

Diseño de una guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción del aceite de palma crudo (CPO) en autoclave para plantas con capacidad de 8-10 Ton/H FFB.

Jennifer Tatiana Chaparro Lizarazo y Fabian Yesid Moreno Blanco

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingenieros Electrónicos

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia

Magíster en Dirección de Empresas MBA

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Potencia Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi madre, Esther Lizarazo Velandia, por su amor incondicional, sus sacrificios, sus consejos y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A mi padre, Humberto Chaparro Correa, por su ejemplo, su apoyo y por impulsarme siempre a seguir adelante. A mi hermana, Sara Julieth Chaparro Lizarazo, por su compañía, cariño y motivación durante este proceso. Gracias por estar presente en cada etapa y por compartir conmigo las alegrías y los retos de este camino.

- *Jennifer Tatiana Chaparro*

Dedico este trabajo a mi madre y a mi hermana, quienes han sido una fuente continua de amor, apoyo y fortaleza a lo largo de mi vida.

A mi madre, por sus sacrificios, su esfuerzo incansable y por enseñarme con su ejemplo el valor de la constancia y la responsabilidad. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por acompañarme en cada paso de este camino.

A mi hermana, por su cariño, comprensión y compañía. Gracias por estar presente, por brindarme apoyo cuando lo necesité y por compartir conmigo este proceso lleno de retos y aprendizajes.

Este logro también les pertenece a ustedes, porque su apoyo y confianza fueron fundamentales para hacerlo posible.

- *Fabian Yesid Moreno*

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Dios, quien fue mi guía, mi luz y mi sustento en los días más oscuros, quien me dio la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia para culminar este proyecto.

A mis padres Humberto Chaparro Correa y Esther Lizarazo Velandia quienes me apoyaron incondicionalmente y estuvieron siempre presentes en cada etapa de este proceso. Infinitas gracias por su confianza en mí, por su amor y su paciencia. Los amo profundamente, y este logro también les pertenece.

A mi hermana Sara Julieth Chaparro Lizarazo, por su amor, compañía y apoyo. Gracias por estar presente en cada instante, por escucharme, motivarme y recordarme siempre que podía seguir adelante. Su cercanía y cariño hicieron este camino mucho más llevadero.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, por la formación académica, humana y profesional a lo largo de mi carrera, y por brindarme las herramientas y el espacio necesario para desarrollar mi proyecto de grado.

A mi director, el profesor Rolando Andrés Rincón Saravia, por su orientación, disposición, conocimiento y acompañamiento durante este proceso. Gracias por creer en mí.

Al profesor Jeison Arley Castillo, por su apoyo en la presentación de mi trabajo de grado, sus aportes fueron de gran ayuda para mejorar la calidad de mi exposición.

A la ingeniera Angie Lizcano, encargada de la planta de extracción de aceite de palma Bucarelia, quien nos permitió realizar la visita técnica y nos compartió información valiosa que contribuyó considerablemente en la comprensión del proceso industrial abordado en este trabajo.

A mi compañero de tesis, Fabian Yesid Moreno, por sus aportes a la realización de nuestro proyecto de grado, así como por su amistad y compañía desde el inicio de nuestra carrera.

A mis docentes de la E3T, quienes contribuyeron significativamente a mi formación académica, profesional y personal. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, que fortalecieron mis capacidades como ingeniera y los valores que me acompañarán en mi vida profesional.

A mis compañeros y colegas que estuvieron presentes a lo largo de mi carrera. Gracias por las enseñanzas, los conocimientos compartidos y los buenos momentos vividos en cada clase, laboratorio, trabajo y proyecto. Me llevo una huella imborrable de cada uno de ustedes y les deseo de corazón que puedan alcanzar todas las metas que se propongan.

A mis compañeros y amigos, Nicolás Borja Malagón y Jhon Jairo García, quienes desde que me conocieron, hicieron lo posible para ayudarme en todo lo relacionado con mi carrera. Gracias por su amistad, su comprensión y disposición para tenderme una mano cuando la necesité. Me llevo momentos, recuerdos y anécdotas inolvidables. Les deseo el mayor de los éxitos.

A mi amiga Luz Marina Campos, por su amistad sincera y por los momentos compartidos en esta etapa de mi vida. Gracias por su compañía, su cariño, por estar pendiente de mí, y por celebrar conmigo cada pequeño logro alcanzado.

A mi psicóloga, Diana Ayala, por su acompañamiento, orientación y apoyo durante momentos personales difíciles que coincidieron con el desarrollo de este proyecto. Su ayuda fue fundamental para mantener el equilibrio emocional y poder culminar con mi proyecto.

Por último, me agradezco a mí misma por la valentía, la disciplina y la resiliencia para no rendirme ante los obstáculos. Por las noches de trabajo, los momentos de duda, los errores que se transformaron en aprendizaje y la determinación que me permitió llegar hasta aquí. Este logro es el reflejo de mi esfuerzo, crecimiento y perseverancia.

Gracias a todos los que hicieron parte de esto. Con cariño, *Tatiana*.

Tabla de contenido

Introducción 12

1. Objetivos..... 14

1.1 Objetivo General..... 14

1.2 Objetivos Específicos..... 14

2. Marco Teórico 15

2.1 Aceite de palma crudo (CPO)..... 15

2.2 Proceso de extracción de aceite de palma..... 15

2.3 Automatización industrial..... 16

2.3.1 Instrumentación industrial 16

2.3.2 Controlador Lógico Programable (PLC) 17

2.3.3 Interfaz Hombre-Máquina (HMI) de alto rendimiento..... 17

3. Desarrollo de la solución 18

3.1 Normativas aplicables..... 18

3.2 Análisis del proceso y determinación de requerimientos técnicos y de control 19

3.2.1 Levantamiento de información 19

3.2.2 Caracterización del proceso 20

3.2.3 Identificación de variables e instrumentación..... 23

3.3 Diseño del sistema de automatización 25

3.3.1 Arquitectura del sistema 26

3.3.2 Planteamiento de la automatización.....	27
3.3.3 Desarrollo de la programación.....	34
3.3.4 Diseño de la HMI High Performance	35
3.3.5 Simulación y validación del sistema propuesto	38
3.4 Elaboración de la guía de automatización	40
3.4.1 Estructura de la guía.....	40
3.4.2 Recomendaciones de instrumentación.....	41
4. Conclusiones.....	43
Referencias Bibliográficas	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Variables físicas, tipo de señal e instrumentación principal del proceso.....	24
Tabla 2. Actuadores principales utilizados en el proceso	24
Tabla 3. Ubicación de las tablas de variables en el Apéndice A para la automatización	25
Tabla 4. Ubicación de los ejemplos de programación en el Apéndice A	35
Tabla 5. Ubicación de los diseños de las pantallas HMI en el Apéndice A.....	37
Tabla 6. Ubicación de las tablas de gestión de alarmas en el Apéndice A	38
Tabla 7. Referencias de dispositivos recomendados para cada subproceso	42

Lista de Apéndices

Apéndice A. Guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción del aceite de palma crudo

Apéndice B. Informe de visita técnica a planta extractora Bucarelia

Apéndice C. Documento de diagramas de control

Apéndice D. Documento de programación generado en TIA Portal

Apéndice E. Documento de pantallas HMI

Apéndice F. Video de simulación y validación de la programación

Glosario

CPO / ACP: Aceite de palma crudo (Crude Palm Oil).

GRAFCET: (Gráfico de Función de Mando Etapa-Transición) Es una metodología gráfica estandarizada para modelar y diseñar sistemas de automatización industrial secuenciales.

High Performance HMI: Interfaz Hombre-Máquina de alto rendimiento.

ISA: Sociedad Internacional de Automatización (International Society of Automation).

Ladder: Lenguaje gráfico de programación basado en diagramas de escalera, utilizado en la programación de PLC para el control de procesos industriales.

Interfase: Superficie de separación entre dos (2) fluidos de densidad diferente dentro de un tanque.

PIB: Producto Interno Bruto.

PLC: Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller).

PLCSIM: Software de Siemens para simular y depurar programas de PLC sin hardware físico.

PROFINET: Estándar abierto de red Ethernet industrial para la comunicación entre los elementos de un sistema de automatización (Process Field Network).

Raquis: Estructura central del racimo de palma, a la cual se encuentran adheridos los frutos.

Redler: Transportador de cadena para materiales a granel como RFF o frutos sueltos.

RFF / FFB: Racimos de fruta fresca (Fresh Fruit Bunches).

SCADA: Sistema de supervisión, control y adquisición de datos.

TIA Portal: Software desarrollado por Siemens para la programación, configuración y puesta en marcha de sistemas de automatización industrial compuestos por PLC, HMI y otros dispositivos.

Ton/H: Toneladas por hora. Unidad de capacidad de procesamiento de RFF.

Torta de prensa: Residuo sólido del prensado del fruto de palma, compuesto por fibra y nueces.

Vacuómetro: Instrumento utilizado para medir presiones inferiores a la atmosférica (vacío).

Resumen

Título: Diseño de una guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción del aceite de palma crudo (CPO) en autoclave para plantas con capacidad de 8-10 Ton/H FFB¹

Autor: Jenniffer Tatiana Chaparro Lizarazo y Fabian Yesid Moreno Blanco²

Palabras clave: Automatización Industrial, Autoclave, Aceite de palma crudo (CPO), PLC, Lenguaje Ladder, HMI, Instrumentación.

Descripción: Este trabajo de grado presenta el diseño de una guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción de aceite de palma crudo (CPO) en autoclave para plantas con capacidades de procesamiento de 8 a 10 Ton/H de racimos de fruta fresca (RFF), orientada a las condiciones operativas actuales de la industria palmera en Colombia. La propuesta surge de la necesidad de modernizar los sistemas de monitoreo y control utilizados en este proceso, los cuales en la mayoría de las plantas extractoras aún se basan en esquemas eléctricos convencionales con relés, temporizadores y dispositivos analógicos, lo que limita la supervisión del proceso, dificulta el mantenimiento, reduce la flexibilidad operativa y puede comprometer la seguridad laboral de los operarios.

Para el desarrollo del trabajo se realizó una caracterización general de las etapas que componen el proceso de extracción de aceite de palma, identificando las variables de operación más relevantes y los equipos involucrados en cada una de ellas. Con base en la revisión de documentación técnica, normas aplicables y una visita a una extractora para observar el proceso productivo, se definieron los requerimientos de instrumentación, control y supervisión necesarios para su automatización.

Como resultado, se elaboró una guía estandarizada que integra criterios para la selección de instrumentos, la arquitectura de control basada en PLC, estrategias de programación en lenguaje Ladder y el diseño de interfaces Hombre-Máquina (HMI) para la supervisión del proceso. Este documento busca ser material de apoyo para estudiantes, técnicos e ingenieros interesados en el diseño e implementación de sistemas de automatización industrial, independientemente de su experiencia previa en la industria del aceite de palma.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Rolando Andrés Rincón Saravia. Codirector Jaime Guillermo Barrero Pérez.

Abstract

Title: Design of a Standardized Guide for the Automation of the Crude Palm Oil (CPO) Extraction Process in Autoclaves for 8-10 Ton/H FFB Processing Plants¹

Author: Jenniffer Tatiana Chaparro Lizarazo and Fabian Yesid Moreno Blanco²

Keywords: Industrial Automation, Autoclave, Crude Palm Oil (CPO), PLC, Ladder Logic, HMI, Instrumentation.

Description: This undergraduate thesis presents the design of a standardized guide for the automation of the crude palm oil (CPO) extraction process in autoclaves for plants processing 8-10 Ton/H of fresh fruit bunches (FFB), oriented to the current operating conditions of the palm oil industry in Colombia. The proposal arises from the need to modernize the monitoring and control systems used in this process, which in most extraction plants are still based on conventional electrical schemes using relays, timers and analog devices. This limits process supervision, complicates maintenance, reduces operational flexibility, and may compromise operator safety.

To develop this work, a general characterization of the stages of the palm oil extraction process was conducted, identifying the most relevant operating variables and the equipment used in each stage. Based on a review of technical documentation, applicable standards, and a technical visit to a palm oil extraction plant to observe the production process, the instrumentation, control, and supervision requirements necessary for its automation were defined.

As a result, a standardized guide was developed that integrates criteria for instrument selection, a PLC-based control architecture, programming strategies using the Ladder logic language, and the design of Human–Machine Interfaces (HMI) for process supervision. This document is intended to serve as support material for students, technicians, and engineers interested in the design and implementation of industrial automation systems, regardless of their prior experience in the palm oil industry.

¹ Undergraduate Thesis

² Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor Rolando Andrés Rincón Saravia. Co-advisor Jaime Guillermo Barrero Pérez.

Introducción

La industria de producción de aceite de palma en Colombia es uno de los sectores agroindustriales más relevantes para la economía nacional, debido a su significativa participación en el PIB agrícola y a la alta demanda del producto en industrias alimenticias, cosméticas y de biocombustibles (Fedepalma, 2024).

En este contexto, las plantas extractoras desempeñan un papel fundamental en la obtención de CPO mediante un conjunto de etapas que incluyen procesos térmicos, mecánicos y de separación, en las que intervienen diferentes equipos y variables físicas como la temperatura, la presión, el nivel, el caudal y los tiempos de operación. Es necesario mantener un control adecuado de estas variables, ya que influyen directamente en el rendimiento, la calidad del aceite y las condiciones de seguridad de la planta (Baryeh, 2001; Wambeck, 2005).

Sin embargo, muchas plantas extractoras del sector palmicultor colombiano aún operan con sistemas de control basados en esquemas eléctricos convencionales que emplean relés, temporizadores y otros dispositivos analógicos. Este tipo de sistemas limita la eficiencia operativa, reduce la capacidad de respuesta ante variaciones en el proceso y dificulta las labores de mantenimiento y ajuste, lo que puede generar tiempos de parada prolongados y aumentar la probabilidad de errores humanos (Cenipalma, 2025).

Además, la necesidad de un sistema de supervisión más adecuado se hace evidente en aquellas etapas del proceso donde se utilizan equipos que operan a alta presión y temperatura, como ocurre en la esterilización del fruto en autoclave, donde se incrementa el riesgo de explosión (Organización Internacional del Trabajo, 2020).

Frente a esta situación, el presente trabajo propone el diseño de una guía estandarizada orientada a la automatización del proceso de extracción de CPO mediante el uso de estrategias de

control basadas en PLC programado en lenguaje Ladder. La guía integra criterios para la selección de sensores, la identificación de variables de operación, la definición de señales digitales y analógicas del PLC y el diseño de interfaces HMI para el monitoreo y supervisión del proceso, así como lineamientos generales de control, operación y seguridad.

En este sentido, la propuesta de automatización se plantea para los distintos subprocesos de la línea de extracción, con el objetivo de mejorar las condiciones de operación, supervisión y control en las plantas del sector.

El alcance de este trabajo se limita al diseño de una guía de automatización aplicable a plantas de extracción de aceite de palma con capacidad de procesamiento de 8 a 10 toneladas de RFF por hora. El desarrollo se fundamenta en información técnica y normativa del contexto colombiano y su validación se realiza mediante simulación, sin contemplar su implementación en una planta industrial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción del aceite de palma crudo (CPO) en autoclave para plantas con capacidad de 8-10 Ton/H de FFB.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar los requerimientos técnicos y de control necesarios para la automatización del proceso de extracción de aceite de palma crudo (CPO) en autoclave incluyendo los procesos, subprocesos, máquinas e instrumentación que lo componen.

Desarrollar el diseño del sistema de automatización, abarcando tanto la programación del controlador lógico programable (PLC) como la interfaz de monitoreo y control (HMI).

Elaborar una guía técnica estandarizada para la implementación de una alternativa de automatización del proceso CPO en plantas de extracción de aceite de palma, acompañada de la documentación detallada del proceso de desarrollo.

2. Marco Teórico

En este capítulo se presentan los principales conceptos asociados al proceso de extracción de CPO, se describen de manera general las etapas que conforman la línea de extracción, así como los fundamentos asociados al uso de PLC, interfaces HMI y la instrumentación industrial. La descripción detallada del proceso se incluye en el **Apéndice A**, correspondiente a la guía técnica desarrollada en este trabajo.

2.1 Aceite de palma crudo (CPO)

El CPO es un aceite vegetal obtenido del mesocarpio del fruto de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*). Se caracteriza por su alto rendimiento y sus propiedades fisicoquímicas, lo que lo convierte en una materia prima ampliamente utilizada en diversas industrias. Su obtención se realiza mediante el procesamiento de los RFF en plantas extractoras, el cual constituye una serie de etapas térmicas, mecánicas y de separación destinadas a liberar y recuperar el aceite contenido en el fruto (Wambeck, 2005).

Una descripción general del aceite de palma, de la estructura del fruto y los procesos involucrados se presenta en el **Apéndice A (p.7)**.

2.2 Proceso de extracción de aceite de palma

El proceso de extracción del CPO se lleva a cabo en plantas industriales conocidas como plantas extractoras, donde los RFF son sometidos a operaciones que permiten la liberación del aceite y la separación de impurezas presentes en la mezcla resultante.

Las etapas que componen este proceso son: La recepción de los RFF, la esterilización del fruto, la desfrutación, la digestión, el prensado y finalmente la clarificación del aceite. Cada uno

de estos subprocesos involucra diferentes equipos industriales y variables de operación que deben mantenerse dentro de rangos adecuados para garantizar una extracción eficiente y un producto de calidad (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).

La caracterización técnica detallada de cada etapa se desarrolla en el capítulo tres (3) del presente documento. Adicionalmente, en el **Apéndice A (p. 28)** se muestra el diagrama general del proceso de extracción, en el que se integran los equipos mencionados.

2.3 Automatización industrial

La automatización industrial se refiere al uso de tecnologías de control, instrumentación y sistemas computacionales para operar y supervisar procesos industriales con una mínima intervención humana. Su aplicación permite mantener condiciones de operación más estables por medio del monitoreo continuo de las variables de proceso y la ejecución automática de acciones de control.

Para ello, se emplean dispositivos de medición, controladores lógicos programables (PLC), sistemas de supervisión y redes de comunicación industrial que permiten integrar la información y apoyar la operación de la planta (Groover, 2015).

2.3.1 Instrumentación industrial

La instrumentación industrial comprende el conjunto de dispositivos utilizados para medir, transmitir y controlar las variables físicas presentes en un proceso industrial. Se compone principalmente de sensores, transmisores, actuadores y dispositivos de potencia y señalización.

Estos elementos permiten obtener información del proceso en tiempo real y enviarla a los sistemas de control, donde es utilizada para la supervisión, regulación y protección de los equipos industriales (Bentley, 2005).

2.3.2 Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC es un dispositivo electrónico diseñado para controlar procesos industriales ejecutando programas almacenados en su memoria. Estos equipos reciben señales provenientes de sensores y dispositivos de campo, procesan la información según la lógica programada y generan señales de salida que accionan actuadores, motores o válvulas dentro del sistema.

Los PLC son ampliamente utilizados en sistemas de automatización debido a su confiabilidad, flexibilidad de programación y capacidad para operar en entornos industriales. El lenguaje de programación Ladder permite representar la lógica de control mediante diagramas similares a los circuitos eléctricos tradicionales (Bolton, 2015).

2.3.3 Interfaz Hombre-Máquina (HMI) de alto rendimiento

Las HMI son sistemas utilizados para visualizar y supervisar el estado de los procesos industriales. A través de estas interfaces, los operadores pueden monitorear variables de operación, visualizar alarmas, modificar parámetros del sistema y controlar equipos de manera segura (Bolton, 2015).

El concepto de HMI de alto rendimiento se basa en el diseño de interfaces gráficas orientadas a mejorar la comprensión del estado del proceso y facilitar la toma de decisiones por parte de los operadores. Este enfoque busca reducir la sobrecarga de información visual y destacar únicamente los elementos relevantes para la operación del sistema (Hollifield et al., 2008).

3. Desarrollo de la solución

En este capítulo se describe el desarrollo de la solución propuesta para automatizar el proceso de extracción de CPO. Se presentan las etapas de análisis y definición de los requerimientos de control, el diseño del sistema de automatización y la elaboración de la guía técnica correspondiente.

Para facilitar la comprensión de los elementos técnicos desarrollados, se recomienda consultar de manera paralela el **Apéndice A**, donde se incluye la guía completa con diagramas, tablas de variables, programación y demás detalles técnicos que complementan la información presentada en este informe.

3.1 Normativas aplicables

Para el desarrollo del presente trabajo, se consideraron diferentes normativas relacionadas con la seguridad operativa, instalaciones eléctricas y sistemas de automatización en la industria.

En el **Apéndice A (p. 6)** se menciona en detalle cada una de las normas.

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE): Establece los requisitos para el diseño y operación segura de instalaciones eléctricas en Colombia.

Resolución 0312 de 2019 – Decreto 1072 de 2015 (SG-SST): Define los estándares mínimos de seguridad y salud en el trabajo en entornos industriales.

Resolución 2400 de 1979: Establece condiciones mínimas de seguridad para la operación de maquinaria y equipos en lugares de trabajo.

Norma IEC 61131-3: Define los lenguajes de programación utilizados en PLC.

Norma IEC 61511: Establece requisitos para sistemas instrumentados de seguridad en procesos industriales.

Norma IEC 62443: Define lineamientos de ciberseguridad para sistemas de automatización y control industrial.

Norma ISA 5.1: Establece la simbología e identificación de instrumentos en diagramas de control.

Norma ISA 101: Proporciona lineamientos para el diseño de interfaces HMI.

Norma ISA 18.2: Define los criterios para la gestión de alarmas en sistemas de control.

3.2 Análisis del proceso y determinación de requerimientos técnicos y de control

El objetivo de esta sección es determinar los requerimientos técnicos y de control necesarios para la automatización. Para ello, se realizó un levantamiento de información sobre el proceso, la caracterización de sus etapas y equipos, la identificación de las variables operativas, sus rangos de funcionamiento y la instrumentación requerida para su monitoreo y control.

3.2.1 Levantamiento de información

Para comprender el funcionamiento del proceso de extracción del CPO, se realizó una revisión de fuentes técnicas del sector palmicultor, incluyendo material publicado por Fedepalma y Cenipalma, así como el manual *Sinopsis del proceso de la palma de aceite* de Wambeck, en el que se describen aspectos relacionados con el diseño, mantenimiento y operación de los procesos en la industria palmera.

Se estableció contacto con ingenieros vinculados a la industria en Colombia, quienes aportaron información sobre las problemáticas operativas presentes en las extractoras y facilitaron material técnico como planos estructurales, diagramas eléctricos y de control, correspondientes a diferentes subprocesos y equipos utilizados en el proceso.

Como complemento de la etapa de recopilación de información, se llevó a cabo una visita técnica a la planta extractora de Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A.S. ubicada en el corregimiento El Pedral, Puerto Wilches, Santander. Durante el recorrido se observaron las principales etapas del proceso de extracción de aceite de palma, así como los equipos e instrumentos presentes en la línea de procesamiento. Además, se conversó con el personal operativo de la planta, quien compartió información sobre el estado actual de sus sistemas y algunas mejoras que podrían implementarse. Esta actividad permitió contrastar la información revisada en la documentación con las condiciones reales de operación de una planta extractora.

El informe de la visita, junto con el registro fotográfico, se presenta en el **Apéndice B**.

3.2.2 Caracterización del proceso

En este apartado se describen los subprocesos que integran el proceso de extracción de CPO. Se identifican los equipos involucrados, las secuencias de operación y las condiciones generales bajo las cuales se desarrolla cada uno.

Recepción de RFF. Los racimos recolectados de las plantaciones de palma son transportados a la planta extractora, donde se realiza su pesaje, inspección y descarga en los sistemas de alimentación del proceso. Posteriormente, los racimos son transportados por medio de sistemas mecánicos hasta los esterilizadores.

El sistema de recepción suele ser el subproceso menos automatizado y el que más demoras genera en la línea de procesamiento. Esto afecta la calidad del aceite, ya que el almacenamiento prolongado del fruto favorece su deterioro y el aumento de su acidez (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).

En Colombia, la mayoría de las extractoras emplean el método de recepción tradicional basado en el llenado de vagonetas o canastas de acero, las cuales se desplazan sobre rieles mediante cabrestantes y sistemas de poleas. Estas unidades son transferidas entre diferentes líneas de rieles a través de una unidad de transferencia y, posteriormente, ingresan a los esterilizadores con ayuda de un puente de riel, como se detalla en el **Apéndice A (p. 8)**.

Esterilización en autoclave. En la etapa de esterilización, los RFF son sometidos a vapor de agua a alta presión y a una temperatura controlada mediante ciclos de inyección de vapor dentro de recipientes cerrados de acero, conocidos como autoclaves o esterilizadores.

El objetivo principal de este proceso es evitar la degradación del aceite inactivando las enzimas lipolíticas presentes en el fruto, facilitar la separación del fruto del racimo y ablandar el mesocarpio, para favorecer la liberación del aceite durante el prensado (Wambeck, 2005).

Existen alternativas para la esterilización del fruto dependiendo de la disposición de la planta y la recepción de los RFF. Algunas plantas utilizan autoclaves oblicuos, verticales u horizontales, que pueden trabajar de forma continua o dinámica, y cuyo fruto ingresa por medio de redlers transportadores y no en vagonetas.

En Colombia, muchas extractoras aún trabajan con autoclaves horizontales y el proceso convencional de recepción de fruto en vagonetas, por lo que el diseño automatizado en la guía se basa en la esterilización convencional. No obstante, la lógica de automatización puede aplicarse a las demás alternativas que aún dependan de los operarios para su funcionamiento.

En el **Apéndice A (pp. 10-12)** se explica en detalle la operación, condiciones y equipos involucrados en la esterilización.

Desfrutación de los RFF. Para el sistema de transporte de RFF en vagonetas, se encontró que luego de esterilizar el fruto, se utiliza un mecanismo de volteo de canastas por medio de un tambor con motorreductor encargado de disponer los RFF para su desfrutación, la cual consiste en la separación de los frutos individuales del racimo esterilizado. La desfrutación se realiza dentro de equipos rotativos conocidos como desfrutadores o trilladores, los cuales utilizan el movimiento mecánico, como el impacto y la fricción para desprender los frutos del raquis. Los frutos desprendidos continúan hacia las etapas de digestión y prensado, mientras que el raquis se conduce a otra área para su disposición o aprovechamiento en otros procesos (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).

La explicación ampliada del proceso de desfrutación y los equipos involucrados en el transporte del fruto suelto a la digestión se encuentra en el **Apéndice A (pp. 14-15)**.

Digestión y prensado. Los frutos sueltos son transportados hacia unos contenedores herméticos llamados digestores, donde se someten a agitación mecánica y calentamiento con el objetivo de romper las paredes celulares del mesocarpio y facilitar la liberación del aceite. La masa obtenida es descargada a prensas hidráulicas que extraen el aceite contenido en el fruto. Como resultado de este proceso se obtiene una mezcla compuesta por aceite, agua y sólidos, la cual es conducida hacia las etapas de separación y clarificación, mientras que la torta de prensa es transportada a etapas posteriores de recuperación, donde se extrae una fracción adicional de aceite (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).

El proceso de digestión y prensado se describe en detalle en el **Apéndice A (pp. 17-19)**.

Clarificación y almacenamiento del aceite. La clarificación es la etapa en la que se separa el aceite de palma de las impurezas generadas en el prensado, a través de procesos de decantación, centrifugación y tratamiento térmico.

Para su análisis, se separó el tratamiento del aceite crudo, recolectado en la parte superior de los tanques, y el de los lodos, drenados por la parte inferior, los cuales pasan por desarenadores, filtros y centrífugas para recuperar el aceite, que se retorna al sistema.

Los tanques operan de forma continua a su máxima capacidad: el aceite rebosa hacia un secador al vacío para reducir la humedad, mientras que los lodos se envían a la centrifugación. Dependiendo de la planta, se emplean centrífugas tipo bowl, decanter o tricanter para realizar la separación de fases (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008; Wambeck, 2005).

Para esta guía, se consideró el uso de centrífugas tipo bowl debido a su aplicación común en plantas de 8–10 Ton/H. Sin embargo, la lógica de control es aplicable a otras configuraciones, dado que comparten principios de operación similares.

Finalmente, el aceite clarificado y seco se almacena en tanques a temperatura controlada para evitar su solidificación y preservar sus propiedades antes de su transporte y comercialización.

Esta etapa se muestra en el **Apéndice A (pp. 21–24)**.

3.2.3 Identificación de variables e instrumentación

Con base en la caracterización del proceso, se realizó la identificación de las variables operativas de cada equipo y la instrumentación necesaria para su control y monitoreo.

Esta información se organizó en tablas para cada subproceso, las cuales incluyen las variables físicas, el tipo de sensor que las monitorea, el actuador que responde al control de estas

y el tag que se utilizó para su identificación en el sistema de automatización, tal como se muestra en el formato de la **Tabla 1** para los sensores y la **Tabla 2** para los actuadores.

Tabla 1.

Variables físicas, tipo de señal e instrumentación principal del proceso

Variable física	Tipo de señal	Instrumento	Tag
Temperatura	Analógica	Transmisor de temperatura	TIT_XX
Presión	Analógica	Transmisor de presión	PIT_XX
Nivel	Analógica	Transmisor de nivel	LIT_XX
Caudal	Analógica	Transmisor de caudal	FIT_XX
Corriente	Analógica	Transmisor de corriente	AIT_XX
Posición	Analógica	Transmisor de posición lineal	ZIT_XX
Estado de posición	Digital	Final de carrera (Limit Switch)	LS_XX
Límite de variable	Digital	Switch Alto/Bajo	XS(H/L)_XX
Presencia	Digital	Sensor fotoeléctrico	PE_XX

Nota. Las etiquetas de instrumentación (tag) se definen de acuerdo con la norma ISA 5.1 XX: Corresponde a la abreviatura de cada equipo del proceso

Tabla 2.

Actuadores principales utilizados en el proceso

Actuador	Tipo de señal	Tag
Motor Eléctrico	Digital	M_XX
Pistón Hidráulico (Electroválvula)	Digital	XV_XX
Válvula Neumática	Digital	XV_XX
Bomba de transferencia	Digital	MBT_XX
Válvula Proporcional	Analógica	PV_XX
Variador de frecuencia	Analógica	VFD_XX

Nota. La nomenclatura de las etiquetas corresponde a la utilizada en la arquitectura de control del sistema de automatización. XX: Indica la abreviatura de cada equipo del proceso

Las etiquetas asignadas a las variables se estructuraron con base en la norma ISA 5.1 para la identificación de instrumentos, específicamente en la designación de variables y funciones.

Como convención propia del proyecto, se empleó un sufijo que indica el equipo o área del proceso (Instrumento / Dispositivo_Número_Equipo / Área).

En el **Apéndice A (p. 28)** se presenta el listado completo de los identificadores utilizados en la automatización del proceso de extracción de CPO, clasificados según los instrumentos, dispositivos de campo, áreas del proceso y los equipos asociados.

Con el fin de facilitar la comprensión de las variables, instrumentos y etiquetas involucrados en el diseño de automatización, en el **Apéndice A** se incluyeron tablas específicas para cada subproceso, cuya ubicación se resume en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

Ubicación de las tablas de variables en el Apéndice A para la automatización

Subproceso	Páginas de ubicación
Recepción de RFF	9
Esterilización	13
Desfrutación de RFF	14, 16
Digestión y prensado	18, 20
Clarificación y almacenamiento	25-27

3.3 Diseño del sistema de automatización

Con base en la información recopilada, se diseñó el sistema de automatización, el cual comprende la definición de la arquitectura del sistema, el planteamiento de la estrategia de automatización para cada subproceso según la problemática identificada, así como el desarrollo de la lógica de control y el diseño de la interfaz HMI para la supervisión de toda la línea de proceso.

3.3.1 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema se basó en la organización jerárquica de la pirámide de automatización donde intervienen diversos componentes encargados del control y supervisión del proceso, tal como se define en el **Apéndice A (p. 29)**. Respecto al nivel de campo, se elaboró una tabla en la que se identificaron, clasificaron y definieron los instrumentos y dispositivos necesarios para monitorear y controlar las variables del proceso. También se hizo mención a las unidades de medición empleadas en la industria palmera.

Para la interconexión entre el nivel de campo y el nivel de control, se conceptualizaron los tipos de señales emitidas por los sensores para permitir una adecuada interpretación de la información medida. Esto se plasmó en el **Apéndice A (pp. 30-31)**.

Para el sistema de control se planteó el uso de un PLC Siemens SIMATIC S7-1500, ya que este ofrece un alto rendimiento en el procesamiento de señales, modularidad y capacidad de integración con dispositivos de campo, además de ser ampliamente utilizado en esta industria.

En el **Apéndice A (p. 32)** se muestra la información relacionada con el PLC, así como una tabla comparativa de otras alternativas de controladores según los requerimientos de cada planta.

Del mismo modo, se estableció el entorno y el lenguaje de programación para el PLC utilizando TIA Portal como plataforma de ingeniería para el desarrollo de la lógica de control y la integración del hardware. También se describió el lenguaje Ladder y sus elementos con el fin de estructurar la programación de forma clara y organizada. Esto se presenta en detalle en el **Apéndice A (pp. 33-34)**.

Para el nivel de supervisión, se consideró la integración de una interfaz HMI como parte del sistema SCADA, con el fin de permitir la interacción del operario con el proceso. En la guía

se describe la HMI, sus funciones, tipos y beneficios, así como sus criterios de diseño y el sistema de gestión de alarmas. La información se detalla en el **Apéndice A (pp. 35-37)**.

Finalmente, se definió la comunicación entre los distintos elementos del sistema, la cual debe asegurar el intercambio de información entre los niveles de campo, control y supervisión en tiempo real. Para ello, se consideró el uso del protocolo PROFINET debido a su compatibilidad con el PLC seleccionado y su flexibilidad para la integración de los componentes.

En el **Apéndice A (p. 38)** se muestra el esquema de comunicación entre los dispositivos, así como una tabla que especifica la forma en la que el PLC se comunica con los equipos del sistema.

3.3.2 Planteamiento de la automatización

Para cada subproceso, se propuso un esquema de control orientado a dar solución a las problemáticas y deficiencias identificadas en la industria del aceite de palma en Colombia, con base en lo evidenciado durante la visita a la extractora Bucarelia (**véase Apéndice B**) y en la información proporcionada por operarios e ingenieros del sector.

Cada propuesta se describió de manera conceptual en la guía y a partir de ello, se definieron las secuencias de operación y se diseñaron diagramas de flujo como base para el desarrollo de la lógica de control de cada etapa del proceso.

El diseño de la automatización se realizó considerando un único ejemplar de cada equipo en los distintos subprocesos; sin embargo, la lógica de control planteada es modular y puede replicarse en los demás equipos del sistema.

Al iniciar cada diagrama de flujo, se colocó una tabla con los sensores y actuadores involucrados en el control. Las filas se organizaron de modo que los actuadores respondieran según

las señales enviadas por el sensor. Asimismo, se incorporó una columna de “ubicación” al lado izquierdo de cada sensor, para especificar la propuesta de localización de cada uno en los equipos del proceso.

Recepción de RFF y transporte a la esterilización. El transporte, llenado y conteo de vagonetas se automatizó mediante el control automático de las poleas que permiten su movimiento, con ayuda de sensores de posición y de presencia, así como interruptores de nivel alto instalados bajo las rampas de descarga para detectar cuando una vagoneta está llena. Generalmente, este proceso es realizado por los operarios a través de control remoto y tableros de mando, activando y desactivando los motores según la necesidad.

Inicialmente, se consideró reemplazar el sistema de poleas por vagonetas motorizadas; sin embargo, esta alternativa implicaba modificar por completo el sistema de rieles. También se evaluó la implementación de un sistema de empuje mediante un carro motorizado tipo pusher, pero esta opción no resultó viable debido a su alto costo y a la dificultad de integración con el PLC. Además, su implementación en múltiples rieles hacía la operación más compleja. Por lo tanto, se optó por mantener el sistema de poleas tradicional, incorporando una lógica de control independiente por riel, basada en señales de posición y en el conteo de vagonetas.

Respecto a la unidad de transferencia, normalmente el operario empuja las vagonetas que va a trasladar de riel y maniobra el tablero de control de la unidad de transferencia para desplazarse. Este método se automatizó colocando pistones hidráulicos para empujar o extraer conjuntos de vagonetas hacia la unidad de transferencia, aunque esto se limita a que el operario enganche y desenganche los conjuntos de vagonetas que serán trasladados.

Para controlar el movimiento de la unidad de transferencia y su secuencia de desplazamiento entre rieles, se propuso un sistema de conteo basado en finales de carrera que permite dirigir las vagonetas hacia los rieles correspondientes. El ingreso del lote al esterilizador se controla a través de un sensor de posición que realiza el conteo de vagonetas hasta alcanzar el número programado. Este se enclava y se reinicia cuando el lote sale del riel tras el proceso de esterilización. Este proceso se detalla en el **Apéndice A (pp. 39-41)** junto con los diagramas de flujo.

Esterilización de RFF. El proceso de esterilización es el que suele estar más automatizado en las extractoras debido a su importancia y al riesgo que representa para los operarios. En esta guía se utilizó el mismo ciclo térmico secuencial, el cual está condicionado por una serie de señales de seguridad, como la confirmación del lote de vagonetas al interior del esterilizador, el cierre y enclavamiento de seguridad de la puerta y la posición del puente de riel.

El ciclo se estructuró en etapas programadas, controladas mediante la apertura y cierre de válvulas de vapor, con base en tiempos y valores de presión definidos. La presión y temperatura son monitoreadas con transmisores con señal de salida analógica de 4-20 mA al PLC.

Se incorporó el control automático de la válvula de condensados por medio de aperturas temporizadas, cuyos parámetros pueden ajustarse desde la HMI, y se definieron configuraciones de operación según el estado de maduración del fruto (verde, maduro y sobremaduro).

Para el control de presión en la etapa de sostenimiento, se estableció una banda de tolerancia alrededor del valor nominal, evitando conmutaciones en la apertura y cierre de válvulas.

En el **Apéndice A (pp. 45-47)** se muestra en detalle la automatización de la esterilización.

Volteo y desfrutación de RFF. Los equipos de volteo, desfrutación y transporte del fruto generalmente son accionados por los operarios, ya sea de forma manual, desde tableros eléctricos o desde un control remoto.

Para el volteo de las canastas, se optó por ubicar el tambor volteador a nivel de piso, utilizando el sistema de poleas para trasladar las vagonetas, realizar su volteo y retornarlas a recepción. El ingreso y la confirmación de la canasta al tambor se monitorean y controlan con pistones hidráulicos y finales de carrera. Se propusieron sensores fotoeléctricos para detectar la presencia de fruto en las bandas transportadoras y controlar el encendido, incorporando un apagado temporizado para asegurar el transporte completo del fruto y evitar falsos positivos, optimizando el consumo energético.

Para el desfrutador, se integró el control de velocidad con un variador de frecuencia según se seleccione en la HMI por el tamaño de los RFF, así como el control de temperatura con una válvula de inyección de vapor y la supervisión del consumo de corriente para evitar sobrecarga. El encendido y apagado de cada equipo se coordinan en cascada según el requerimiento.

La automatización de este proceso se detalla en el **Apéndice A (pp. 51-54)**.

Digestión y prensado del fruto. El proceso de digestión es el que más problemas presenta debido a sus constantes atascos. Los operarios suelen encender y apagar los digestores de forma manual, así como la supervisión de temperatura y corriente se realiza con instrumentos analógicos. Cuando el digestor se atasca, según lo comentado por operarios e ingenieros del sector, se utilizan herramientas manuales para remover la masa digestada o para interrumpir el proceso. También se presentan inconvenientes por la presencia de objetos metálicos provenientes de etapas anteriores que pueden dañar la prensa.

Para solucionar el problema de metales en el fruto, se evaluó la implementación de un detector de metales en distintos puntos del proceso. Sin embargo, no resultó viable debido a la disposición del sistema y al uso de tornillos sinfín para transportar el fruto. Así que, se planteó como medida preventiva, la instalación de un imán permanente suspendido en la descarga del elevador de frutos proveniente de la desfrutación, con el fin de retener objetos metálicos antes de su ingreso al digestor.

El desatasco del digestor puede realizarse de forma automática supervisando el consumo de corriente y realizando una inversión temporal del sentido de giro del motor con ayuda de un variador de frecuencia. De este modo, un consumo de corriente bajo se interpreta como una mezcla seca, por lo que se incrementa la inyección de vapor. Un consumo de corriente alto se interpreta como un posible atasco y se ejecuta la inversión de giro del motor para liberar el material obstruido.

Se proponen transmisores indicadores de temperatura, nivel y corriente con salida analógica de 4-20 mA al PLC, para llevar el control de temperatura con una válvula de control tipo ON/OFF y el funcionamiento del tornillo alimentador de fruto al digestor cuando este se llene o se vacíe. La descarga del digestor a la prensa se realiza según el tiempo de digestión configurado en la HMI. Esto se especifica en el **Apéndice A (pp. 58-60)**.

Respecto al prensado, el funcionamiento de la prensa depende de la descarga del digestor y del estado del sistema hidráulico. Actualmente es indispensable monitorear el nivel y temperatura del aceite hidráulico, ya que de este depende el buen funcionamiento de la prensa. Por esta razón, se proponen transmisores de nivel y temperatura con salida analógica de 4-20 mA al PLC, y así bloquear el arranque de la prensa si estas variables están fuera de rango. La prensa se detiene cuando la compuerta de descarga del digestor esté cerrada y la presión hidráulica alcance el punto mínimo indicando que ya no hay masa para prensar. El funcionamiento del tamiz

vibratorio se condiciona por la detección de flujo en el canal de aceite proveniente de la prensa. Se incorporan tiempos de retardo para asegurar el tamizado de todo el aceite prensado. La bomba de transferencia a la clarificación también se ajusta según el caudal del aceite tamizado. Esto se muestra en detalle en el **Apéndice A (pp. 62-63)**.

Clarificación y almacenamiento del aceite. El proceso de clarificación integra varios sistemas y equipos que operan de manera continua, para los cuales se plantearon criterios de control de variables y supervisión desde la HMI.

La temperatura del aceite debe mantenerse entre 80 °C y 95 °C, para asegurar esto, se propuso un control con transmisores de temperatura y válvulas ON/OFF, utilizando bandas de tolerancia e histéresis para evitar conmutaciones frecuentes. Para la medición de nivel de la capa de aceite y lodos en los tanques de decantación, se consideró el uso de transmisores de nivel por radar guiado (GWR), debido a su capacidad para detectar la interfase entre diferentes densidades.

El control del caudal de alimentación en cada tanque se propuso mediante válvulas proporcionales con control lineal basado en bandas de tolerancia. Este enfoque se desarrolló únicamente para el proceso de preclarificación, mientras que para las demás etapas se mantuvo como lineamiento general.

Las purgas de lodos en la parte inferior de los tanques se plantearon de forma temporizada, con parámetros ajustables desde la HMI, según las condiciones del aceite.

La recolección de aceite en el preclarificador se realiza por medio de campanas recolectoras, generalmente estáticas o ajustadas manualmente, lo que limita el control del proceso, puede generar arrastre de lodos y no garantiza un tiempo de residencia adecuado para la decantación. Por ello, se propuso la implementación de un sistema motorizado de desplazamiento

vertical de las campanas, cuyo control se basa en la medición del espesor de la capa de aceite con ayuda de un transmisor de nivel de interfase (GWR). La automatización del preclarificador se presenta en el **Apéndice A (pp. 67–71)**.

El sistema de agitación del clarificador se condiciona a un nivel mínimo en el tanque, y así mantener un adecuado balance hidráulico durante la operación. Este comportamiento se detalla en el **Apéndice A (pp. 75–77)**.

De igual forma, se automatizó el funcionamiento de las centrífugas, incluyendo su secuencia de arranque y la supervisión de los caudales de entrada y salida con transmisores de flujo. Este proceso se describe en el **Apéndice A (pp. 79-80)**.

En el sedimentador solo se requieren el control de temperatura, nivel total y tiempo de residencia. Para esto, se supervisa el caudal de entrada con un transmisor de flujo, el cual puede controlarse con una válvula proporcional o un variador de frecuencia de la bomba de transferencia, tal como se muestra en el **Apéndice A (pp. 83-84)**.

Como se observó en la visita a Bucarelia (**véase Apéndice B**), el proceso de secado se supervisa a través de un vacuómetro analógico y el accionamiento manual de la bomba de vacío. Por ende, la automatización se centra en el arranque automático del secador, el control de la alimentación según el nivel interno y la presión de vacío, y la supervisión mediante instrumentación compatible con el PLC para su monitoreo desde la HMI, como se detalla en el **Apéndice A (pp. 87–88)**.

Para el almacenamiento, se propuso la supervisión de la temperatura, el nivel y el caudal en los tanques. El único control que se planteó corresponde a la temperatura con una válvula de vapor, mientras que el nivel y caudal se monitorean con fines de generar alarmas y registrar la producción de CPO, tal como se describe en el **Apéndice A (p. 91)**.

3.3.3 Desarrollo de la programación

Inicialmente se elaboraron tablas de identificación de entradas y salidas del PLC, tanto digitales como analógicas, organizadas por subproceso, con sus respectivas etiquetas y rangos de operación. A partir de los diagramas de flujo, se definieron los GRAFCET de cada etapa del proceso (**véase Apéndice C**).

El desarrollo de la programación se realizó en el entorno TIA Portal V14, cuyo detalle de código se encuentra en el **Apéndice D**.

Dado que el alcance del proyecto no contempla la implementación física, la validación se realizó por simulación utilizando variables de memoria en lugar de direcciones físicas reales.

La programación se llevó a cabo de manera modular, mediante el uso de bloques de función (Function Blocks) para cada uno de los GRAFCET definidos. Este enfoque facilita la identificación de los subprocesos, así como una mayor flexibilidad para realizar modificaciones o para simplificar la escalabilidad del sistema.

Cada GRAFCET se estructuró en dos partes principales: una destinada a las condiciones de transición entre etapas y otra orientada a la ejecución de las acciones asociadas a cada estado.

La lógica secuencial se programó en lenguaje Ladder por medio de instrucciones SET y RESET, esto facilitó la implementación de las etapas como memorias del sistema.

Cabe destacar que el sistema propuesto puede ser implementado con un único PLC desde el punto de vista del procesamiento y el control, ya que la programación se estructuró de manera modular. Cada subproceso se desarrolló como un bloque independiente, lo que permitió la ejecución completa de la lógica dentro de un solo controlador. Sin embargo, debido a la cantidad de variables involucradas en el proceso, especialmente en términos de entradas y salidas digitales y analógicas, es posible que se requiera la incorporación de módulos adicionales de expansión para

asegurar la disponibilidad de canales suficientes para la conexión de todos los dispositivos de campo.

En el **Apéndice A** se presentan ejemplos representativos de esta automatización, los cuales ilustran diferentes configuraciones de los subprocesos y cuya ubicación se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4.

Ubicación de los ejemplos de programación en el Apéndice A

Subproceso	Páginas de ubicación
Recepción de RFF	43
Esterilización	48-49
Desfrutación de RFF	55-56
Digestión y Prensado	61, 65
Preclarificación	73
Clarificación	78
Centrifugación	81-82
Sedimentación	85-86
Secado al vacío	90
Almacenamiento	92

3.3.4 Diseño de la HMI High Performance

El diseño de una HMI se plantea como elemento fundamental para la supervisión y control del proceso. Esto le permite al operario monitorear la extracción de CPO desde una cabina de control, sin necesidad de exponer su integridad al interactuar directamente con los equipos.

Durante la visita a la extractora Bucarelia (**véase Apéndice B**), se evidenció que su HMI presentaba un diseño convencional, con alta carga visual, uso intensivo de colores y limitada jerarquización de la información. Esto dificultaba la rápida interpretación de las condiciones del proceso. Por esta razón, se propuso el diseño de la HMI bajo la filosofía de High Performance, la cual se enfoca en mostrar la información de manera clara, estructurada y priorizada, facilitando la toma de decisiones.

En el **Apéndice E** se presentan las pantallas diseñadas y programadas en TIA Portal para cada subproceso, en las cuales se representó de forma simplificada la maquinaria involucrada, así como indicadores de nivel, temperatura, presión y caudal. El estado de cada equipo, motor y válvula se indicó mediante el uso de los colores descritos en el **Apéndice A (p. 36)**, así como selección de modos de operación, estado del proceso, pestañas para acceder a los históricos de cada variable, parámetros ajustables, alarmas activas y ajuste de motores.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de clarificación se dividió en el tratamiento de lodos y el tratamiento de aceite crudo, cuyas interfaces se exponen en el **Apéndice A (pp. 93-94)**. Todo se propuso para visualizarse y ajustarse en tiempo real haciendo uso de la gestión de usuarios y niveles de acceso mencionados en el **Apéndice A (p. 95)**.

La pantalla del ajuste de motores permite seleccionar el tipo de arranque de cada motor según lo requiera el equipo, con una configuración predeterminada definida en las labores de prueba. Cualquier modificación está condicionada por la gestión de usuarios. En la HMI se muestran las etiquetas de cada motor y se organizan por proceso, con una pestaña seleccionable de tipos de arranque, tal como se muestra en el **Apéndice A (p. 96)**.

De igual modo, se diseñó una pantalla de ejemplo para la configuración de parámetros de la etapa de la esterilización; esta se presenta en el **Apéndice A (p. 98)**.

En la **Tabla 5** se observa la ubicación de los diseños de las pantallas HMI en el **Apéndice A**.

Tabla 5.

Ubicación de los diseños de las pantallas HMI en el Apéndice A

Subproceso	Página de ubicación
Recepción de RFF	44
Esterilización	50
Desfrutación de RFF	57
Digestión y Prensado	66
Clarificación	74
Tratamiento de Aceite Puro	93
Tratamiento de Lodos	94
Ajuste de Motores	96
Pantalla Principal	97
Parámetros Ajustables Autoclave	98

El sistema de gestión de alarmas propuesto se fundamenta en las recomendaciones de las normas ISA 18.2 e ISA 101 expuestas en el **Apéndice A (p. 37)**, donde se establecen los tipos de alarmas, su simbología, función y prioridad. En la HMI, se sugirió que las alarmas se representaran por medio de símbolos superpuestos sobre los equipos, lo que permite identificar inmediatamente la ubicación de las anomalías.

Adicionalmente, se definió una jerarquía de tablas de alarmas principales para cada subproceso, en las cuales se organiza la información por equipo asociado, descripción de la alarma, prioridad, posibles causas, acción automática del sistema y acción recomendada del operador.

Estas tablas se muestran al final de la descripción de automatización de cada subproceso, como se indica en la **Tabla 6**.

Tabla 6.

Ubicación de las tablas de gestión de alarmas en el Apéndice A

Subproceso	Página de ubicación
Recepción de RFF	42
Esterilización	48
Desfrutación de RFF	55
Digestión y prensado	64
Preclarificación	72
Clarificación	78
Centrifugación	81
Sedimentación	85
Secado al vacío	89
Almacenamiento	92
Alarmas generales	97

3.3.5 Simulación y validación del sistema propuesto

La simulación del sistema tuvo como objetivo validar el funcionamiento de la lógica de control propuesta, verificando la correcta ejecución de las secuencias de operación de los subprocesos, la respuesta del sistema ante condiciones de alarma y la adecuada interacción entre el PLC y las pantallas HMI desarrolladas en TIA Portal.

En el **Apéndice F** se presenta un video demostrativo en el cual se evidencia la simulación realizada mediante PLCSIM. En este se muestra la estructura general de la programación implementada, así como la ejecución de la lógica de control para los diferentes subprocesos contemplados en la guía. Durante la simulación, se comprobó que las secuencias operativas se desarrollaron conforme a lo planteado en el diseño, permitiendo la activación ordenada de equipos y el cumplimiento de las condiciones de operación establecidas.

Adicionalmente, se validó el funcionamiento del sistema de alarmas mediante la simulación de algunas anomalías relacionadas al proceso de clarificación, observándose que las alarmas se activan de acuerdo con los umbrales definidos y generan la respuesta esperada en el

sistema. En cuanto a la interacción con la HMI, se evidenció que las pantallas permiten una visualización clara de las variables del proceso y una navegación intuitiva para el operador.

Debido a la cantidad de variables involucradas en el proceso completo, la validación del sistema de alarmas se realizó sobre un conjunto representativo de estas, considerando que la lógica es replicable para el resto de variables del sistema. De manera similar, no se simularon todos los lazos de control de caudal propuestos, dado que su comportamiento sigue la misma estructura.

Es importante resaltar que la simulación realizada no contempla la dinámica real del proceso industrial, por lo que no se incluyeron tiempos reales de operación, retardos, ni la conversión de variables físicas a señales eléctricas. En este sentido, la validación se centró en la verificación funcional de la lógica de control, más que en el comportamiento físico del proceso.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la lógica desarrollada corresponde a lo esperado, ya que las secuencias de control se ejecutan correctamente, las condiciones de alarma son detectadas de manera adecuada y la interfaz HMI proporciona una interacción clara y funcional.

Por otra parte, durante el desarrollo de la simulación se identificaron algunas limitaciones asociadas al uso del entorno TIA Portal, especialmente en lo relacionado con el diseño de las pantallas HMI. Entre estas se encuentran la disponibilidad limitada de elementos gráficos y restricciones en funcionalidades avanzadas como gestión de históricos, integración con bases de datos y representación de alarmas emergentes según el diseño conceptual. Estas diferencias se evidencian en el **Apéndice E**, donde se comparan las pantallas HMI diseñadas con las implementadas, mostrando ajustes principalmente en la distribución de los elementos en las mismas.

3.4 Elaboración de la guía de automatización

El objetivo principal de este trabajo era la elaboración de una guía de automatización técnica, estructurada y aplicable que sirviera como base para el diseño e implementación de sistemas de control automáticos en plantas de extracción de aceite de palma. La guía se diseñó con un enfoque técnico y de ingeniería, por lo que va dirigida a estudiantes, técnicos e ingenieros interesados en la automatización de la industria palmera en Colombia (**véase Apéndice A**).

3.4.1 Estructura de la guía

El contenido de la guía se estructuró en ocho (8) capítulos, comenzando por la introducción, el glosario y la normativa, con el fin de que el lector comprenda el contexto general y los lineamientos legales que fundamentan el desarrollo del documento.

El capítulo cuatro (4) se enfocó en la descripción técnica del proceso y sus requerimientos de control, donde se explicaron en detalle las etapas de la extracción de CPO, los equipos involucrados y las variables de operación. Su propósito es informar sobre el funcionamiento de la línea de extracción, especialmente a aquellos que no están familiarizados con el sector palmero.

Los aspectos que conforman el sistema de automatización se definieron en el capítulo cinco (5). Su finalidad es brindar una base conceptual sobre el PLC, la interfaz HMI, los protocolos de comunicación, la instrumentación requerida y la gestión de alarmas. Este conocimiento es indispensable antes de abordar su aplicación en cada subproceso.

El capítulo seis (6) referente al planteamiento de la automatización del proceso, se decidió dividirlo en siete secciones referentes a cada uno de los subprocesos. La etapa de clarificación comprende siete subsecciones correspondientes a cada fase del tratamiento del aceite y los lodos. Para cada subproceso se realizó en el orden respectivo: una descripción de la lógica operacional

automatizada, diagramas de flujo con las secuencias de operación y las variables previamente mencionadas, tablas de entradas y salidas (digitales - analógicas) del PLC y sus rangos de funcionamiento, tablas para la gestión de alarmas principales, programación representativa en TIA Portal en lenguaje Ladder, diseño de la interfaz HMI y su justificación. Por último, para algunos subprocesos se mencionó una recomendación específica de instrumentación con su referencia y características relevantes.

Al finalizar este apartado, se hizo énfasis en algunos criterios y consideraciones generales de la automatización del proceso, como la gestión de usuarios, seguridad del sistema, paradas de emergencia, enclavamientos, modos de operación, escalabilidad y replicación del sistema y otras configuraciones operativas a tener en cuenta.

En el capítulo siete (7) se sintetiza el enfoque general de la guía, incluyendo su objetivo y las consideraciones clave sobre las cuales fue desarrollada, como las fuentes de información empleadas y su carácter adaptable a diferentes configuraciones de planta. Además, se colocaron los enlaces correspondientes al material de programación para ser utilizado por los interesados.

3.4.2 Recomendaciones de instrumentación

Debido a que el diseño de automatización requiere de instrumentación compatible con el PLC y adecuada para las condiciones reales de cada subproceso, se propuso la selección de dispositivos industriales cuyas características técnicas permiten la conexión directa al PLC y facilitan el monitoreo y control por medio de la HMI.

La recomendación de cada instrumento en el **Apéndice A** se encuentra al finalizar la propuesta de automatización de cada subproceso e incluye aspectos importantes como la referencia

comercial, rango de operación, su robustez frente a condiciones críticas, entre otros. En la **Tabla 7** se detalla la referencia sugerida en el **Apéndice A** de cada dispositivo por subproceso.

Además, el enlace a las fichas técnicas correspondientes a cada uno de los elementos sugeridos se encuentra en el apartado de referencias de la guía (**véase Apéndice A, p. 105**).

Tabla 7.

Referencias de dispositivos recomendados para cada subproceso

Subproceso	Dispositivo	Referencia
Recepción y unidad de transferencia	Sensor fotoeléctrico	SICK WTB250-2P2441
	Final de carrera	Omron D4N
Esterilización	Transmisor de presión manométrica	Endress+Hauser Cerabar PMC51
	Transmisor de temperatura	Rosemount 3144p
	Sensor de temperatura	RTD PT100 – 3 Hilos
Desfrutación	Interruptor de nivel	ifm KI5082
	Transmisor de corriente	LEM DHR 100 C420
	Imán permanente suspendido	Eriez Suspended Magnet
Digestión	Transmisor de nivel	Endress+Hauser Micropilot FMR62
	Variador de frecuencia	Siemens SINAMICS G120
Prensado	Transmisor de presión hidráulica	WIKA S-20
	Transmisor de flujo	Proline Promass F 300 Coriolis
Clarificación	Transmisor de nivel (GWR)	VEGA VEGAFLEX 81
	Transmisor de posición vertical	Turck VL-Q Series LVDT
Secador de vacío	Transmisor de presión de vacío	WIKA A-10
		VEGA VEGABAR 82

Cabe resaltar que estos dispositivos no son de carácter obligatorio, sino que funcionan como una base orientativa en el proceso de selección e implementación, la cual puede adaptarse según la disponibilidad, costos, capacidad y requerimientos de cada planta extractora.

4. Conclusiones

Se logró estructurar una guía estandarizada para la automatización del proceso de extracción de aceite de palma crudo (CPO), integrando de manera coherente los elementos de instrumentación, control, programación en PLC y supervisión mediante HMI, esto consolida el proceso como un sistema unificado y facilita su comprensión y aplicación en plantas del sector palmicultor.

El análisis detallado de cada etapa del proceso de extracción del aceite de palma evidenció la interdependencia entre variables como presión, temperatura, nivel y flujo, lo que condujo a la definición de una arquitectura de control consistente con las condiciones operativas de plantas con capacidad de procesamiento de 8–10 Ton/H de RFF, evitando soluciones fragmentadas o aisladas.

La visita técnica a la extractora Bucarelia permitió evidenciar diferencias entre las prácticas actuales de operación y el potencial de automatización del proceso, especialmente en aspectos como el monitoreo en tiempo real, la gestión de alarmas y la reducción de la intervención manual. Estas condiciones orientaron directamente las decisiones de diseño adoptadas en la guía.

La propuesta de automatización para el proceso de extracción de aceite de palma, plantea una transición desde esquemas basados en instrumentación analógica y operación manual hacia sistemas digitales programables, lo cual no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también reduce la exposición del operario a condiciones de riesgo y disminuye la dependencia de la supervisión constante.

La estructuración de la lógica de control en lenguaje Ladder, mediante bloques funcionales y variables organizadas, establece una base escalable y sostenible, alineada con prácticas industriales que facilitan futuras ampliaciones o integraciones al sistema de automatización.

La validación mediante simulación en TIA Portal confirmó la coherencia funcional del diseño, evidenciando que las secuencias de operación, la gestión de alarmas y la interacción HMI–PLC responden de acuerdo con lo planteado, aun cuando no se modelaron las dinámicas físicas reales del proceso.

El desarrollo de las interfaces HMI bajo criterios de alto desempeño planteó una mejora considerable frente a los sistemas observados en planta, al priorizar la claridad visual, la jerarquización de la información y el apoyo a la toma de decisiones del operario.

Se identificó que, aunque herramientas como TIA Portal permiten implementar soluciones de automatización completas, presentan ciertas limitaciones en aspectos como el diseño avanzado de interfaces, lo cual debe considerarse en futuras implementaciones industriales.

Finalmente, la guía desarrollada no solo responde a la necesidad de modernización de sistemas analógicos en la industria palmera, sino que también establece una base metodológica que puede ser adaptada y extendida a diferentes configuraciones de planta, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y optimización del proceso.

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)
- Bentley, J. P. (2005). *Principles of measurement systems* (4th ed.). Pearson.
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers* (6th ed.). Newnes.
- Cala Gaitán, G., & Bernal Castillo, G. (2008). *Procesos modernos de extracción de aceite de palma*. Fedepalma. <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107713>
- Cenipalma. (2025). *Mejores prácticas en plantas de beneficio: oportunidades de mejora a partir del índice de balance tecnológico* (Boletín técnico N.º 49). <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/issue/view/1721>
- Fedepalma. (2024). *Desempeño del sector palmero en 2023 y perspectivas 2024*. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/142875>
- Groover, M. P. (2015). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Pearson.
- Hollifield, B., Oliver, D., Nimmo, I., & Habibi, E. (2008). *The High Performance HMI Handbook*. Plant Automation Services, Inc.
- Organización Internacional del Trabajo. (2020). *Identificación rápida en seguridad y salud en el trabajo (SST) en la planta extractora de aceite de palma en Colombia*. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/@sro-lima/documents/publication/wcms_760454.pdf
- Wambeck, N. (2005). Sinopsis del proceso de la palma de aceite (G. A. Bernal C. & G. Cala G., Trad.). Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma).