salidas analógicas (AO)	6
Entradas digitales (DI)	33
Salidas digitales (DO)	29

Las entradas analógicas se reservaron para variables continuas del proceso, como temperatura de digestores, corriente de motores, presión de vapor y presión hidráulica. Las salidas analógicas se asignaron principalmente a elementos modulantes, como válvulas de vapor y válvulas de aceite de fondos. Por su parte, las entradas digitales permitieron incorporar señales de estado, disponibilidad, fallas, selectores, señales discretas de lleno y condiciones de operación. Las salidas digitales se destinaron a mandos discretos, señalización, compuertas y pilotos.

Con base en el conteo de señales se seleccionaron módulos de referencia para entradas y salidas digitales, señales analógicas y comunicación con HMI. La Tabla 7 presenta la configuración considerada para la arquitectura.

Además del dimensionamiento físico, la arquitectura requirió una organización software que permitiera separar funciones, facilitar pruebas y mantener trazabilidad entre señales, equipos y pantallas HMI. Para ello se estructuró el programa mediante bloques funcionales reutilizables. Esta decisión permitió agrupar la lógica según el tipo de equipo o función: digestores, prensas, distribución, secuencia principal, alarmas, comunicación con HMI e históricos.

Tabla 8

Bloques principales de la arquitectura software del PLC

Bloque	Función dentro del programa
Main	Bloque principal de ejecución cíclica. Coordina la llamada a todos los bloques funcionales del sistema.
OB_ControlPeriodico	Ejecuta de forma periódica y con tiempo de ciclo fijo los bloques de control del proceso. Se implementa fuera del OB1 para que los lazos de control no dependan del tiempo variable del ciclo principal del PLC.
FB_Digestor	Bloque reutilizable para el control de los digestores D1 y D3. Incluye control de temperatura, corriente, válvulas, nivel y estados.
FB_Prensa	Bloque reutilizable para el control de las prensas P1, P2 y P3. Incluye control por histéresis de corriente y sistema hidráulico.
FB_Distribucion	Gestiona la distribución de fruto entre digestores durante operación continua.
FB_SecuenciaPrincipal	Implementa la lógica GRAFCET de arranque, operación continua, parada y limpieza.
FB_Alarmas	Centraliza detección, clasificación y gestión de alarmas.
FB_HMI	Gestiona comandos, setpoints, inhibiciones, permisos y datos de interacción con el operador.
FB_Historicos	Organiza variables disponibles para tendencias y análisis operativo desde HMI.

La estructura del programa separa la lógica cíclica general de las funciones que requieren una base temporal más precisa. El bloque *Main* controla la ejecución principal del sistema, mientras que el bloque *OB_ControlPeriodico* está destinado a funciones de control que no deben depender únicamente del tiempo variable del ciclo principal. Esta organización es relevante para el lazo de temperatura, ya que el cálculo del controlador requiere una ejecución periódica para mantener la coherencia entre el tiempo de muestreo, la acción integral y la respuesta del actuador.

Los bloques *FB_Digestor* y *FB_Prensa* concentran la lógica asociada a los equipos princi-

pales del área. En los digestores se agrupan funciones de control de temperatura, supervisión de corriente, válvulas de vapor, válvulas de aceite de fondos, válvulas de vapor por fondos, señales de nivel, estados e inhibiciones. En las prensas se integra el control por histéresis de corriente, la lógica de avance y retroceso del cono hidráulico.

La lógica secuencial se separó de la lógica de control continuo, esta separación permite que los lazos de control regulatorio operen sobre variables continuas, mientras que las secuencias coordinan etapas, transiciones y acciones discretas del proceso. El bloque *FB_SecuenciaPrincipal* implementa la estructura GRAFCET general de arranque, operación continua, parada y limpieza, mientras que *FB_Distribucion* gestiona la alimentación de fruto hacia digestores según disponibilidad, señales de lleno y condiciones de operación.

El bloque *FB_Alarmas* centraliza la detección de condiciones anormales, evitando que cada pantalla HMI o cada bloque de equipo maneje alarmas de forma aislada. De esta manera, las alarmas pueden relacionarse con variables de proceso, estados de equipo, límites operativos e interlocks. Por su parte, el bloque *FB_HMI* funciona como capa de intercambio entre la interfaz y el programa del PLC recibiendo solicitudes del operador, setpoints e inhibiciones.

En conjunto, la arquitectura PLC-HMI desarrollada convierte el diagnóstico y la filosofía de control en una estructura técnica implementable: define el flujo de señales, dimensiona los módulos, organiza la comunicación PLC-HMI, separa la lógica por bloques funcionales y establece una base para validar el sistema por subsistemas antes de una futura implementación con hardware real.

3.4 Matriz causa–efecto e interlocks del sistema

La matriz causa–efecto se utilizó para relacionar las variables críticas del proceso con el tipo de respuesta esperada dentro de la arquitectura de control. Esta herramienta permitió conectar la filosofía de control con la lógica del PLC.

En este informe final se presenta una versión conceptual de la matriz, suficiente para evidenciar la lógica funcional del sistema. El desarrollo extendido de la matriz causa–efecto se

conserva en el informe técnico de avance de la Fase 3, disponible en el Apéndice A como parte de la documentación técnica de soporte para la empresa y para la continuidad del proyecto.

Tabla 9

Matriz causa–efecto de nivel conceptual

Variable o condición del proceso	Tipo de relación	Efecto conceptual en el sistema
Temperatura del digestor	Control automático	Regulación térmica del proceso de digestión.
Nivel del digestor	Secuencia	Condicionamiento de la alimentación según la señal discreta de lleno del digestor.
Corriente del motor del digestor	Control automático	Limitación de carga mecánica del digestor mediante acción sobre la válvula de fondos.
Vapor por fondos del digestor	Secuencia / protección	Activación condicionada por limpieza programada o apoyo ante sobrecarga del agitador.
Presión de vapor proveniente de calderas	Supervisión	Monitoreo de la disponibilidad energética para el proceso de calentamiento.
Corriente del motor de la prensa	Control automático	Control por histéresis del cono hidráulico según corriente del motor de prensa.
Presión hidráulica del sistema de prensas	Supervisión	Monitoreo de la condición del sistema hidráulico.
Equipo de transporte apagado	Protección (interlock)	Restricción de operación de equipos aguas abajo.
Sinfines de alimentación apagados	Protección (interlock)	Prevención de operación del digestor sin flujo de alimentación.
Motor de prensa apagado	Protección (interlock)	Bloqueo de ingreso de material a la prensa.
Digestores llenos	Protección (interlock)	Bloqueo de alimentación de fruto al sistema.
Motor del digestor apagado	Protección (interlock)	Bloqueo de ingreso de material al digestor.
Sistema en proceso de parada	Protección (interlock)	Restricción de arranque de equipos de alimentación de fruto.

Esta matriz permitió definir de forma ordenada qué condiciones serían tratadas como control automático, cuáles serían supervisadas y cuáles actuarían como restricciones de operación.

3.5 Estrategias de control implementadas

La arquitectura integró tres tipos de lógica: control regulatorio para temperatura, control discreto por bandas para carga en digestores y control por histéresis para prensas. Esta combinación respondió al comportamiento físico del proceso y a la operación actual.

3.5.1 Control de temperatura en digestores

Para implementar el control en lazo cerrado se caracterizó la dinámica térmica del digestor mediante una prueba de escalón aplicada a la válvula de vapor. La prueba se realizó con el digestor

lleno, comenzando con la válvula completamente cerrada y luego abriéndola al 100 %. Durante el ensayo, la presión de vapor se mantuvo aproximadamente constante para minimizar su influencia en la identificación del proceso. Los datos de apertura de válvula y temperatura fueron analizados en MATLAB usando la herramienta *System Identification*, con un tiempo de muestreo de 5 segundos.

El comportamiento observado correspondió a un sistema térmico lento, sin oscilaciones notables y con predominio de una dinámica de primer orden. Por ello, el proceso se modeló inicialmente como un sistema de primer orden con retardo. El modelo identificado fue:

$$G_{id}(s) = \frac{1.1148}{543.05s + 1} e^{-0.505s} \quad (1)$$

Aunque este modelo presentó un ajuste aproximado del 85.98 % respecto a los datos experimentales, al implementarlo en simulación se observó que su ganancia sobreestimaba la respuesta térmica del digestor. En particular, el modelo reproducía correctamente la forma de la curva de calentamiento, pero no el valor final alcanzado por la temperatura. Según los datos experimentales, la apertura de la válvula cambió de 0 % a 100 %, mientras que la temperatura varió aproximadamente de 85 °C a 110 °C. Por tanto, la ganancia física del proceso se ajustó según:

$$K_{real} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{110 - 85}{100 - 0} = 0.25 \quad (2)$$

Con esta corrección se mantuvieron la constante de tiempo y el retardo identificados, pero se ajustó la relación entrada-salida del modelo. Por lo tanto, el modelo empleado para el diseño del controlador fue:

$$G_p(s) = \frac{0.25}{543.05s + 1} e^{-0.505s} \quad (3)$$

Dado que el retardo identificado es pequeño frente a la constante de tiempo del proceso, este se despreció en el diseño inicial del controlador. Para el ajuste se establecieron como criterios

de diseño un sobreimpulso nulo ($M_p = 0$) y un tiempo de establecimiento de $t_s = 300$ s, valor coherente con la dinámica térmica observada en planta. La especificación de sobreimpulso nulo se asoció a un comportamiento críticamente amortiguado, con $\zeta \approx 1$. A partir de la relación $t_s = 4/(\zeta\omega_n)$, se obtuvo:

$$\omega_n = 0.01333 \text{ rad/s} \quad (4)$$

Por tanto, el polinomio característico deseado quedó definido como:

$$s^2 + 0.02666s + 0.0001778 \quad (5)$$

Inicialmente se evaluó un controlador proporcional. En este caso, el sistema en lazo cerrado se mantiene como un sistema de primer orden, por lo que el ajuste se realizó con base en el tiempo de establecimiento. El valor obtenido fue $K_p = 24.96$. Sin embargo, aunque la respuesta fue estable y sin sobreimpulso, el controlador proporcional presentó error en estado estacionario, lo que limita su uso cuando se requiere mantener la temperatura del digestor en una consigna definida.

Posteriormente se diseñó un controlador proporcional–integral, cuya forma general es:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

Para el modelo ajustado del digestor, la función de transferencia de lazo cerrado con controlador PI conduce al denominador normalizado:

$$s^2 + \frac{1 + 0.25K_p}{543.05}s + \frac{0.25K_i}{543.05} \quad (7)$$

Al igualar este denominador con el polinomio característico deseado de la Ecuación 5, se obtuvieron los parámetros:

$$K_p = 53.93 \quad K_i = 0.3862 \quad (8)$$

El controlador PI permitió eliminar el error en estado estacionario y alcanzar la referencia de 90 °C en condiciones ideales. Sin embargo, al considerar la saturación física de la válvula de vapor, definida entre 0 % y 100 %, se observó acumulación de la acción integral durante los periodos en que el actuador permanecía saturado. Este fenómeno, conocido como *windup*, provoca sobreimpulso y una recuperación lenta cuando la señal de control regresa a la región no saturada.

Para mitigar este comportamiento se seleccionó una estrategia anti-windup por *clamping*, en la cual se detiene la integración cuando la salida del controlador se encuentra saturada y el término integral tiende a seguir aumentando en la misma dirección. Esta decisión permite conservar la ventaja del PI para eliminar error permanente, sin permitir que la acción integral acumule valores no realizables por la válvula.

También se evaluó una alternativa basada en controlador proporcional con sesgo U_{bias} , expresada como:

$$u(t) = K_p e(t) + U_{bias} \quad (9)$$

El valor $U_{bias} = 40$ % representa una apertura base de la válvula asociada al punto de operación requerido para mantener la temperatura cercana a 90 °C. Esta alternativa permitió compensar el error estacionario del controlador proporcional en condiciones nominales. Sin embargo, ante perturbaciones sostenidas, el controlador PI con anti-windup mostró mejor capacidad de retorno exacto al setpoint, mientras que el controlador proporcional con U_{bias} conservó error permanente.

Las perturbaciones consideradas representan condiciones propias del proceso, como variaciones en la presión de vapor, fluctuaciones del flujo de vapor por demanda de otras áreas, cambios en el nivel de masa dentro del digestor e ingreso de fruto a diferente temperatura. Por esta razón,

se seleccionó como estrategia final el controlador PI con anti-windup, ya que ofrece mejor rechazo de perturbaciones y mantiene la temperatura en la consigna definida. La Tabla 10 resume los parámetros finales del lazo de temperatura.

Tabla 10

Resultado del diseño del controlador de temperatura

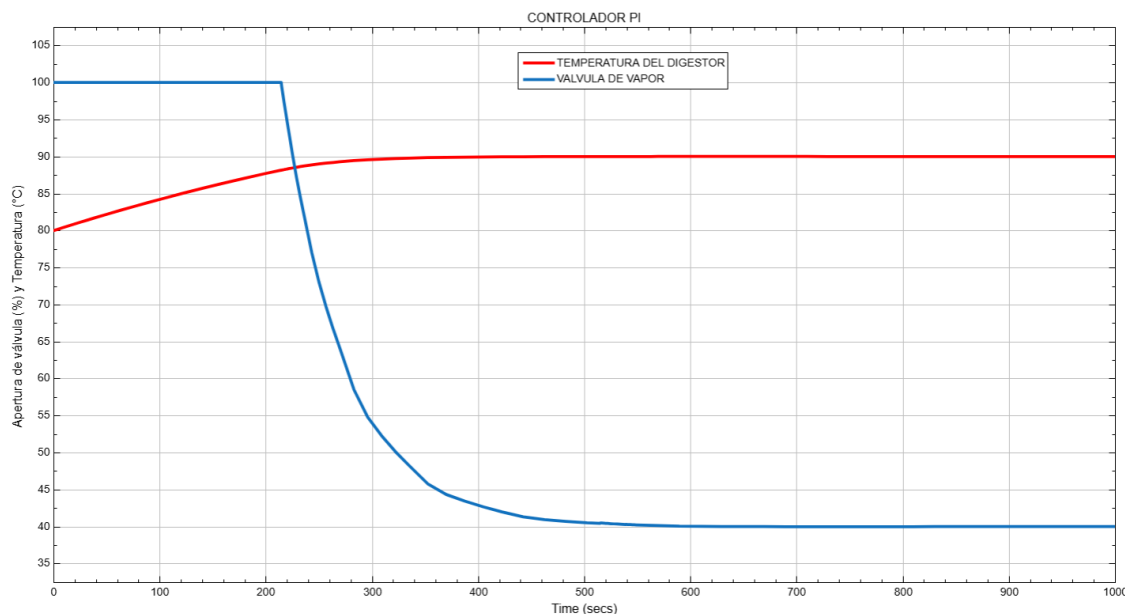
Parámetro	Valor definido
Modelo ajustado	$\frac{0.25}{543.05s+1} e^{-0.505s}$
Tipo de controlador seleccionado	PI con anti-windup
K_p del controlador PI	53.93
K_i del controlador PI	0.3862
Sobreimpulso deseado	$M_p = 0$
Tiempo de establecimiento de diseño	$t_s = 300$ s
Saturación del actuador	$0\% \leq u(t) \leq 100\%$
Arranque térmico	$T < 80\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow u = 100\%$

La implementación propuesta funciona en dos etapas. Durante el calentamiento inicial, cuando $T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, la válvula de vapor se mantiene completamente abierta para acelerar el acondicionamiento térmico. Una vez la temperatura alcanza $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, se activa el control automático mediante PI con anti-windup. Esta transición evita exigir regulación al controlador durante la etapa en la que el actuador debe permanecer saturado por requerimiento del proceso.

La Figura 9 muestra la respuesta simulada del controlador PI seleccionado. La estrategia permite aproximar la temperatura a la referencia considerando las restricciones de saturación del actuador, evitando que la señal de control solicite aperturas fuera del rango físico permitido para la válvula.

Figura 9

Respuesta simulada del controlador PI de temperatura del digestor.

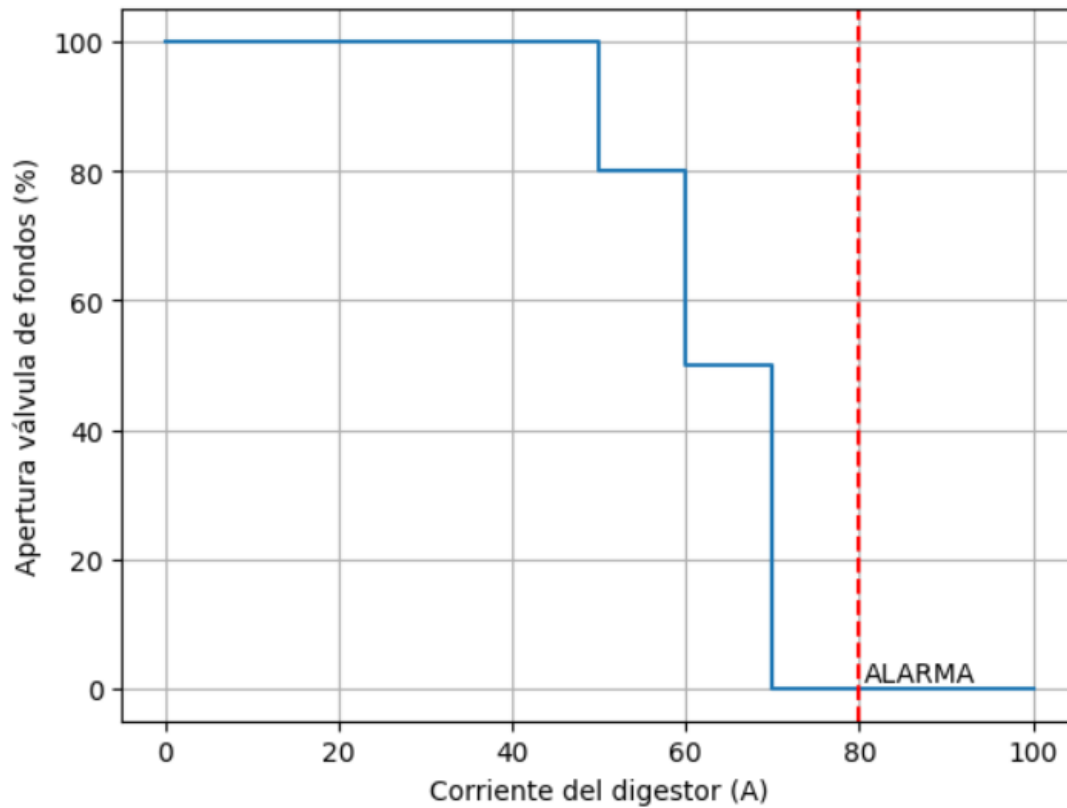


3.5.2 Control de carga en digestores

La corriente del motor del digestor se empleó como indicador indirecto de carga mecánica del equipo. Para esta variable no se planteó un control PID, debido a que el objetivo de la válvula de fondos no es regular la corriente alrededor de un setpoint fijo, sino favorecer el drenaje de aceite manteniendo la válvula con la mayor apertura posible mientras la corriente del motor permanezca dentro de un rango seguro de operación. En la operación actual, este criterio es aplicado por el operador mediante cierres progresivos de la válvula cuando la corriente aumenta. Además, la corriente del digestor presenta oscilaciones propias del comportamiento mecánico de la masa procesada, por lo que una acción continua de control podría generar ajustes innecesarios o inestables. Por esta razón, se definió una ley de control por bandas, presentada en la Figura 10, que conserva la lógica operativa existente y la formaliza dentro de la arquitectura PLC-HMI.

Figura 10

Ley de control por bandas para la válvula de fondos del digestor.

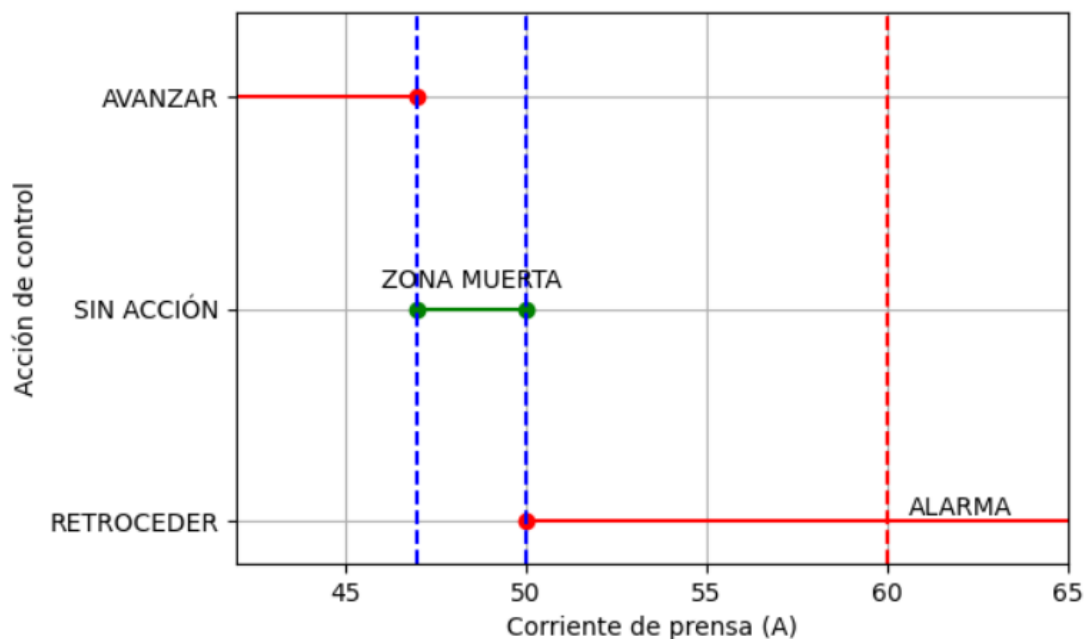


3.5.3 Control por histéresis en prensas

Para las prensas se mantuvo el criterio operativo basado en corriente, pero la decisión de avance, reposo o retroceso se centraliza en el PLC principal a partir de la señal analógica de corriente del motor. La decisión de conservar una estrategia por histéresis se justificó por la necesidad de evitar conmutaciones continuas del sistema hidráulico y por la robustez de este criterio frente a variaciones de carga. La Figura 11 muestra la zona muerta de operación. Por debajo de 47 A se ordena avanzar el cono, por encima de 50 A se ordena retroceder y a partir de 60 A se genera alarma por sobrecorriente.

Figura 11

Control por histéresis para el sistema hidráulico de prensas.



3.6 Control secuencial mediante GRAFCET

El control secuencial se modeló mediante GRAFCET para representar la operación del área en etapas, transiciones y acciones. Esta metodología permitió formalizar la lógica de arranque, operación continua, distribución de fruto, transferencia digestor–prensa, parada y limpieza antes de llevarla a la programación del PLC.

En este informe final se presenta la síntesis funcional de las secuencias desarrolladas, mientras que el GRAFCET principal se incluye en el Apéndice C debido a su extensión gráfica. Las secuencias complementarias y su desarrollo detallado se conservan en el informe técnico de avance de la Fase 3, disponible en el Apéndice A, como documentación técnica extendida para la empresa y para futuros trabajos de continuidad. La Tabla 11 resume las secuencias desarrolladas dentro de la arquitectura de control.

Tabla 11*Secuencias GRAFCET desarrolladas*

Secuencia	Función principal
GRAFCET principal	Coordina los estados generales del sistema: espera, arranque, operación continua, parada controlada y limpieza.
Digestor–Prensa	Gestiona la transferencia de masa digerida hacia prensas y la entrada de cada línea a operación continua.
Alimentación continua	Controla la alimentación hacia digestores activos según nivel, disponibilidad de línea y condiciones de operación.
Arranque L1 / Arranque L3	Permite incorporar una línea inactiva durante operación continua sin detener la línea que ya se encuentra en servicio.
Distribución 1	Alterna la alimentación cuando existe al menos un digestor lleno y prioriza la estabilidad de nivel entre líneas.
Distribución 2	Recupera progresivamente el nivel cuando ambos digestores se encuentran sin condición de lleno.

Nota. Las secuencias GRAFCET formalizan la operación discreta del proceso y permiten trasladar la lógica operativa a una estructura verificable en PLC.

La representación mediante GRAFCET permitió reducir ambigüedad en la transición entre estados del proceso y definir condiciones de avance asociadas a disponibilidad de equipos, niveles de digestores, estado de prensas, comandos de operación e interlocks. Con ello, la lógica secuencial quedó documentada antes de su implementación en TIA Portal.

3.7 Interfaz HMI desarrollada

La interfaz HMI se programó en TIA Portal como capa de visualización, configuración limitada y mando supervisado. Su integración con el PLC se realizó mediante variables compartidas: la HMI presenta estados y mediciones procesadas por el controlador, y envía solicitudes de operación al bloque FB_HMI para su validación.

Dentro del alcance del proyecto se implementaron tres pantallas funcionales y se definieron a nivel conceptual las pantallas de alarmas, históricos y configuración, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12*Pantallas HMI y relación funcional con la arquitectura PLC*

Pantalla	Estado	Función dentro de la arquitectura PLC-HMI
Supervisión principal	Implementada en TIA Portal	Presenta las variables críticas del área, como temperatura, corriente, presión y estados generales del proceso. La información visualizada proviene de variables procesadas por el PLC y permite al operador identificar la condición operativa de digestores y prensas.
Mímico ARCODIP	Implementada en TIA Portal	Representa gráficamente la relación entre alimentación, digestores, prensas, válvulas, compuertas y estados de línea. Su propósito es mostrar la condición lógica del proceso de forma integrada, facilitando la lectura operativa del área desde una sola vista.
Control manual HMI	Implementada en TIA Portal	Permite solicitar acciones manuales supervisadas sobre actuadores seleccionados, como válvulas, compuertas o comandos asociados a prensas. Estas acciones no se ejecutan directamente desde la pantalla, sino que son enviadas al PLC para validación de permisos, estados e interlocks.
Alarmas	Conceptual	Centraliza eventos, fallas y condiciones anormales detectadas por el PLC, diferenciando alarmas de proceso, alarmas de equipo y restricciones de operación.
Tendencias e históricos	Conceptual	Permite representar variables críticas en el tiempo, como temperatura, corriente y presión, con el fin de apoyar análisis operativo, trazabilidad y mantenimiento.
Configuración	Conceptual	Permite ajustar parámetros autorizados, como setpoints, límites de alarma, bandas de operación y tiempos de secuencia, bajo criterios de acceso y validación definidos en el PLC.

La pantalla de supervisión principal se diseñó como vista de consulta rápida del estado del área. Esta pantalla agrupa las variables que requieren seguimiento frecuente durante la operación, para que el operador tenga una visión de las condiciones térmicas y eléctricas sin depender exclusivamente de la consulta de indicadores locales. Esta pantalla sirve para el diagnóstico operativo, ya que permite reconocer desviaciones de temperatura, sobrecarga de motores, pérdida de presión o condiciones anormales del proceso.

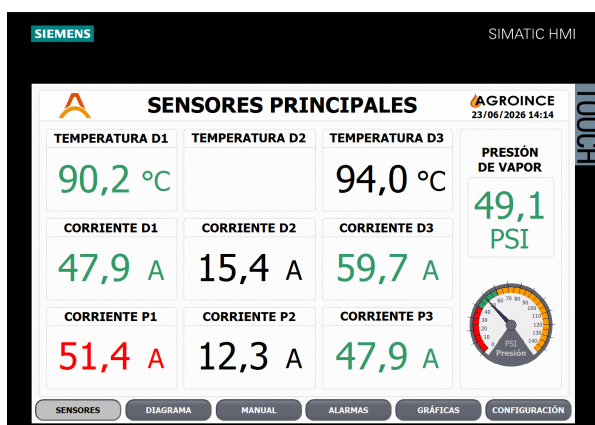
El mímico ARCODIP se desarrolló como representación operativa del proceso. Esta pantalla representa visualmente los equipos incluidos en el alcance y permite interpretar el flujo de operación entre alimentación, digestión y prensado. A diferencia de una pantalla compuesta solo de valores

numéricos, el mímico permite ver fácilmente qué línea está habilitada, qué equipo está disponible y qué actuador está en una determinada condición.

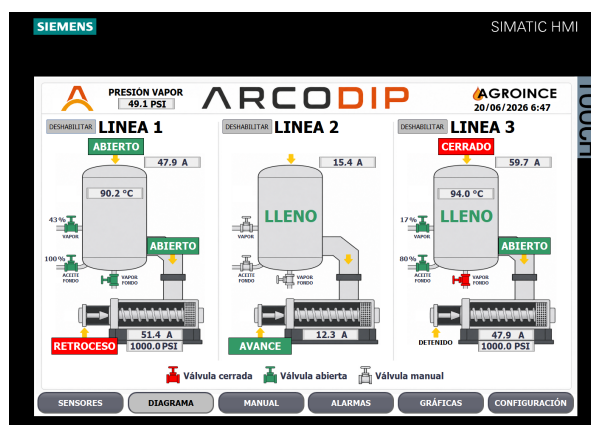
La pantalla de control manual supervisado se planteó para permitir intervención del operador desde HMI. En esta vista, los botones de mando no se vinculan directamente a salidas físicas, sino a variables de solicitud que el PLC valida antes de ejecutar la acción correspondiente. La Figura 12 presenta las pantallas implementadas.

Figura 12

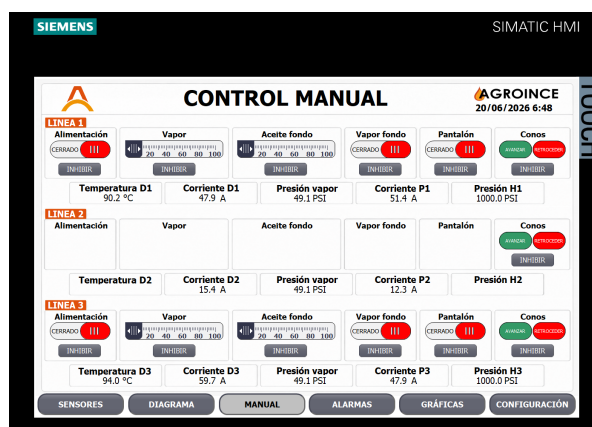
Pantallas HMI implementadas en TIA Portal.



(a) supervisión principal de variables



(b) mímico del proceso ARCODIP



(c) control manual supervisado desde HMI

3.8 Validación funcional en simulación

La validación funcional se realizó en TIA Portal mediante PLCSIM, utilizando la CPU 1511-1 PN configurada en el proyecto. Las pruebas se enfocaron en verificar las funciones principales implementadas: control de temperatura, control por bandas de corriente en digestores, vapor por fondos, control por histéresis en prensas, secuencia de distribución, cambio de velocidad del alimentador y señalización por presión de vapor.

A diferencia de una puesta en marcha industrial, esta validación no mide desempeño real en planta. Su propósito fue verificar coherencia lógica, respuesta ante condiciones simuladas y cumplimiento de criterios funcionales dentro del alcance académico del proyecto.

Las condiciones de prueba se generaron mediante modificación de variables simuladas en PLCSIM y observación de la respuesta lógica en el PLC y la HMI.

Tabla 13

Resultados de validación funcional en simulación

Prueba validada	Condición simulada	Criterio de aceptación	Resultado obtenido
Control de temperatura	Variación de temperatura respecto al setpoint.	La válvula debe actuar entre 0–100 % y corregir el error hacia la referencia.	El controlador PI modificó la apertura de la válvula dentro del rango permitido.
Control por bandas del digestor	Incremento simulado de corriente en los rangos definidos.	La válvula de fondos debe cambiar de apertura según la banda de corriente.	La válvula modificó su apertura y generó condición de protección ante alta corriente.
Vapor por fondos del digestor	Cumplimiento del tiempo de limpieza programada y condición simulada de sobrecarga del agitador.	La válvula de vapor por fondos debe activarse por temporización de limpieza cada 3 horas o como apoyo ante sobrecarga.	La lógica activó la inyección de vapor por fondos ante la temporización definida y ante la condición simulada de sobrecarga.
Histéresis de prensa	Corriente simulada por debajo, dentro y por encima de 47–50 A.	Los conos deben avanzar, permanecer sin acción o retroceder según la zona de operación.	El sistema ordenó avance, reposo o retroceso de los conos según la corriente simulada.
Secuencia de distribución	Cambios simulados en nivel y disponibilidad de digestores.	La alimentación debe alternar únicamente cuando se cumplan las condiciones programadas.	La lógica secuencial alternó alimentación y bloqueó avances no permitidos.

Continúa en la siguiente página

Tabla 13*Resultados de validación funcional en simulación (continuación)*

Prueba validada	Condición simulada	Criterio de aceptación	Resultado obtenido
Velocidad del alimentador de fruto	Cambios simulados en digestores habilitados y señales discretas de lleno/no lleno.	El alimentador debe ajustar su velocidad según la cantidad de digestores habilitados y disponibles para recibir fruto: velocidad 0 si todos están llenos, y velocidades 40, 50 o 60 según la demanda de llenado.	El sistema modificó la velocidad del alimentador/dosificador de acuerdo con el número de digestores disponibles y bloqueó la alimentación cuando todos se encontraban llenos.
Pilotos de presión de vapor	Presión simulada por debajo y por encima de los límites.	El tablero debe señalar vapor bajo o vapor alto según el umbral configurado.	El sistema activó la señalización correspondiente a cada condición.

Los resultados de simulación permitieron comprobar que las acciones automáticas permanecen condicionadas por las variables simuladas, los rangos de operación y las condiciones lógicas programadas en el PLC.

4. Conclusiones

- El desarrollo de ARCODIP permitió evidenciar que el área de digestión y prensado de AGROINCE presenta una oportunidad clara de centralización del control, no porque el proceso actual sea inoperante, sino porque su lógica se encuentra distribuida entre manio-
bras manuales, supervisión local y controladores independientes. Este hallazgo confirmó la pertinencia de diseñar una arquitectura PLC-HMI orientada a integrar señales, modos de operación, alarmas, interlocks y criterios de supervisión bajo una misma estructura funcional.
- El diagnóstico técnico mostró un patrón recurrente: las variables críticas del proceso, como temperatura, corriente, presión y nivel, inciden directamente en la operación, pero no se encuentran completamente integradas en una lógica común de decisión. A partir de este análisis, la solución propuesta no se planteó como una automatización genérica, sino como una arquitectura ajustada a las condiciones reales de la planta, conservando la operación manual local y agregando operación manual supervisada desde HMI.
- La formalización de la filosofía de control permitió transformar criterios operativos obser-
vados en reglas funcionales verificables. La separación entre nivel de campo, control en PLC y supervisión local en HMI fue una decisión central del proyecto, ya que evita que la interfaz asuma funciones de control y mantiene las acciones del operador condicionadas por permisos, alarmas e interlocks. Esta estructura aporta claridad para futuras etapas de programación, mantenimiento y puesta en marcha.
- Las estrategias de control seleccionadas respaldan la premisa de que no todas las variables del proceso requieren el mismo tipo de control. El PI de temperatura se justificó por la naturaleza regulatoria de la variable y la actuación modulante de vapor; el control por bandas en la válvula de fondos respondió a la necesidad de favorecer el drenaje de aceite sin exigir

mantener la corriente en un setpoint fijo; y la histéresis en prensas conservó un criterio robusto para limitar conmutaciones del sistema hidráulico. Esta selección permitió adaptar la solución al comportamiento físico del proceso y evitar un diseño sobredimensionado.

- La implementación en TIA Portal y la validación funcional mediante PLCSIM permitieron verificar la coherencia lógica de la arquitectura propuesta. Las pruebas realizadas sobre control de temperatura, control por bandas, vapor por fondos, histéresis de prensas, secuencia de distribución, cambio de velocidad del alimentador y señalización por presión de vapor mostraron que las acciones automáticas responden a las condiciones simuladas y permanecen condicionadas por la lógica del PLC. Sin embargo, estos resultados deben interpretarse dentro de su alcance: la validación fue virtual y no reemplaza pruebas con hardware, instrumentación real ni puesta en marcha industrial.
- Una restricción importante del proyecto fue la imposibilidad de validar la arquitectura con señales físicas del proceso. Esta condición limitó la evaluación de tiempos reales de respuesta, ruido de medición, escalamiento de señales, desempeño de actuadores y comportamiento de la lógica ante perturbaciones propias de la planta. Por tanto, los resultados obtenidos deben interpretarse como una validación funcional de la lógica desarrollada en entorno simulado, no como una evaluación del desempeño industrial del sistema.
- El aporte principal de ARCODIP consiste en entregar una base de ingeniería documentada para la centralización del control del área de digestión y prensado. Esta base incluye diagnóstico, filosofía de control, arquitectura PLC-HMI, lista de señales, módulos de referencia, matriz causa–efecto, secuencias GRAFCET, estrategias de control, pantallas HMI y validación funcional. En relación con trabajos y enfoques previos de automatización industrial, el proyecto se ubica como una aplicación contextualizada a una etapa específica de la agroindustria palmera colombiana, donde la supervisión de variables críticas y la reducción de maniobras

manuales no estandarizadas pueden apoyar una operación más trazable y mantenible.

- En síntesis, ARCODIP cumplió su propósito como diseño de arquitectura de control centralizado y validación funcional en entorno simulado. Su resultado no es una solución industrial instalada, sino una propuesta técnica verificable que establece las condiciones para avanzar hacia pruebas con hardware, ajuste de instrumentación, validación en planta e integración futura con sistemas superiores de supervisión.

5. Recomendaciones y trabajos futuros

Se recomienda continuar el proyecto con una etapa de validación con hardware real, empleando el PLC, la HMI, los módulos de entrada/salida y señales físicas representativas del proceso. Esta validación debería iniciar en banco de pruebas y avanzar posteriormente por subsistemas, con el fin de verificar escalamiento de señales, tiempos de respuesta, comunicación PLC-HMI, alarmas e interlocks antes de una posible implementación en planta.

También se recomienda revisar la instrumentación asociada a temperatura, corriente, presión de vapor, presión hidráulica y nivel de digestores. La confiabilidad de estas señales es fundamental para que la arquitectura opere correctamente, ya que las decisiones de control, supervisión y protección dependen de la calidad de la medición disponible. Esta revisión debería incluir calibración, validación de rangos, análisis de ruido y verificación del comportamiento de los transmisores bajo condiciones reales.

Como trabajo futuro, se plantea completar las pantallas HMI de alarmas, tendencias, históricos y configuración. Estas pantallas deberían incorporar niveles de usuario, registro de eventos y restricciones sobre parámetros críticos, de manera que la supervisión del proceso sea más trazable y útil para operación y mantenimiento.

Una vez validada la arquitectura PLC-HMI con señales reales, podría avanzarse hacia estrategias de supervisión basada en históricos de operación, diagnóstico de fallas recurrentes y apoyo al mantenimiento preventivo. Esta línea permitiría aprovechar la digitalización de variables críticas para pasar de una operación principalmente reactiva a una operación más sustentada en información.

Cualquier implementación futura debe realizarse con participación del personal de operación, mantenimiento, seguridad industrial y dirección técnica de la empresa. La operación desde HMI puede reducir la necesidad de maniobras cercanas a zonas con vapor, equipos calientes o

elementos mecánicos; sin embargo, no reemplaza los procedimientos de bloqueo, señalización, capacitación ni validación de riesgos definidos por la planta.

Finalmente, cuando el control local mediante PLC-HMI haya sido probado en condiciones reales, podría evaluarse su integración con un sistema SCADA para registro histórico, supervisión remota y análisis operativo de largo plazo. Esta integración se considera una etapa posterior y dependerá de la estabilidad del control local, la infraestructura de comunicación disponible y las políticas de seguridad de la información de la empresa.

Referencias Bibliográficas

- Baryeh, E. A. (2001). Effects of palm oil processing parameters on yield. *Journal of Food Engineering*, 48(1), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00137-0)
- BBVA Colombia. (2024). *Colombia se ubica como el cuarto productor mundial y primero en América de aceite de palma*. <https://www.bbva.com/es/co/sostenibilidad/colombia-se-ubica-como-el-cuarto-productor-mundial-y-primero-en-america-de-aceite-de-palma/>
- Chuchep, T., Mahathaninwong, N., Limhengha, S., y Suvonvorn, N. (2025). Development of sensor monitoring for loss reduction analysis in palm oil extraction process. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 36(1), 66–78. <https://doi.org/10.7166/36-1-3122>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2025). *La producción de aceite de palma crudo alcanza 1,79 millones de toneladas en lo corrido de 2025*. <https://fedepalma.org/comunicados/la-produccion-de-aceite-de-palma-crudo-alcanza-179-millones-de-toneladas-en-lo-corrido-de-2025/>
- García, J., Arias, N., y Becerra, J. (2025). *Claves para mejorar la Tasa de Extracción de Aceite (TEA) y fortalecer la competitividad del sector palmero en Colombia*. https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2025/04/cpel_julian_becerra_introduccion_y_cierre.pdf (Presentación en Congreso Palmicultor 2025, Cenipalma)
- International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 60848:2013: GRAFCET specification language for sequential function charts*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/3684> (International Standard)
- International Society of Automation. (s. f.). *ISA-95: Enterprise-control system integration*.

<https://www.isa.org/isa95/>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Pearson Educación.

PLCopen. (2025). *IEC 61131-3: Programming languages*. <https://www.plcopen.org/standards/logic/iec-61131-3/>

Rincón, H. A., Nieto, D. I., y Cala, S. L. (2012). Sistemas de control y automatización en plantas de beneficio: caso Palmas del Cesar S.A. *Palmas*, 33(1), 54–62. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10774>

Yosri, M. S., Anuar, M. R. S., Suhaimi, M. H. N., Zaidy, A. M., Faisal, M. Y. M., y Jaril, A. A. (2019). Screw Press Operation Optimisation for Oil and Kernel Recovery Enhancement. *Palm Oil Engineering Bulletin*, (130), 18–26. <https://palmoilis.mpob.gov.my/publications/POEB/poeb130-yosri.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Repositorio digital de informes técnicos de avance

Como soporte documental del desarrollo metodológico del proyecto ARCODIP, se dispone de un repositorio digital que contiene los informes técnicos elaborados durante las fases del proyecto. Estos documentos amplían la información presentada de forma sintetizada en este informe final y permiten consultar con mayor detalle los resultados parciales de cada etapa.

El repositorio incluye los siguientes documentos:

- Informe de avance Fase 1: Diagnóstico técnico del sistema actual.
- Informe de avance Fase 2: Formalización de la filosofía de control.
- Informe de avance Fase 3: Diseño de la arquitectura de control.
- Informe de avance Fase 4: Diseño conceptual de la interfaz HMI.

El acceso al repositorio digital se encuentra disponible en el siguiente enlace:

Repositorio digital de informes técnicos de avance

Apéndice B. Proyecto desarrollado en TIA Portal

Como soporte técnico de la arquitectura PLC-HMI desarrollada en el proyecto ARCODIP, se dispone de un anexo digital que contiene el proyecto completo elaborado en TIA Portal.

El anexo incluye:

- Proyecto completo de TIA Portal.
- Lista de variables y direccionamiento de señales.
- Bloques de programación desarrollados para digestores, prensas, secuencias, alarmas e interacción con HMI.
- Pantallas HMI implementadas.

El acceso al proyecto se encuentra disponible en el siguiente enlace:

Proyecto desarrollado en TIA Portal

Apéndice C. GRAFCET principal del área de digestión y prensado

Figura 13

GRAFCET principal del área de digestión y prensado.

