

Diseño de una Guía para la Automatización de Calderas Híbridas de 10 a 20 Toneladas para la
Industria de Aceite de Palma Nacional.

Brayan Andrés Celis Godoy y Miguel Aim García Villamizar

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

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 Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Con amor y cariño dedico este proyecto a mi madre Elsa Yohana, quien fue mi base fundamental para poder conseguir esto y ser la persona que soy actualmente. Gracias por todo.

A mis familiares cercanos e importantes para mí: mi padre, mis abuelas, por apoyarme todo el tiempo que duré; y orgulloso puedo decir: se logró.

Con cariño y afecto a todos aquellos que Dios ha puesto en mi camino y me han ayudado de buena o mala manera; por aquellos que están y siguen, ojalá continuemos en este camino, y para los que ya no están, desearles lo mejor. Con mucho amor a todos.

Brayan Andrés Celis Godoy

Dedico este proyecto con todo mi cariño a mis padres y a mi hermano, quienes han sido mi fuerza, mi refugio y mi mayor inspiración desde que era niño. Su amor incondicional, sus palabras de aliento y su fe en mí han sido el motor que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Cada paso que hoy celebro es también un reflejo de su entrega, sacrificio y apoyo inquebrantable.

También quiero dedicar este logro a mis familiares, amigos y a todas las personas que han cruzado mi camino, dejando huellas imborrables en mi vida. A quienes me acompañaron con afecto y sabiduría, y también a quienes ya no están presentes, pero que con sus enseñanzas y momentos compartidos han contribuido a mi crecimiento. Gracias por ser parte de esta historia.

Miguel Aim García Villamizar

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que brindaron su apoyo, conocimientos y tiempo para la realización de este proyecto.

En especial, agradecemos a la ingeniera **Angie Lizcano**, encargada de la planta de Bucarelia, quien nos recibió en las instalaciones y compartió información valiosa sobre el proceso, así como detalles prácticos del funcionamiento y operación de la caldera.

De igual manera, extendemos nuestro agradecimiento a la ingeniera **Catherin Guerrero** de la empresa Tecnova Ingeniería, quien facilitó el contacto inicial y contribuyó con su conocimiento del sector, así como al profesor **Hernando Guerrero** y **María Alejandra Hakspiel** cuyo apoyo y orientación representaron un impulso fundamental durante el desarrollo del proyecto.

Agradecemos también a **Abel Domínguez**, creador del canal de YouTube *Programación Multidisciplinar*, por compartir de forma clara y accesible sus conocimientos sobre programación de PLC en **TIA Portal**, cuyas explicaciones y ejemplos prácticos fueron de gran utilidad para comprender y aplicar distintas funcionalidades del software durante el desarrollo del proyecto.

A todos ellos, nuestro reconocimiento y gratitud por su colaboración, que enriqueció significativamente el alcance y la calidad de este trabajo.

Contenido

| | Pág. |
|---|-------------|
| Introducción | 13 |
| 1. Objetivos | 15 |
| 1.1 Objetivo General | 15 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 2. Marco Teórico..... | 16 |
| 3. Desarrollo de la Solución..... | 19 |
| 3.1 Normativas Aplicables..... | 19 |
| 3.1.1 Normativas Nacionales | 19 |
| 3.1.2 Normativas Internacionales | 20 |
| 3.2 Información Técnica de la Caldera | 21 |
| 3.3 Caracterización del Proceso | 22 |
| 3.3.1 Diseño Conceptual de la Automatización..... | 24 |
| 3.3.2 Instrumentación y Elementos de Campo | 25 |
| 3.3.3 Diseño de Pantallas HMI | 29 |
| 3.4 Seguridad Operativa y Consideraciones | 33 |
| 3.5 Simulación y Validación..... | 33 |
| 4. Diseño de la Guía..... | 35 |
| 5. Conclusiones | 36 |
| Referencias..... | 38 |
| Apéndices..... | 39 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. <i>Caldera industrial en operación de la empresa Bucarelia durante la visita técnica.</i> | 22 |
| Figura 2. <i>Descripción del control del sistema de agua.</i> | 23 |
| Figura 3. <i>Descripción del control del sistema de depresión.</i> | 24 |
| Figura 4. <i>Sugerencia en selección de instrumentos.</i> | 26 |
| Figura 5. <i>Ejemplo de nomenclatura de variables.</i> | 29 |
| Figura 6. <i>Descripción del sistema de monitoreo.</i> | 32 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. <i>Instrumentación y Elementos de Campo</i> | 27 |
| Tabla 2. <i>Diseño de Pantallas HMI</i> | 30 |

Lista de Apéndices

A continuación, se presentan los Anexos que complementan el desarrollo del proyecto. Estos incluyen la guía técnica, documentos gráficos, archivos de programación y fichas técnicas que respaldan y amplían la información expuesta en el informe.

Apéndice A. Guía para la automatización de calderas híbridas de 10 a 20 toneladas para la industria de aceite de palma nacional

Apéndice B. Documento de pantallas del HMI.

Apéndice C. Informe de programación generado en TIA Portal.

Apéndice D. Documento de imágenes sobre la salida Bucarelia utilizadas.

Apéndice E. Ejemplo de fichas técnicas resueltas para distintos instrumentos.

Apéndice F. Ficha técnica de instrumentos de medición (plantilla).

Apéndice G. Ficha técnica de dispositivo de control lógico (plantilla).

Apéndice H. Ficha técnica de actuadores de potencia (plantilla).

Apéndice I. Video de simulación de la programación de Factory I/O con TIA Portal.

Apéndice J. Consulta de Precios PLC Y HMI

Glosario

Acuatubular (caldera): tipo de caldera en la que el agua circula dentro de los tubos y los gases calientes rodean los tubos para generar vapor.

Automatización: proceso mediante el cual se implementan sistemas de control automático para optimizar y supervisar la operación de equipos industriales.

Biomasa: material orgánico utilizado como fuente de energía, comúnmente empleado en calderas industriales para la combustión.

Caldera: dispositivo utilizado para generar vapor mediante la transferencia de calor a un fluido.

Combustión: proceso químico de oxidación en el que un combustible se combina con oxígeno para liberar energía en forma de calor.

Control PID: método de control utilizado en sistemas industriales que ajusta la respuesta de un proceso mediante términos proporcional, integral y derivativo.

Controlador Lógico Programable (PLC): dispositivo electrónico programable utilizado para el control de procesos industriales.

Convertidor ADC (Analog-to-Digital Converter): dispositivo que transforma señales analógicas en digitales para ser procesadas por un PLC u otro sistema de control.

Caudal: medida del flujo de un fluido a través de un sistema en un período de tiempo determinado.

Diagnóstico de fallos: procedimiento para detectar y corregir errores o anomalías en el funcionamiento de un sistema automatizado.

Eficiencia energética: capacidad de un sistema para optimizar el uso de la energía, reduciendo pérdidas y mejorando el rendimiento.

Enlace de comunicación industrial: protocolo de comunicación utilizado para interconectar dispositivos en una red de automatización.

HMI (Human-Machine Interface): interfaz gráfica que permite la interacción entre un operador y el sistema de control automatizado.

Instrumentación: conjunto de sensores, transmisores y actuadores utilizados para la medición y control de variables en un proceso industrial.

Ladder (Lenguaje Ladder): lenguaje de programación basado en diagramas de escalera, utilizado en la programación de PLCs para control de procesos industriales.

Lazo de control: sistema de regulación de una variable de proceso mediante el uso de

Mantenimiento predictivo: estrategia de mantenimiento basada en la predicción de fallas mediante el monitoreo continuo de variables del sistema.

Normativas técnicas: conjunto de regulaciones y estándares que rigen el diseño, operación y mantenimiento de sistemas industriales.

Pirotubular (caldera): tipo de caldera en la que los gases calientes circulan por los tubos y el agua rodea estos tubos para generar vapor.

Presión de vapor: fuerza ejercida por el vapor generado dentro de la caldera.

Protocolos de comunicación industrial: conjunto de normas y reglas que permiten la comunicación entre dispositivos de control en una red de automatización.

RTC (Reglamento Técnico de Calderas): normativa nacional que establece los requisitos técnicos para la operación de calderas en Colombia.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): sistema de supervisión y adquisición de datos utilizado para el control y monitoreo de procesos industriales.

Seguridad funcional: capacidad de un sistema para operar sin riesgos inaceptables para los operadores y el entorno.

TIA Portal: software de Siemens para la programación y configuración de PLCs, HMIs y otros dispositivos de automatización.

Transductor: dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica medible.

Válvula de alivio: dispositivo de seguridad que permite liberar presión excesiva en la caldera para prevenir explosiones.

Variable de proceso: parámetro medido y controlado en un sistema industrial, como temperatura, presión o caudal.

Resumen

Título: Diseño De Una Guía Para La Automatización De Calderas Tipo Acuatubular Y Piro tubular De 10 A 20 Toneladas De Capacidad Para La Industria De Aceite De Palma Nacional.*

Autor: Brayan Andrés Celis Godoy y Miguel Aim García Villamizar**

Palabras Clave: Palabras clave: Automatización, Calderas industriales, Aceite de palma, Control PID, PLC, HMI, Instrumentación.

Descripción: Este trabajo de grado presenta el diseño de una guía técnica para la automatización de calderas industriales tipo acuatubular y piro tubular con capacidades de 10 a 20 toneladas de generación de vapor, enfocada en las condiciones operativas propias de la industria de aceite de palma en Colombia. La propuesta surge ante la necesidad de modernizar el control de estos equipos, integrando tecnologías como PLCs, sensores industriales, controladores PID e interfaces HMI.

Se realizó una caracterización de los subsistemas principales de la caldera (combustión, alimentación de agua, tiraje, presión y monitoreo), identificando las variables relevantes que influyen en su funcionamiento. Con base en una visita técnica, normativas nacionales e internacionales y documentación especializada, se definió un esquema de automatización centralizado, se seleccionaron dispositivos de campo y se desarrolló la lógica de control. El resultado fue la elaboración de una guía que incluye principios técnicos, criterios de selección de componentes, ejemplos de programación y diseño de pantallas HMI.

Este documento busca servir como referencia para estudiantes, técnicos e ingenieros vinculados al sector palmero, brindando orientaciones claras para la implementación de automatización en sistemas térmicos industriales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia, Magíster en Dirección de Empresas MBA. Codirector: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Magíster en Potencia Eléctrica

Abstract

Title: Design of a Guide for the Automation of Water-Tube and Fire-Tube Boilers with a Capacity of 10 to 15 Tons for the National Palm Oil Industry. *

Author(s): Brayan Andrés Celis Godoy y Miguel Aim García Villamizar. **

Key Words: Automation, Industrial boilers, Palm oil, PID control, PLC, HMI, Instrumentation.

Description: This undergraduate thesis presents the design of a technical guide for the automation of water-tube and fire-tube industrial boilers with steam generation capacities between 5 and 8 tons, adapted to the operational context of the palm oil industry in Colombia. The project responds to the need to update the control of these systems through the integration of technologies such as PLCs, industrial sensors, PID controllers, and HMI interfaces.

A technical characterization was conducted for the main functional subsystems of the boiler (combustion, water feed, draft, pressure, and monitoring), identifying the key variables involved in its operation. Based on field visits, national and international regulations, and technical documentation, a centralized control scheme was defined, specific field devices were selected, and the control logic was developed. The outcome was the creation of a guide including technical principles, component selection criteria, programming examples, and HMI screen designs.

This document is intended as a reference for students, technicians, and engineers working in the palm oil sector, providing clear guidelines for the implementation of automation in thermal systems.

* Bachelor's Thesis

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA. Co-director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Master in Electrical Power Engineering

Introducción

En Colombia, la industria del aceite de palma constituye un pilar de la economía agrícola y un sector estratégico desde el punto de vista energético y ambiental. Según la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA, 2023), este sector aportó un 12.1% al PIB agrícola nacional en 2023 y alcanzó una producción de 1.84 millones de toneladas de aceite crudo, con un crecimiento del 4.1% frente al año anterior. Este escenario evidencia la necesidad de optimizar procesos productivos, en particular la operación de calderas, que representan el núcleo energético de las plantas extractoras.

La operación manual o semiautomatizada de calderas tipo acuatubular y pirotubular implica riesgos de nivel 5, tales como exposición a altas temperaturas, vapores, golpes y potenciales explosiones por fallas en la manipulación de instrumentos. A ello se suman ineficiencias energéticas y dificultades en el control de variables críticas como temperatura, presión, caudal y combustión.

Ante este panorama, se plantea el diseño de una guía técnica de automatización de calderas que integre instrumentación industrial, controladores automáticos, interfaces HMI y programación en Ladder. Su propósito es mejorar la eficiencia energética, garantizar la seguridad operativa y asegurar el cumplimiento normativo vigente, aportando al mismo tiempo a los objetivos nacionales de sostenibilidad y competitividad.

El presente trabajo propone una guía enfocada en calderas híbridas de 10 a 20 toneladas de vapor por hora, adaptada a las condiciones reales del sector palmero colombiano. Su finalidad es establecer lineamientos claros y aplicables que permitan a las empresas implementar soluciones de control automatizado de manera efectiva.

La investigación resalta la importancia de las calderas en el sistema térmico de las plantas extractoras, donde una operación eficiente puede traducirse en ahorros energéticos significativos y reducción de emisiones contaminantes. Asimismo, la automatización contribuye a minimizar riesgos laborales asociados al manejo manual de equipos a presión, en concordancia con las exigencias normativas y de eficiencia energética (Ministerio de Minas y Energía, 2022).

El estudio se desarrolló con un enfoque técnico-descriptivo, basado en la revisión documental de normativas nacionales, estándares de automatización y estudios de caso relevantes, complementado con información estadística del contexto colombiano para asegurar la pertinencia local de las recomendaciones. La guía se centra en prácticas y tecnologías estándar de automatización, excluyendo el desarrollo de modelos de control avanzados como sistemas predictivos o adaptativos. Además, se incluyen análisis detallados sobre las regulaciones vigentes, entre ellas la Resolución 1857 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía y las exigencias ambientales del Ministerio de Ambiente (2024), garantizando el cumplimiento legal para la operación de calderas en el sector palmero nacional.

De esta manera, el desarrollo de la investigación se sustenta en un objetivo general fundamental y en una serie de objetivos específicos que orientan la propuesta hacia su aplicación práctica:

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una guía para la automatización de calderas híbridas de 10 a 20 toneladas de vapor para la industria de aceite de palma nacional.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los parámetros técnicos de los sensores y sistemas de control, así como las normativas aplicables a su implementación en calderas híbridas con capacidades de 10 a 20 toneladas de vapor, y desarrollar las fichas técnicas correspondientes para cada sensor.

Desarrollar la metodología para el diseño de automatización de calderas híbridas en la industria del aceite de palma, considerando la selección de elementos y controladores adecuados según el análisis de costo-beneficio, así como las sugerencias para las competencias básicas de operación de los trabajadores.

Aplicar la metodología desarrollada para proponer una alternativa de diseño de automatización y control de calderas híbridas de 10 a 20 toneladas de vapor, que sirva como ejemplo práctico en la guía final del proyecto.

2. Marco Teórico

Una caldera es un equipo térmico diseñado para transferir la energía contenida en los combustibles al agua, mediante un proceso de combustión, con el objetivo de generar vapor. Este vapor es ampliamente utilizado en distintas operaciones industriales, tales como la generación de energía eléctrica, procesos de cocción, limpieza, esterilización, entre otros. En el caso particular de la industria palmera, el vapor resulta esencial para la esterilización del fruto, la separación del aceite y el suministro de energía auxiliar (FEDEPALMA, 2023).

El control de la presión del vapor producido en la caldera es un aspecto crítico, ya que, junto con la temperatura, determina la cantidad de energía disponible en el sistema (Rivas et al., 2000). Por ello, es fundamental regular esta variable, lo cual se logra ajustando el flujo de combustible hacia el quemador. Al modificar dicha alimentación, se altera la cantidad de calor transferido al agua, lo que incide directamente en la producción de vapor y, por tanto, en la presión interna de la caldera.

Existen diversos criterios técnicos para clasificar las calderas de vapor, ya que su diseño y funcionamiento pueden variar según las condiciones operativas y los requerimientos del proceso. A continuación, se presentan algunas de las clasificaciones más utilizadas en el entorno industrial (Alonso Valle, 1996):

Las calderas industriales pueden clasificarse a partir de diversos criterios técnicos, entre ellos la disposición de los fluidos de trabajo, el tipo de combustible utilizado y el rango de presión de operación. Estas clasificaciones permiten establecer diferencias clave en su diseño, funcionamiento y aplicación.

Según la disposición de los fluidos, las calderas se dividen principalmente en dos tipos:

Calderas acuotubulares: El agua circula por el interior de los tubos, mientras que los gases calientes de la combustión los rodean externamente. Este tipo es común en aplicaciones de alta capacidad o presión.

Calderas pirotubulares: Los gases calientes circulan por el interior de los tubos, que se encuentran sumergidos en agua. Este diseño es habitual en instalaciones de menor escala o en donde se busca una respuesta térmica rápida.

Según el tipo de combustible, las calderas pueden ser:

De carbón, diseñadas para combustión sólida tradicional.

De combustibles líquidos, como diésel o fuelóleo.

De combustibles gaseosos, como gas natural o gas licuado del petróleo (GLP).

De combustibles especiales, como licor negro (en la industria papelera) o residuos vegetales (frecuentes en la industria del aceite de palma).

Policombustibles, capaces de operar con más de un tipo de combustible, dependiendo de la disponibilidad y la configuración del quemador.

Según la presión de operación, las calderas se clasifican en:

Baja presión: Hasta 1 bar, utilizadas en procesos de baja exigencia térmica.

Media presión: Entre 1 y 13 bares, típicas en procesos industriales intermedios.

Alta presión: Superiores a 13 bares, requeridas en aplicaciones donde se demanda una alta transferencia de energía térmica o generación de potencia.

El funcionamiento seguro y eficiente de una caldera depende del monitoreo y control preciso de diversas variables. La presión del vapor es una de las más relevantes, ya que influye directamente en la eficiencia energética del sistema (Rivas et al., 2000). De igual forma, el nivel

de agua debe mantenerse dentro de márgenes seguros para evitar tanto el sobrecalentamiento como el arrastre de agua al sistema de vapor, lo cual afectaría la calidad del mismo (Alonso Valle, 1996).

Otras variables importantes incluyen la temperatura de combustión, que incide en el rendimiento térmico, y la depresión o tiraje inducido, responsable de garantizar una correcta evacuación de los gases de combustión, evitar el retroceso de gases peligrosos y asegurar una combustión estable (Alonso Valle, 1996).

En este contexto, la automatización industrial se consolida como una herramienta fundamental para mejorar el control y la eficiencia de las calderas. Se define como la aplicación de tecnologías que permiten operar procesos industriales sin la intervención humana constante, mejorando la eficiencia, la seguridad y la calidad del producto final (Totvs LATAM, 2024).

En sistemas térmicos como las calderas, la automatización permite controlar de manera precisa variables como la presión, la temperatura, el nivel de agua y el flujo de gases. Esto se logra mediante la implementación de Controladores Lógicos Programables (PLC), sensores, válvulas de control, actuadores y sistemas de supervisión HMI (Interfaz Hombre-Máquina). Estos dispositivos permiten el monitoreo en tiempo real, el registro de datos históricos, la generación de alarmas y la ejecución automática de acciones correctivas ante cualquier desviación de los parámetros establecidos (Rodríguez Vásquez, 2006).

Una estrategia de control ampliamente adoptada en este tipo de procesos es el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), debido a su capacidad para mantener la estabilidad del sistema frente a perturbaciones.

3. Desarrollo de la Solución

Para el presente proyecto, en busca de abordar el problema desde una perspectiva técnica y contextual, se efectuó un enfoque mixto de investigación descriptivo y no experimental, el cual se basa en la observación, recolección y análisis de información existente relacionada con variables operativas de las calderas, así como en la comprensión de las condiciones reales de operación en la industria de extracción de aceite de palma. Parte de la información fue adquirida y comprobada por medio de simulaciones y análisis estructurados.

El desarrollo metodológico se organizó en las siguientes fases. Con el fin de ampliar y respaldar la información presentada en este informe, se incluye como material complementario el Anexo A: Guía para la automatización de calderas híbridas de 10 a 20 toneladas para la industria de aceite de palma nacional, en el cual se encuentran detalles técnicos, diagramas, ejemplos de programación y otros contenidos que sirven de apoyo a los apartados que se describen a continuación.

3.1 Normativas Aplicables

Se realizó una investigación documental orientada a identificar las normativas, reglamentos e indicaciones técnicas que deben ser consideradas al momento de diseñar o automatizar una caldera industrial mediante la navegación en diferentes entidades gubernamentales como el ministerio de minas y energía, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, ICONTEC, ministerio de trabajo, etc.

3.1.1 Normativas Nacionales

Reglamento Técnico de calderas (RTC, Ministerio de minas y energía): Define los requisitos de seguridad, operación y mantenimiento para calderas industriales en Colombia además

de exigir certificaciones para calderas nuevas y pruebas periódicas de integridad estructural y especifica la periodicidad de inspecciones y mantenimiento obligatorio.

Resolución 1857 de 2024 (MinMinas): Establece lineamientos actualizados para la eficiencia energética y reducción de emisiones en calderas industriales. Obliga a implementar sistemas de monitoreo continuo en calderas de alto consumo energético y Exige la medición y reporte de consumo de combustibles, emisiones de CO₂ y eficiencia térmica.

Resolución 909 de 2008 (MinAmbiente): Regula las emisiones contaminantes en fuentes fijas, incluyendo calderas industriales. Define límites de concentración de NO_x, SO_x, CO y material particulado además de obligar a instalar sistemas de tratamiento de gases o tecnologías de reducción de emisiones.

Resolución 2400 de 1979 (MinTrabajo): Establece medidas de seguridad para el manejo de calderas en ambientes industriales. Define los equipos de protección personal (EPP) requeridos para operarios de calderas y establece protocolos de capacitación obligatoria para los operarios.

3.1.2 Normativas Internacionales

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC, Sección I y VIII): Regula los estándares de construcción y operación de calderas a nivel internacional. Define los límites de presión y materiales permitidos.

ISO 12100 – Seguridad de máquinas: Establece principios generales de seguridad en sistemas industriales automatizados.

IEC 61511 – Seguridad funcional en la industria de procesos: Define requisitos para sistemas instrumentados de seguridad (SIS) en plantas industriales.

3.2 Información Técnica de la Caldera

Se realizó una revisión documental orientada a comprender la estructura y operación de calderas industriales, abordando sus principios, componentes y sistemas asociados. Simultáneamente, se analizó el entorno de la industria del aceite de palma en Colombia, considerando desde las plantaciones hasta las empresas diseñadoras de calderas, con el fin de contextualizar su funcionamiento en condiciones reales.

Este análisis se complementó con una visita técnica realizada a la empresa Bucarelia, una extractora de aceite de palma que opera una caldera híbrida de 13.2 toneladas de vapor por hora y presión máxima de trabajo de 150 psi, cuya capacidad se encuentra dentro del rango establecido como objetivo para este proyecto.

El equipo se encuentra en funcionamiento desde el año 2020, por lo que, aunque cuenta con varios años de operación, no se considera obsoleto y mantiene una lógica de control y componentes tecnológicos relativamente modernos.

Durante la visita se realizaron entrevistas semiestructuradas con el personal técnico y operativo, lo que permitió validar la información teórica, conocer prácticas actuales y detectar requerimientos específicos del sistema. Como soporte visual de esta visita, se incluye el Anexo D. Documento de imágenes de la salida Bucarelia utilizadas, donde se presentan fotografías capturadas durante el recorrido.

Figura 1.

Caldera industrial en operación de la empresa Bucarelia durante la visita técnica.

**3.3 Caracterización del Proceso**

Durante el análisis del funcionamiento de las calderas acuotubulares y piro-tubulares se identificó que el proceso puede organizarse en cinco subsistemas funcionales: combustión, alimentación de agua, control de presión, tiraje y monitoreo. Cada uno depende de variables operativas interrelacionadas, cuya caracterización permitió ubicar los puntos críticos del proceso y orientar decisiones de automatización. Entre las variables más relevantes se encuentran:

Presión de vapor, asociada al subsistema de control de presión, regulada actualmente de forma manual mediante válvulas de purga o ajuste de combustión, y utilizada también como señal de alerta en tanques y precalentadores. Infiuye en los subsistemas de combustión y alimentación de agua.

Nivel de agua, clave para la estabilidad térmica, actualmente controlado de forma visual y manual. Pertenece al subsistema de alimentación de agua.

Caudal de biomasa, generalmente no instrumentado, cuyo control empírico afecta la estabilidad del subsistema de combustión.

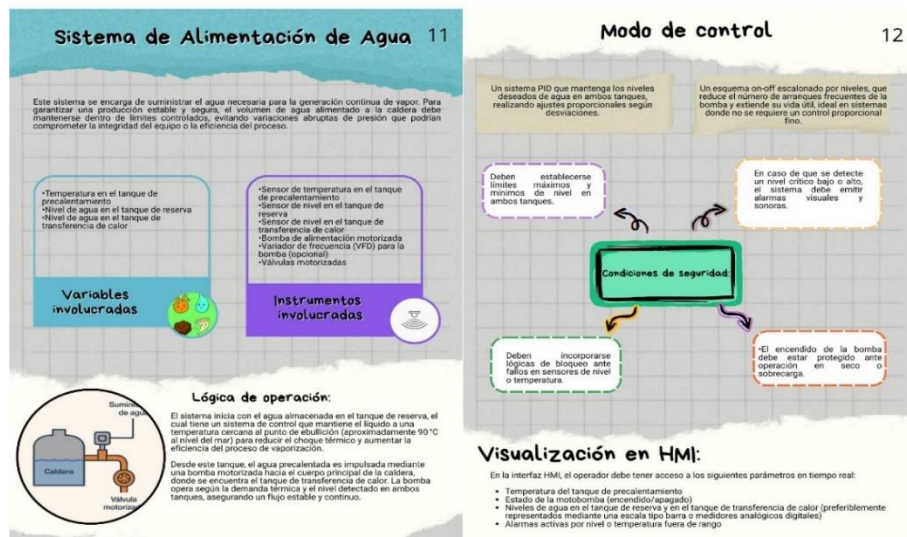
Presión de tiraje, relacionada con la evacuación de gases. Se regula mediante ventiladores o compuertas, incidiendo en el subsistema de tiraje inducido.

Variables eléctricas auxiliares, como el estado de bombas y ventiladores, que se gestionan de forma independiente mediante señales ON/OFF. Distribuidas en los subsistemas de soporte.

Para cada uno de estos subsistemas se realizó una caracterización detallada, representando gráficamente las variables de entrada, el tipo de controlador utilizado y los actuadores que intervienen, además de un ejemplo de la lógica de programación aplicada en el PLC.

Figura 2.

Descripción del control del sistema de agua.



En la Figura 2 se presenta el caso del Sistema de Alimentación de Agua, donde el nivel en la caldera es monitoreado mediante un sensor, comparado con umbrales de activación y desactivación, y controlado a través de un comparador con histéresis o un controlador PID. A partir

Como ejemplo, en la Figura 3 se presenta el caso del Sistema de Depresión (Tiraje inducido), donde se muestra cómo la presión diferencial entre el hogar y el cabezal se compara con un punto de consigna (set point) y es regulada por medio de un controlador PID. Este controlador ajusta la velocidad del ventilador de tiro inducido a través de un variador de frecuencia, garantizando así una evacuación adecuada de gases de combustión y condiciones estables en la cámara de combustión. La representación incluye tanto la estructura de bloques del control como la lógica de programación aplicada en el PLC, ilustrando el patrón metodológico empleado para caracterizar y programar cada subsistema de la caldera.

3.3.2 Instrumentación y Elementos de Campo

Como parte del desarrollo del diseño de automatización, uno de los primeros pasos que realizamos fue la selección de instrumentos y elementos de campo, considerando tanto el conocimiento previo del funcionamiento de las calderas como la información obtenida de fuentes técnicas verificadas. Para esto, tomamos como base el manual de operación de la empresa, los principios de funcionamiento térmico e hidráulico de las calderas y los planos mecánicos disponibles.

Con base en el análisis realizado, se identificaron los dispositivos esenciales para las funciones de medición, control y supervisión dentro del sistema de caldera. La selección comprendió los siguientes elementos: un transmisor de presión de vapor instalado en la caldera pirotubular; un transmisor de presión diferencial ubicado en el hogar, utilizado para el monitoreo del tiraje; transmisores de nivel en el domo y tanques de agua; transmisores de temperatura distribuidos en la cámara de combustión, el precalentador y las líneas de agua; válvulas de seguridad y válvulas de control para regular la entrada de agua; bombas de alimentación para el suministro de agua al sistema; ventiladores de aire y un ventilador de tiro inducido para la gestión

del flujo de gases; y un actuador encargado de la inyección de biomasa, específicamente fibra de palma. Cada uno de estos componentes ha sido referenciado y descrito en el desarrollo correspondiente de los subsistemas del proceso, de acuerdo con su función operativa.

Figura 4.

Sugerencia en selección de instrumentos.

Sugerencias selección de instrumentos 40

Al seleccionar instrumentos para el sistema de automatización de una caldera, es importante tener en cuenta los siguientes criterios técnicos para asegurar su funcionalidad, durabilidad y precisión:

- **Rango de Medición Adecuado:** El rango del instrumento debe superar el rango operativo del proceso, incluyendo un margen de seguridad que evite saturación de lectura en condiciones extremas.
- **Precisión y Exactitud:** Los instrumentos deben cumplir con tolerancias apropiadas para este tipo de aplicación. A continuación, se presentan valores de referencia recomendados:

| | TOLERANCIAS |
|--------------------------------|--|
| PRESION | ± 0.2 bar a ± 0.5 bar |
| FLUJO DE VAPOR | $\pm 1.5 - 2.5$ % de la lectura del sensor |
| TEMPERATURA | $\pm 1 - 5$ °C |
| NIVEL DEL AGUA | ± 5 % |
| FLUJO DE COMBUSTIBLE (BIOMASA) | $\pm 3 - 5$ % de la lectura del sensor |
| FLUJO DE AIRE DE COMBUSTION | $\pm 2 - 3$ % de la lectura del sensor |
| MONITORIO DE CARBONO | ± 10 ppm |
| OXIGENO | ± 0.5 % |

- **Resistencia a Condiciones Ambientales:** Los instrumentos deben ser aptos para operar bajo condiciones presentes en salas de calderas: temperaturas elevadas, alta humedad, vibraciones mecánicas y presencia de polvo.
- **Compatibilidad de Señales:** Asegurar la correcta integración entre instrumentos y el sistema de control mediante convertidores de señal o adaptadores de comunicación cuando sea necesario.
- **Evitar Sobredimensionamiento:** No seleccionar dispositivos con características excesivas o no requeridas para el proceso, ya que esto puede aumentar innecesariamente los costos y la complejidad.
- **Certificación y Soporte Técnico:** Priorizar instrumentos con certificaciones industriales reconocidas y disponibilidad de repuestos, servicio técnico y mantenimiento local.
- **Documentación Técnica:** Obtener o generar la ficha técnica detallada de cada instrumento o dispositivo utilizado en el sistema, incluyendo sus características eléctricas, rangos, precisiones y condiciones de operación.

Como ejemplo, en la Figura 4 se presentan las sugerencias de selección de instrumentos, donde se establecen los rangos de tolerancia recomendados para cada variable crítica de operación (presión, nivel de agua, temperatura, flujo de aire de combustión, entre otros). Esta referencia metodológica permitió estandarizar criterios técnicos durante la selección de dispositivos y garantizar que los equipos elegidos respondan adecuadamente a las condiciones de operación de una caldera industrial.

Para el procesamiento de señales y la gestión central del sistema, se empleó un controlador lógico programable (PLC) Siemens S7-1500, disponible en el laboratorio. No obstante, en el documento también se analizan otras opciones viables de controladores, así como distintas alternativas de comunicación y programación aplicables al entorno industrial. El PLC seleccionado fue configurado como unidad principal de control, encargado de recibir las señales provenientes de los sensores de campo y emitir las órdenes correspondientes a los actuadores involucrados en cada subsistema.

Tabla 1.

Instrumentación y Elementos de Campo

| Marca | Modelo | Ventajas | Protocolos de Comunicación | Desventajas | Rango de Precios |
|----------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| Siemens | S7-1200 / S7-1500/ Logo v12 | Alta compatibilida d, integración con TIA Portal, modularidad | PROFINET, PROFIBUS, Modbus TCP/IP | Costo elevado y licencias de software difíciles de adquirir. | \$1.765.000/ \$4.842.815 /\$899.000 |
| Allen-Bradley | CompactLogix / ControlLogix | Integración con SCADA, soporte para control avanzado | EtherNet/IP, DeviceNet, ControlNet | Muy costoso y soporte técnico limitado en el país. | \$5.313.231/ |

| Marca | Modelo | Ventajas | Protocolos de Comunicación | Desventajas | Rango de Precios |
|------------------|-----------|----------------|----------------------------|----------------|---------------------|
| Schneider | Modicon | Flexibilidad, | Modbus RTU, Modbus TCP/IP, | Repuestos | \$1.139.152/ |
| | r | ideal para | CANopen | menos | \$1.322.955/ |
| | M241 / | control | | disponibles y | |
| | M251 / | distribuido | | configuración | |
| | M340 | | | compleja. | |
| Omron | NX / NJ / | Alta | EtherCAT, PROFINET, | Soporte | \$3.951.783/ |
| | CP | velocidad de | Modbus TCP | técnico | \$2.613.176/ |
| | | procesamiento, | | reducido y | \$4.910.318 |
| | | integración | | baja | |
| | | con sensores | | capacitación | |
| | | | | local. | |
| Delta | DVP / AS | Solución | Modbus RTU, CANopen, | Menor | \$642.000/ |
| | | económica, | EtherNet/IP | robustez y | \$1.798.000 |
| | | eficiente para | | disponibilidad | |
| | | sistemas | | de | |
| | | medianos | | componentes. | |

Adicionalmente, se consideró la incorporación de elementos complementarios como contactores, relés, módulos de entradas y salidas (E/S), variadores de velocidad, entre otros, que resultan esenciales para la adaptación de señales y el control de motores y equipos auxiliares. Todos estos lograr las señales de entrada y salida y organizar estos elementos dentro de las bases de datos internas del PLC, lo que facilita el mantenimiento y mejora la escalabilidad del sistema.

Figura 5.

Ejemplo de nomenclatura de variables.

Complementos y sugerencias programación 41

Antes de iniciar la etapa de programación del PLC, es recomendable realizar una planificación estructurada de las variables que se utilizarán en el sistema. Esto incluye la creación de una convención de nombres que identifique claramente:

- La ubicación o subsistema de origen (por ejemplo, caldera, tanque, horno, etc.).
- La función o variable monitoreada/controlada (como presión, temperatura, flujo, etc.).
- El tipo de dispositivo involucrado (sensor, actuador, bomba, válvula, entre otros).

| Elemento | Símbolo | Elemento | Símbolo |
|------------------------------|------------|-----------------------------|---------|
| Caldera | Boil | Vaciado | Drain |
| Caldera Acumulativa | Ca | Potenciometro | Pot |
| Caldera Prototípica | Cp | Estado/Feedback | SE |
| Válvula | Vlv | Receptor | Recep |
| Bomba | Pump | Precondicionador | Prath |
| Nivel | Lvl | Aire | Air |
| Temperatura | Temp | Vapor | Steam |
| Presión | Pres | Preostato | SwfPres |
| Flujo | Flow | Termostato | SwfTemp |
| SetPoint | Sp | Interruptor general | Brk |
| Valor del proceso | Pv | Interlock | Intlk |
| Comando | Cmnd | Encendido automatico/manual | AutoMan |
| Alarma | Alm | Modo de operación | Mode |
| Alta/Baja | Lvl | Temporizador | Timr |
| Baja/Baja | Lvl | Estado de fallo | Fault |
| Dispositivo de visualización | Dsp | Reset | Rst |
| Dosificador | Dosif | Turbina | Turb |
| Hmi | Hmi | Intercambiador de calor | Hcx |
| Sensor | Sens | Enfriador | Chill |
| Actuador | Act | Filtro | Fltr |
| Tanque | Ventilador | Fan | |
| Combustible | Fuel | Suplidor de Aire | Blwr |
| Válvula de seguridad | Sv | Válvula de seguridad | Sv |
| Llenado | Fll | | |

Complementos y sugerencias programación 42

Una vez definida la convención, se deben crear dos listas de variables: una para entradas físicas (señales recibidas desde el campo) y otra para salidas físicas (señales enviadas a actuadores). Esta organización mejora la claridad del código, facilita el diagnóstico y permite un crecimiento ordenado del sistema. Se sugiere mantener abreviaturas normalizadas a lo largo de todo el proyecto.

| Nombre | Tipo de datos | Dirección |
|--------------------|---------------|-----------|
| Boil_Lvl_Sensor_L | Real | NOI.0 |
| Boil_Lvl_Sensor_M | Real | NOI.1 |
| Boil_Lvl_Sensor_H | Real | NOI.2 |
| Ca_Pump | Real | NOI.3 |
| Ca_Pump | Real | NOI.4 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.5 |
| Boil_Pres_Sensor_L | Real | NOI.6 |
| Boil_Pres_Sensor_H | Real | NOI.7 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.8 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.9 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.0 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.1 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.2 |
| Boil_Pres_Sensor | Real | NOI.3 |

Además, se recomienda distribuir las variables en bloques de datos (DB) según su función dentro del sistema, lo que mejora la trazabilidad y simplifica el mantenimiento. Ejemplos de agrupación incluyen DB_PresiónPID, DB_DepresiónPID, DB_ConversionUnidades, DB_Alarmas y DB_HMI. Esta estructura modular favorece una programación segmentada y ordenada.

| Nombre | Tipo de datos | Dirección |
|---------------|---------------|-----------|
| Ca_Pump_S1_S | Int | NOI.0 |
| Ca_Pump_S1_M | Int | NOI.1 |
| Ca_Pump_S1_H | Int | NOI.2 |
| Ca_Pump_S1 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S1 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S2 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S3 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S4 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S5 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S6 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S7 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S8 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S9 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S10 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S11 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S12 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S13 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S14 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S15 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S16 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S17 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S18 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S19 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S20 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S21 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S22 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S23 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S24 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S25 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S26 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S27 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S28 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S29 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S30 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S31 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S32 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S33 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S34 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S35 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S36 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S37 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S38 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S39 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S40 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S41 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S42 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S43 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S44 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S45 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S46 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S47 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S48 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S49 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S50 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S51 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S52 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S53 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S54 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S55 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S56 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S57 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S58 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S59 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S60 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S61 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S62 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S63 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S64 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S65 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S66 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S67 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S68 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S69 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S70 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S71 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S72 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S73 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S74 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S75 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S76 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S77 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S78 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S79 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S80 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S81 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S82 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S83 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S84 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S85 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S86 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S87 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S88 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S89 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S90 | Int | NOI.3 |
| Boil_Lvl_S91 | Int | NOI.4 |
| Boil_Lvl_S92 | Int | NOI.5 |
| Boil_Lvl_S93 | Int | NOI.6 |
| Boil_Lvl_S94 | Int | NOI.7 |
| Boil_Lvl_S95 | Int | NOI.8 |
| Boil_Lvl_S96 | Int | NOI.9 |
| Boil_Lvl_S97 | Int | NOI.0 |
| Boil_Lvl_S98 | Int | NOI.1 |
| Boil_Lvl_S99 | Int | NOI.2 |
| Boil_Lvl_S100 | Int | NOI.3 |

Como complemento, se describe un sistema adicional que explica el funcionamiento de un control por pulsos, especialmente útil para gestionar dispositivos como los múltiples *blowers* encargados de alimentar la biomasa proveniente del digester de la planta, mediante una lógica de activación secuencial.

3.3.3 Diseño de Pantallas HMI

En el caso particular de esta industria, el sistema de supervisión mediante HMI se diseñó para ofrecer un control y monitoreo intuitivos y directos. Por este motivo, el primer paso consistió en analizar las necesidades específicas de la empresa con el fin de definir las características y tipos de pantallas HMI más apropiadas. Adicionalmente, se realizó una comparación de rangos de precios disponibles en portales comerciales, con el propósito de estimar el margen de inversión

requerido para cada tipo de HMI, considerando tanto sus características técnicas como su aplicabilidad en el entorno industrial.

Tabla 2.

Diseño de Pantallas HMI

| Tipo de HMI | Descripción | Ventajas | Aplicación en la caldera | Desventajas | Rango de precios |
|--|---|--|---|---|---|
| HMI basado en panel táctil | Dispositivo independiente con pantalla táctil y conexión a PLC. | Fácil de instalar, resistente a entornos industriales. | Control local de caldera, supervisión en tiempo real. | Costo medio-alto y limitada capacidad de almacenamiento. | \$599.500 / \$2.189.900 |
| HMI basado en PC Industrial (SCADA) | Software HMI en un PC robusto para entornos industriales. | Mayor capacidad gráfica y almacenamiento de datos. | Integración con sistemas SCADA y registro de tendencias. | Requiere mayor inversión y mantenimiento especializado. | \$2.173.000 / \$30.000.000 o mas |
| | Permite acceso remoto vía navegador web. | Monitoreo desde cualquier dispositivo con internet. | Supervisión a distancia de la caldera, reportes en línea. | Dependencia de conexión a internet y riesgos de ciberseguridad. | \$35.280 / \$274.000 por mes \$1.000.000 / \$4.000.000 o más de interfaz |

| Tipo de HMI | Descripción | Ventajas | Aplicación en la caldera | Desventajas | Rango de precios |
|---|--|--|--|--|-------------------------------|
| HMI portátil (Tabletas | Dispositivo móvil para acceso inalámbrico. | Movilidad y flexibilidad para el operador. | Ajustes y monitoreo en campo sin necesidad de un panel fijo. | Menor durabilidad y autonomía de batería limitada. | \$300.000 / \$5.000.000 o mas |
| Industriales o Paneles Remotos) | | | | | |

Considerando dichas características, se decidió utilizar el equipo KP700, disponible en los laboratorios de la universidad. Se muestra cómo se organiza la información en las distintas pantallas del HMI, incluyendo la pantalla de inicio, que actúa como panel central desde el cual el usuario puede acceder a las demás pantallas y consultar algunas variables principales en tiempo real.

El menú de Seguridad, que permite acceder a la pantalla de estados para visualizar de forma clara el estado operativo de la caldera y las fallas comunes que puedan presentarse durante su funcionamiento.

Por su parte, en el menú de Variables, se incluye una representación gráfica de la caldera que muestra todas las variables activas, así como la configuración de setpoints de estabilidad y alarmas asociadas al nivel de agua, depresión y presión, indicando los valores actuales y sus rangos establecidos.

Desde la pantalla principal, el botón de Ajuste permite acceder a configuraciones específicas del sistema PID y a la gestión de usuarios, lo que facilita restringir o autorizar cambios de parámetros según el nivel jerárquico del operador. Estos controles PID, junto con la explicación sobre cómo ajustar sus parámetros y las características de los sensores.

Los ajustes generales del HMI, como la configuración de fecha y hora, tamaño de letra, restablecimiento de valores predeterminados y un registro de accesos para identificar qué usuarios ingresaron y en qué momento.

La sección de los alimentadores de biomasa y motores, donde se configuran aspectos como el tiempo de ciclo de funcionamiento de cada soplador, su porcentaje de operación en ese ciclo, parámetros de arranque, tipo de motor y tiempo máximo de arranque. Esta información está diseñada para integrarse posteriormente con un variador de frecuencia.

Finalmente, se incluye el apartado de alarmas, detallando su clasificación según el nivel de prioridad y mostrando el diseño de la pantalla del HMI que presenta estas alarmas, junto con el registro histórico para facilitar el diagnóstico y la trazabilidad de eventos.

Figura 6.

Descripción del sistema de monitoreo.



Como referencia, en la Figura 6 se presenta un ejemplo del diseño estructurado del HMI, donde se ilustra la distribución de menús y pantallas principales, destacando la centralización de la supervisión y la facilidad de navegación.

3.4 Seguridad Operativa y Consideraciones

En el ámbito de consideraciones para el diseño del HMI, se presentan recomendaciones para estructurar las pantallas siguiendo una jerarquía lógica. Este enfoque facilita que la navegación sea más intuitiva, clara y segura para los distintos tipos de usuarios. Asimismo, se describe la implementación de un sistema de gestión de accesos por niveles: operadores, que solo pueden modificar parámetros básicos que no comprometen la seguridad; personal técnico, que puede realizar ajustes más avanzados; e ingenieros, que disponen de permisos casi totales para modificar el sistema.

Por otra parte, se incluyen sugerencias sobre el uso de colores para identificar de forma clara los estados de los elementos, diferenciando rangos activos, condiciones de falla o situaciones fuera de servicio. También se presentan recomendaciones para la gestión de notificaciones de alarmas, incluyendo tanto señales visuales en el propio HMI como la posibilidad de emplear indicadores externos, mejorando así la capacidad de respuesta ante eventos críticos.

3.5 Simulación y Validación

En el video entregado como complemento en el Anexo D se presenta, en primer lugar, una descripción general de la estructura de programación desarrollada en TIA Portal, mostrando cómo se organizaron los distintos bloques funcionales y elementos que forman parte del sistema de control automatizado propuesto.

A continuación, se realiza una demostración de las pantallas HMI implementadas, explicando la lógica de navegación entre menús, la visualización de variables en tiempo real y la

configuración de parámetros clave que permiten al operador interactuar con el sistema de manera sencilla e intuitiva.

Posteriormente, se ejemplifica el funcionamiento del sistema de control de presión mediante una simulación en TIA Portal conectada con Factory I/O en el Anexo I. Para esta demostración, se utilizó un tanque de agua como modelo equivalente que simula la variable de presión, regulado mediante un lazo PID. En el video se muestra cómo los parámetros del PID pueden obtenerse automáticamente usando la función de autotuning o ajustarse de forma manual, observando cómo estas configuraciones afectan la respuesta del sistema, todo visualizado en las pantallas del HMI.

Dado que Factory I/O no cuenta con un modelo específico de caldera, se recurrió a esta aproximación utilizando elementos físicos simulados, lo que permite validar la lógica de control sin intervenir directamente en una planta real, garantizando la seguridad y reduciendo riesgos operativos.

Finalmente, el video incluye una demostración de la lógica de control por pulsos, utilizando dos luminarias para simular el encendido secuencial de los blowers encargados de la alimentación de biomasa, ilustrando claramente cómo se implementa y supervisa este tipo de control.

Como complemento, el código fuente utilizado en esta simulación se encuentra disponible para consulta en el Anexo D. Archivos de programación en TIA Portal y simulación en Factory I/O, permitiendo que estudiantes y profesionales lo revisen, analicen o adapten a sus propios proyectos.

4. Diseño de la Guía

Con el objetivo de desarrollar una guía técnica orientada a la automatización de calderas híbridas de hasta 20 toneladas de capacidad de generación de vapor, se diseñó un documento estructurado que integra los conceptos fundamentales, la descripción de componentes y dispositivos necesarios, el marco normativo aplicable, y finalmente, la orientación para el diseño e implementación de la interfaz hombre-máquina (HMI).

La guía parte desde una contextualización técnica del proceso y de cómo tradicionalmente se ha controlado, para luego avanzar hacia ejemplos aplicados de automatización, proporcionando al lector una comprensión progresiva. El contenido fue organizado en los siguientes apartados:

Introducción: Presenta el enfoque general de la guía, centrado en la automatización de calderas en la industria del aceite de palma. Se destaca la importancia de esta aplicación en el contexto nacional y su potencial impacto sobre la eficiencia operativa y la seguridad del sector.

Requisitos técnicos y normativos: Examina las normativas nacionales e internacionales relacionadas con el diseño, la operación y la automatización de calderas, proporcionando el marco legal y técnico que debe considerarse para garantizar cumplimiento y seguridad.

Componentes clave en la automatización de calderas: Describe detalladamente los elementos estructurales de la caldera, los sistemas funcionales involucrados y las variables críticas para el control. Se explican los principios de funcionamiento, los dispositivos de instrumentación requeridos, las opciones de técnicas de control (como PID y control predictivo), así como los criterios para la selección del PLC, la estructura de red, comunicación entre sensores/actuadores y lógica de programación. También se abordan aspectos normativos aplicables a los componentes utilizados.

Ejemplo de automatización de una caldera: Desarrolla un caso ejemplificado sobre cómo aplicar los conocimientos abordados en la guía. Incluye la segmentación del sistema, la selección de instrumentos por variable, la lógica de control recomendada y sugerencias prácticas para la implementación en campo y en el entorno de programación.

Tipos de pantallas: Expone consideraciones para el diseño de las pantallas de visualización en el HMI, abordando criterios funcionales, jerarquía visual, tipos de información crítica, y cómo estas pueden variar en función del enfoque operativo o del tipo de planta.

Ejemplo de HMI: Presenta una propuesta de interfaz hombre-máquina centrada en la supervisión del sistema de caldera. Se incluyen pantallas de control, monitoreo, gestión de alarmas y registro de eventos, orientadas a mejorar la interacción entre el operador y el sistema automatizado.

5. Conclusiones

Se identificaron y caracterizaron los subsistemas principales de una caldera híbrida de 10 a 20 toneladas de vapor —combustión, alimentación de agua, control de presión, tiraje y monitoreo—, determinando las variables críticas de operación (presión, temperatura, nivel y flujo) y los sensores requeridos para su medición. A partir de esta información, se elaboraron las fichas técnicas de instrumentación y se realizó la visualización y análisis de normativas nacionales e internacionales vigentes y aplicables al diseño y operación de calderas industriales.

La guía desarrollada consolida una metodología práctica para el diseño de sistemas de automatización en calderas híbridas de 10 a 20 toneladas de vapor, integrando criterios técnicos, normativos y de costo-beneficio. Este análisis se aplicó principalmente a la selección de

controladores lógicos programables (PLC) y pantallas HMI, mediante la comparación de opciones disponibles en el mercado nacional en términos de rendimiento, compatibilidad y facilidad de adquisición. La estructura progresiva del documento facilita la aplicación del proceso de diseño, desde la planificación hasta la implementación del control automático, y sirve como material de referencia y capacitación para el personal técnico del sector palmero.

La selección de la instrumentación y los elementos de campo se fundamentó en información técnica obtenida durante la visita a la planta extractora Bucarelia, la cual cuenta con una caldera híbrida de 13.2 toneladas de vapor por hora. En esta visita se realizó el levantamiento de los sensores, actuadores y componentes de control utilizados en la operación, complementado con el análisis de planos de proceso y la revisión de la normativa aplicable (NTC 4022, RETIE y Reglamento Técnico de Calderas). Esta base real permitió definir una propuesta coherente y aplicable a las condiciones operativas típicas del sector palmero colombiano.

Se desarrollaron ejemplos funcionales de automatización que aplican la metodología propuesta, incluyendo la arquitectura de control basada en un PLC Siemens S7-1200, módulos de E/S y una interfaz HMI de supervisión. La programación se diseñó a partir del levantamiento realizado en la planta Bucarelia (caldera de 13.2 t/h) y se validó mediante una simulación en Factory I/O, donde se representaron parcialmente los lazos de control PID y los módulos interactivos del HMI. Estos resultados demuestran la viabilidad técnica de la propuesta y facilitan su aplicación práctica en calderas híbridas de 10 a 20 t/h del sector palmero colombiano.

Referencias

- Alonso Valle, F. (1996). *La seguridad en calderas*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- FEDEPALMA. (2023). *Informe de gestión 2023*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.
- Rivas Pérez R., Aref Ghraizi R., Cesar Sánchez E., Inga Castro J. (2000). Sistemas de Control Automático Integral de Generadores de Vapor Piro-tubulares. Ingeniería Eléctrica, Automática y Comunicaciones, Vol. XXI, No 2.
- Rodríguez Vásquez, J. R. (2006). *Desarrollo de un sistema de control avanzado de la presión del vapor en una caldera de tubos de fuego* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Totvs LATAM. (2024). *Automatización industrial: una guía completa y actualizada sobre el tema*. <https://www.totvs.com/blog/industria/automatizacion-industrial>
- VR Ingeniería. (2020). *Manual de operación y mantenimiento CALDERA 3*. Documento interno, Bucarelia.
- VR Ingeniería. (2020). *Ficha técnica: Ventilador aire inyección fibra*. Documento interno, Bucarelia.

Apéndices