

Análisis de riesgos y fortalecimiento de la seguridad operacional en la caldera del Laboratorio de
Procesos de la Escuela de Ingeniería Química

Dayra Leonela Rojas Sierra y Laura Tatiana Archila Lizarazo

Trabajo de Grado para optar al título de ingenieras químicas

Directora

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Codirector

Humberto Escalante Hernández

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatorias

A Dios, por acompañarme en cada paso de este camino, darme la fortaleza para superar los momentos difíciles y permitirme alcanzar este sueño.

A mis padres, porque son el regalo más grande que la vida me ha dado. Gracias por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudé y por acompañarme en cada etapa de este proceso. Papá, gracias por ser mi guía, por enseñarme el valor del esfuerzo y por cada sacrificio que hizo posible este sueño. Mamá, gracias por tu apoyo, tu paciencia y por estar siempre a mi lado. No hay palabras suficientes para agradecer todo lo que han hecho por mí.

Siempre llevaré conmigo, con mucho orgullo, los valores, la fortaleza y el amor que me inculcaron. Todo lo que soy y este logro es por y para ustedes.

A mi tía Elsa, por estar siempre presente en mi vida con un amor incondicional. Gracias por quererme como a una hija, por cada consejo, cada abrazo y por acompañarme siempre. Espero que este logro también te llene de orgullo, porque una parte de él también es tuya.

A mis hermanos, por acompañarme en este camino, por ser parte de mi vida y de mi historia, y por darme la alegría de saber que siempre formarán parte de ella.

A mis mejores amigos, Daniela, Chentos y Maura, por tantos años de amistad, por acompañarme en cada etapa de mi vida y por hacerme sentir que siempre podía contar con ustedes. ¡Gracias por siempre estar!!

A Sharita, Erika, Juann, Jireth, Tatiss, Erika P., Amador y Enriqueto, a ustedes por hacer que estos años de universidad fueran mucho más que clases y trabajos. Gracias por cada desvelo, cada salida, cada risa y cada recuerdo que recordaré siempre.

Al cielo, a ti Criss. Me habría encantado que estuvieras aquí para celebrar este momento conmigo. Te llevo siempre en mi corazón y, con todo mi cariño, este logro también es para ti.

A quienes, de una u otra manera, hicieron parte de este camino: familiares, amigos y todas las personas que me brindaron su apoyo, una palabra de aliento o creyeron en mí. Gracias por acompañarme y aportar, desde su lugar, para que hoy este sueño sea una realidad.

A mí, por no rendirme cuando el camino parecía demasiado difícil, por seguir adelante incluso cuando las fuerzas faltaban y por demostrarme que soy más fuerte de lo que muchas veces creí.

Por confiar en mí, levantarme después de cada tropiezo y llegar hasta aquí con esfuerzo y perseverancia. Gracias por no abandonar este sueño y que este sea apenas el comienzo de muchos logros más

Dayra Rojas.

A mi mamá, Liliana, porque este logro es tan tuyo como mío. Gracias por dedicar tu vida a sacar adelante a nuestra pequeña familia con una fortaleza y un amor incondicional que siempre serán mi mayor ejemplo. Cada sacrificio, cada esfuerzo silencioso y cada oportunidad que me brindaste hicieron posible que hoy alcanzara este sueño. Todo lo que soy y todo lo que he logrado lleva una parte de ti. Espero que este sea solo uno de los muchos motivos de orgullo que pueda darte, porque si hoy estoy aquí, es gracias a ti.

A mi hermana, Vivi, porque la vida me regaló en ti mucho más que una hermana: me dio una segunda mamá, mi mejor amiga y mi lugar seguro. Gracias por creer siempre en mí, por acompañarme en cada paso y por enseñarme, con tu ejemplo, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación. Verte crecer y convertirte en una mujer tan exitosa siempre fue mi mayor motivación. Este logro también lleva tu nombre, porque sin ti este camino no habría sido el mismo. Espero siempre te sientas orgullosa hermanita.

A mi tío Henry, que me acompaña desde el cielo y siempre ha estado presente en mi corazón. Me gusta pensar que, de alguna manera, has cuidado de mí en cada paso que he dado. Este logro también es un homenaje a tu recuerdo.

A mi papá y Mercedes, por su apoyo, por acompañarme en esta etapa tan importante de mi vida y ayudarme a cumplir mi sueño.

A mi nona, y a toda mi familia, gracias por su cariño, sus consejos y por estar presentes a lo largo de este camino.

A Cristian y Gogo, por ser un apoyo incondicional durante toda mi carrera y por acompañarme, sin que la distancia o las responsabilidades fueran un obstáculo.

A Wilson y Angelly, mis mejores amigos, gracias por permanecer a mi lado en los buenos y malos momentos desde el momento cero, recordándome siempre que nunca estaba sola.

A Lourdes, Freddy y Silvia, gracias por regalarme una amistad sincera, llena de lealtad, complicidad y momentos que recordaré con mucho cariño. Espero tenerlos toda la vida.

A Daniela, Diego, Sara, María, Luis y David, gracias por las largas jornadas de estudio, las risas y todas las experiencias que hicieron inolvidable todo el proceso desde el inicio.

Y a Jhonny, Sebastián, Darío, Juanes, Erick, Laura, Fabián y Carri, gracias por llegar en los últimos semestres y hacerme sentir su amistad desde el primer día, llenando esta etapa de alegría y buenos recuerdos.

Finalmente, me dedico esta tesis a mí misma. A la Laura que, a pesar de las dificultades y de las pausas que tuvo que hacer en el camino, nunca perdió de vista su sueño de convertirse en ingeniera química. Hoy entiendo que cada obstáculo me hizo más fuerte y que todo el esfuerzo valió la pena. Siempre seguí adelante con un mismo propósito: hacer sentir orgullosas a mi mamá y a mi hermana.

Gracias a todas las personas que hicieron parte de este camino. Cada palabra de aliento, cada abrazo y cada gesto de apoyo me acercaron un poco más a este momento.

Laura.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra directora de trabajo de grado, la profesora Diana Duarte, por su guía, dedicación y constante acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento, compromiso y disposición fueron fundamentales para culminar este proyecto.

Al profesor Humberto Escalante, le agradecemos por sus valiosos aportes, sus recomendaciones y el tiempo dedicado a orientarnos. Agradecemos su disposición para compartir sus conocimientos y contribuir a nuestra formación profesional.

Extendemos un reconocimiento muy especial a los técnicos del Laboratorio de Procesos, Don Wilson, Camilo y Don Eduardo, quienes, con su experiencia, paciencia y permanente disposición para ayudar, hicieron que cada jornada fuera una oportunidad para aprender y crecer. Su apoyo fue invaluable en cada etapa de este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander y, especialmente, a la Escuela de Ingeniería Química, nuestro profundo agradecimiento por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales. A cada uno de sus docentes, gracias por compartir sus conocimientos, inspirarnos con su ejemplo y acompañarnos desde nuestros primeros semestres hasta el final de esta etapa, contribuyendo no solo a nuestra formación académica, sino también a nuestro crecimiento personal y profesional.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino y aportaron a la culminación de este logro, fruto del esfuerzo conjunto, la dedicación y el apoyo de quienes creyeron en nosotras a lo largo de esta etapa.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Estado del arte.....	15
3. Marco teórico	17
4. Metodología	21
4.1. Diagnóstico técnico y operacional de la caldera	22
4.1.1. Revisión bibliográfica y documental de la operación segura de calderas	22
4.1.2. Inspección física e identificación de componentes de la caldera del LabPro	22
4.1.3. Recopilación del historial de mantenimiento.....	23
4.2. Caracterización del marco normativo aplicable a calderas	23
4.3. Elaboración del manual operativo de la caldera	23
4.4. Evaluación de riesgos operacionales de la caldera mediante HAZOP	24
4.5. Implementación de la información técnica de la caldera en el entorno académico	25
5. Resultados	26
5.1. Revisión bibliográfica y documental de la operación segura de calderas	26
5.1.1. Accidentalidad y factores de riesgo en calderas	26
5.2. Caracterización técnica y operativa de la caldera del LabPro	29
5.2.1. Conjuntos constitutivos de la unidad de generación de vapor.....	31

5.2.2. Análisis de mantenimientos de la caldera del LabPro	32
5.3. Cumplimiento del marco normativo vigente para calderas en Colombia	34
5.4. Análisis de riesgos a partir de la metodología HAZOP	36
5.5. Manual operativo estándar de la caldera del LabPro – EIQ	40
5.6. Socialización a los estudiantes de Ingeniería Química sobre el uso adecuado y riesgos en la operación de una caldera.....	42
6. Conclusiones	48
7. Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	51

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros considerados durante el análisis HAZOP.	25
Tabla 2. Causas y consecuencias de accidentes en calderas reportados en la literatura.	26
Tabla 3. Características técnicas de la caldera.	29
Tabla 4. Componentes principales identificados en los conjuntos de la caldera del LabPro.	32
Tabla 5. Principales normativas aplicables a calderas en Colombia y su cumplimiento.	34
Tabla 6. Resultados del análisis HAZOP a la caldera del LabPro – EIQ - UIS	37
Tabla 7. Resultados del quiz implementado a los estudiantes que participaron de las charlas formativas.	45
Tabla 8. Resultados de las preguntas de retroalimentación aplicadas a los estudiantes.	46

Lista de figuras

Figura 1. Componentes principales de una caldera pirotubular.....	17
Figura 2. Diagrama de fases metodológicas.	21
Figura 3. Consolidado del número de accidentes y víctimas fatales en accidentes operacionales en calderas en Brasil (2002-2020).	28
Figura 4. Principales componentes de la unidad generadora de vapor.	31
Figura 5. Diagrama de Pareto de los procedimientos de mantenimiento por conjunto de la caldera del LabPro (2009–2025).	33
Figura 6. Etiquetado de válvulas e instrumentos de la caldera del LabPro.	41
Figura 7. Estructura general del manual operativo estándar de la caldera del LabPro.....	41
Figura 8. Medición de la dureza del agua, que se alimenta a la caldera, durante las charlas en el LabPro.....	43
Figura 9. Muestras de agua tomadas en: i) purga interior de la caldera (izquierda),ii) salida del tanque suavizador (centro) y iii) agua potable de la red hidráulica de la UIS (derecha).....	44
Figura 10. Prueba de encendido y apagado de la caldera mediante el manual operativo por parte de estudiantes.	47

Lista de Apéndices

Los apéndices se encuentran disponibles en le Repositorio Institucional

Apéndice A. Manual Operativo Estándar

Apéndice B. HAZOP caldera Laboratorio de Procesos, Ingeniería Química

Apéndice C. Quiz realizado a los estudiantes de Laboratorio de Procesos I

Apéndice D. Listado de asistencia a charla introductorio de la caldera

Resumen

Título: Análisis de riesgos y fortalecimiento de la seguridad operacional en la caldera del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química*

Autores: Dayra Leonela Rojas Sierra y Laura Tatiana Archila Lizarazo**

Palabras Clave: caldera pirotubular, seguridad de procesos, análisis Hazop, manual operativo, gestión de riesgos, entorno académico, normativa colombiana.

Descripción: El presente trabajo analizó los riesgos operativos de la caldera pirotubular del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, con el propósito de fortalecer la seguridad operacional y apoyar la gestión segura de la unidad en el entorno académico. La investigación comprendió el diagnóstico técnico de la unidad de operación, la evaluación del cumplimiento normativo, la elaboración del manual operativo estándar e integración formativa. En este sentido, el diagnóstico estableció las condiciones actuales de operación, mantenimiento y seguridad de caldera. Posteriormente, la evaluación normativa identificó oportunidades de fortalecimiento relacionadas con la documentación operativa, la respuesta ante emergencias y el cumplimiento de requisitos ambientales. No obstante, estos hallazgos no permitían determinar los escenarios de riesgo asociados a su funcionamiento ni las posibles consecuencias derivadas de desviaciones en las variables de proceso. Por lo anterior, se aplicó la metodología HAZOP con el propósito de identificar peligros y analizar los riesgos asociados al proceso. El análisis identificó ocho desviaciones asociadas a variables críticas del proceso y permitió establecer recomendaciones orientadas a fortalecer la confiabilidad operacional de la unidad de operación. De manera complementaria, se elaboró el manual operativo estándar que reúne las condiciones operacionales y de diseño de la caldera, estandariza los procedimientos operativos (encendido, funcionamiento, apagado) e incorpora actividades de buenas prácticas operativas para apoyar la gestión segura de la caldera. Finalmente, su implementación académica contribuyó a validar los procedimientos de encendido y apagado establecidos en el manual, respaldando su uso como herramientas de apoyo para la gestión de la caldera.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Diana Paola Duarte Duarte. Doctora en Ingeniería Química. Codirector: Humberto Escalante Hernández. Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Risk analysis and strengthening of operational safety in the boiler of the Process Laboratory of the School of Chemical Engineering*

Authors: Dayra Leonela Rojas Sierra y Laura Tatiana Archila Lizarazo**

Keywords: fire-tube boiler, process safety, HAZOP analysis, operational manual, risk management, academic environment, Colombian regulations.

Description: This study analyzed the operational risks of the fire-tube boiler at the Process Laboratory of the School of Chemical Engineering at the Industrial University of Santander, with the aim of strengthening operational safety and supporting the safe management of the unit within the academic environment. The research included a technical diagnosis of the operating unit, an evaluation of regulatory compliance, the development of a standard operating manual, and the integration of training. The diagnosis established the current operating, maintenance, and safety conditions of the boiler. Subsequently, the regulatory evaluation identified opportunities for improvement related to operational documentation, emergency response, and compliance with environmental requirements. However, these findings did not allow for the determination of risk scenarios associated with its operation or the potential consequences of deviations in process variables. Therefore, the HAZOP methodology was applied to identify hazards and analyze the risks associated with the process. The analysis identified eight deviations associated with critical process variables and allowed for the development of recommendations aimed at strengthening the operational reliability of the steam generation unit. Additionally, a standard operating manual was developed that outlines the boiler's operational and design specifications, standardizes operating procedures (start-up, operation, and shutdown), and incorporates best practices to support safe boiler management. Finally, its implementation in an academic setting helped validate the start-up and shutdown procedures included in the manual, supporting their application as valuable tools for boiler management.

*Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Diana Paola Duarte Duarte, PhD in Chemical Engineering. Co-director: Humberto Escalante Hernández, PhD in Chemical Engineering.

Introducción

Las calderas de vapor son unidades de operación termomecánicas diseñadas para realizar el cambio de estado y fase de un flujo de agua líquida en vapor saturado, mediante la energía térmica liberada por la reacción de oxidación de un combustible, bajo condiciones controladas de presión y temperatura. Debido a que el vapor de agua constituye uno de los servicios auxiliares más usados en la industria, las calderas desempeñan un papel fundamental en operaciones de calentamiento, evaporación, secado y generación de potencia (Díaz & Cardona, 2013).

Entre los diferentes tipos de calderas de vapor, las configuraciones pirotubulares y acuotubulares son las más usadas en aplicaciones industriales. Esta clasificación se basa en la disposición de los gases de combustión y el agua dentro de la unidad de operación (Comunidad de Madrid & Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2013). En las calderas pirotubulares, los gases de combustión circulan por el interior de un conjunto de tubos inmersos en un volumen de agua, transfiriendo el calor para producir el cambio de fase hasta el estado de vapor saturado. La configuración de la caldera pirotubular se caracteriza por su diseño compacto y su amplio uso para generación de vapor de baja y media presión (Rodríguez et al., 2015). En contraste, en las calderas acuotubulares, el agua circula por el interior de los tubos mientras los gases de combustión fluyen externamente.

Independientemente de su configuración, las calderas de vapor operan bajo condiciones que involucran altas presiones, temperaturas elevadas y almacenamiento significativo de energía térmica. Estos factores convierten a las calderas en unidades de operación con un potencial considerable de riesgo cuando no se gestionan adecuadamente (Sepúlveda M. & Ramírez G., 2011). A pesar de los avances tecnológicos alcanzados desde el siglo XVIII, los accidentes en las

calderas persisten cuando existen deficiencias en mantenimiento, capacitación y gestión de la seguridad (Ojeda Cortés, 2014).

Si bien los riesgos asociados a la operación de las calderas suelen analizarse principalmente en el ámbito industrial, su relevancia no se limita a ese contexto. Los entornos académicos presentan factores de vulnerabilidad propios que merecen atención particular. Durante las prácticas de laboratorio, la rotación frecuente de usuarios, la experiencia operativa limitada y la insuficiencia de procedimientos estandarizados pueden incrementar la probabilidad de incidentes y comprometer las condiciones de operación segura de las unidades de operación (Yang et al., 2022). Esta situación adquiere importancia en laboratorios universitarios que emplean calderas de vapor como herramienta pedagógica y de experimentación, donde la seguridad debe integrarse como un componente fundamental del proceso formativo.

La caldera pirotubular del Laboratorio de Procesos (LabPro) de la Escuela de Ingeniería Química (EIQ) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) suministra el vapor requerido para el desarrollo de las actividades prácticas del laboratorio, abasteciendo unidades de operación como el mini-evaporador, el evaporador de efecto doble, el secador, el reactor batch, la prensa vulcanizadora y el molino mezclador. Debido a la importancia de la caldera en el proceso formativo y a los riesgos inherentes a la generación y manejo de vapor, resulta pertinente fortalecer las estrategias de gestión de la seguridad operacional para prevenir incidentes, proteger a los usuarios y garantizar la continuidad de las actividades del laboratorio. Por ello, el presente trabajo desarrolla un análisis integral de riesgos operativos de la caldera mediante el diagnóstico técnico de sus condiciones de operación, la evaluación de los requisitos normativos vigentes y la aplicación de la metodología HAZOP para la identificación y valoración de peligros potenciales. Con base en los resultados obtenidos, se plantean acciones orientadas al fortalecimiento de la seguridad

operacional de la caldera del LabPro – EIQ – UIS, incluyendo la elaboración de un manual operativo estándar, con el propósito de contribuir a una operación más segura, confiable y alineada con las buenas prácticas de gestión del riesgo en entornos académicos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Analizar los riesgos operativos de la caldera del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química para el fortalecimiento de la seguridad operacional y la mitigación de consecuencias potenciales.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico técnico del estado actual de la caldera del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química.
- Identificar las normativas vigentes que regulan la operación y mantenimiento seguro de calderas, que garanticen el cumplimiento legal y una operación segura de la caldera de Ingeniería Química.
- Desarrollar el manual operativo estándar para la caldera del Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química, que contemple tanto los procedimientos de operación como los protocolos de seguridad y emergencias.
- Implementar el manual operativo estándar para la caldera del Laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química, como componente formativo de la asignatura de Laboratorio de procesos I.

2. Estado del arte

La incorporación de medidas orientadas a fortalecer la seguridad operacional ha sido un componente clave en la evolución de las calderas. Desde el siglo XIX se integraron elementos como válvulas de seguridad, manómetros, dispositivos de control de presión e indicadores de nivel de agua, que mejoraron el monitoreo de las condiciones del proceso y fortalecieron la seguridad. Posteriormente, durante la primera mitad del siglo XX, los avances en soldadura y metalurgia permitieron fabricar calderas de mayor capacidad y durabilidad (Ojeda Cortés, 2014). A esto se sumó la implementación de tratamientos de agua, dispositivos de control automático y tecnologías para reducir emisiones contaminantes, lo cual impulsó el desarrollo de calderas más eficientes, seguras y sostenibles (Pérez Albán et al., 2016). Esta evolución continúa hoy con la incorporación de estrategias de recuperación de calor y tecnologías digitales, que permiten optimizar la operación, supervisar variables críticas en tiempo real y fortalecer la gestión de la seguridad en las instalaciones industriales (Ojeda Cortés, 2014).

Sin embargo, a pesar de estos avances, los accidentes asociados a calderas continúan representando un desafío para la seguridad industrial. Un ejemplo reciente ocurrió en una caldera de una central termoeléctrica de carbón en Vedanta (India), donde un incremento acelerado de la carga operativa generó una condición de sobrepresión que desencadenó una explosión, dejando como resultado la muerte de veinticuatro trabajadores (Patel, 2026). De manera similar, en la central termoeléctrica Callide C (Australia), la acumulación y desprendimiento de ceniza en el fondo del horno de la caldera generó una liberación de vapor, pérdida de la llama de combustión y fluctuaciones de presión que ocasionaron daños estructurales (McKay & Jasmine, 2025).

Estos antecedentes internacionales encuentran réplica en Colombia, donde también se han reportado accidentes asociados a la operación y mantenimiento de calderas en distintos sectores

industriales. Entre los casos reportados se encuentran la explosión de una caldera en la empresa Agropecuaria La Rivera Gaitán S.A.S. dedicada al procesamiento de aceite de palma, incidente que ocasionó una persona fallecida y tres heridas de gravedad (El Espectador, 2019). Asimismo, en Bogotá se presentó una explosión de una caldera autoclave en la empresa Ecocapital S.A.S, ocasionando la muerte de un trabajador y lesiones a varios operarios (Castellanos, 2024).

Por lo anterior, la gestión de riesgos en la operación de calderas cobra relevancia debido a la necesidad de identificar peligros, prevenir la ocurrencia de incidentes y minimizar sus consecuencias sobre las personas, las unidades y las instalaciones. Por ende, existen diversas metodologías que permiten analizar las condiciones que pueden comprometer la seguridad y la operabilidad de los procesos, entre las más empleadas se encuentran el What If, modos y efectos de falla (FMEA), árbol de fallas (FTA) y el análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP). De acuerdo con Viña-Rodríguez et al. (2021), estas metodologías forman parte de las técnicas de análisis de peligros de procesos (PHA), las cuales proporcionan un enfoque estructurado para la identificación, evaluación y gestión de los riesgos asociados a los procesos industriales.

Entre las técnicas de análisis de peligros de procesos, la metodología HAZOP destaca por su capacidad para identificar riesgos asociados a desviaciones en las variables de proceso. Esta herramienta permite analizar de manera sistemática las posibles causas, consecuencias y medidas de control de dichas desviaciones, contribuyendo a anticipar fallos tanto en el diseño como en la operación (Dunjó et al., 2010). La aplicación del HAZOP resulta pertinente en unidades como las calderas, donde el control de variables como la presión, la temperatura y el nivel de agua es fundamental para prevenir eventos no deseados. Al respecto, Oliveira & Ruppenthal (2018) reportaron la aplicación de la metodología HAZOP a una caldera pirotubular de un hospital universitario en Brasil, identificando condiciones operativas que podían comprometer la seguridad

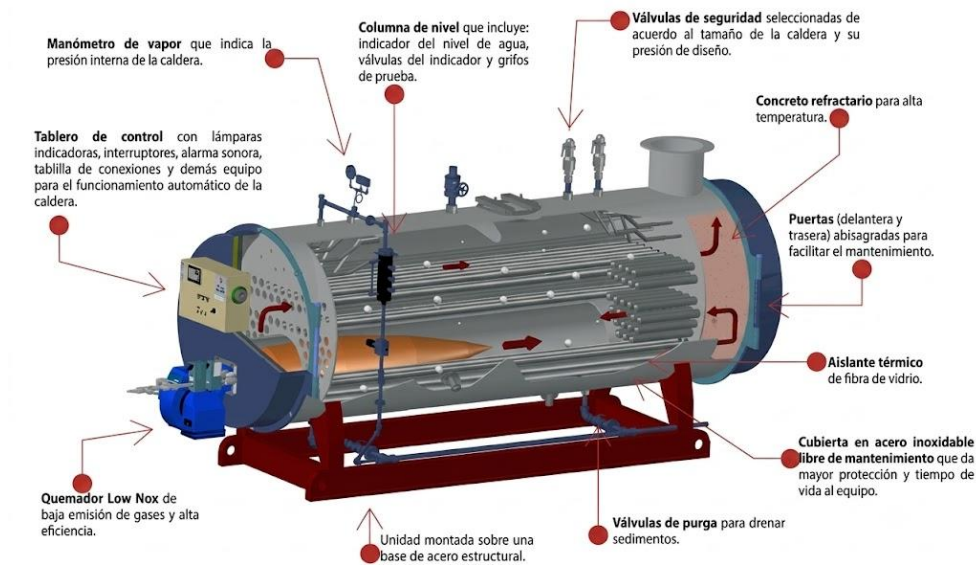
de la unidad de operación y evidenciando la utilidad de esta herramienta para fortalecer la gestión del riesgo en este tipo de instalaciones.

3. Marco teórico

La operación segura de una caldera pirotubular depende del funcionamiento coordinado de los componentes encargados de la combustión, la transferencia de calor, el monitoreo de las variables de operación y su protección (Martínez Osejo, 2017). La Figura 1 presenta la disposición general de los principales componentes de una caldera pirotubular.

Figura 1.

Componentes principales de una caldera pirotubular.



Nota. Tomado de Euro air (2020)

Como se observa en la Figura 1, la caldera pirotubular está conformada por componentes con funciones específicas dentro de su operación: el quemador, el hogar y la cámara de combustión intervienen en el proceso de combustión; los tubos de humos transfieren el calor al agua contenida en la unidad; el manómetro y el indicador de nivel permiten monitorear las variables críticas de

operación; y las válvulas de seguridad y de purga, junto con el tablero eléctrico, el aislante térmico y la chimenea, cumplen funciones de protección, supervisión y evacuación de gases (Martínez Osejo, 2017). La correcta interacción entre estos componentes resulta determinante para la seguridad de la unidad, dado que cualquier falla en su funcionamiento puede derivar en eventos de consecuencias severas para las personas, la infraestructura y el medio ambiente. En este sentido, el análisis de las calderas debe abordarse desde la perspectiva de la seguridad de procesos.

La seguridad de procesos se orienta a prevenir eventos catastróficos asociados a la liberación no controlada de energía o sustancias peligrosas en instalaciones industriales. A diferencia de la seguridad ocupacional, que aborda accidentes individuales como caídas o golpes, este enfoque se centra en eventos de baja frecuencia y alta consecuencia, tales como explosiones, incendios y fallas estructurales, los cuales pueden comprometer la integridad de las personas, las unidades e instalaciones (García J., 2025). En el caso particular de las calderas, la interacción simultánea de presión, combustible y energía térmica incrementa el potencial de riesgo durante su operación, por lo que su gestión constituye un aspecto fundamental dentro de la seguridad de procesos (Sepúlveda M. & Ramírez G., 2011).

Los riesgos asociados a la operación de calderas pueden manifestarse a través de diferentes escenarios de falla, entre los que destacan las explosiones por sobrepresión, el sobrecalentamiento ocasionado por bajo nivel de agua, las fallas en los sistemas de combustión y control, así como la degradación estructural, la fatiga térmica y la pérdida de espesor de los materiales (Hatala et al., 2023). En estos escenarios, la sobrepresión representa uno de los más críticos, ya que puede originarse por fallas en válvulas de alivio, bloqueos en líneas de descarga o mal funcionamiento de instrumentos de medición. Del mismo modo, el descenso del nivel de agua por debajo de los

límites seguros puede provocar el sobrecalentamiento de las superficies metálicas, debilitando la estructura de la caldera (Ai et al., 2015).

Además de las desviaciones operativas mencionadas anteriormente, la seguridad de las calderas también depende de la conservación de sus condiciones mecánicas a lo largo de la vida útil de la unidad de operación. Particularmente, la integridad estructural de las calderas pirotubulares puede verse comprometida por fenómenos como corrosión, incrustaciones, pérdida de espesor, grietas y deformaciones (Deshmukh & Dhamangaonkar, 2025a). La calidad del agua de alimentación constituye un factor determinante para la correcta y segura operación de las calderas pirotubulares a presiones bajas e intermedias. Respecto a la calidad del agua en la caldera, se recomienda mantener un pH entre 10,5 y 11,5 y una dureza total en un rango aceptable de 1 a 3 ppm, con el objetivo de prevenir la formación de incrustaciones calcáreas y la corrosión por ácidos o por picadura (ASME, 2021; Kemmer & Nalco Chemical Company, 1988). Las incrustaciones actúan como aislante térmico sobre las superficies de transferencia de calor, elevando las temperaturas de pared y acelerando la fatiga del material, mientras que la corrosión reduce el espesor efectivo hasta comprometer la presión máxima admisible (Kemmer & Nalco Chemical Company, 1988). Ante estas condiciones de deterioro, la aplicación de ensayos no destructivos permite evaluar el estado de la unidad de operación e identificar zonas críticas sin afectar su estructura (Camargo & Díaz, 2017).

Por otro lado, las fallas en los dispositivos de control pueden generar condiciones operativas inestables que incrementan el riesgo de accidentes, particularmente cuando no se actúa oportunamente ante desviaciones de los parámetros nominales (Kang et al., 2025). A estos riesgos técnicos se suman factores humanos y organizacionales como el desconocimiento de procedimientos, la insuficiente capacitación del personal y la ausencia de sistemas de gestión de

seguridad, los cuales agravan la probabilidad de eventos no deseados durante la operación de unidades de generación de vapor (Guatava Jiménez, 2024).

La diversidad de los riesgos mencionados evidencia que la seguridad de las calderas no depende únicamente de las características de diseño, sino también de factores técnicos, humanos y organizacionales asociados a su funcionamiento. Por ello, resulta fundamental para la operación de las calderas aplicar metodologías de análisis de riesgos que permitan identificar escenarios de falla, evaluar sus posibles consecuencias y establecer medidas de prevención y mitigación adecuadas (Argüelles et al., 2019).

Específicamente, el estudio de peligros y operabilidad (HAZOP) constituye una metodología ampliamente utilizada para el análisis de riesgos en procesos industriales debido a su enfoque sistemático para identificar desviaciones respecto a las condiciones normales de operación mediante el uso de palabras guía. Esta metodología permite analizar causas, consecuencias y establecer medidas de control asociados a escenarios de riesgo, facilitando la identificación de oportunidades de mejora. Debido a su capacidad para anticipar fallas operativas y evaluar condiciones inseguras, el HAZOP se consolida como una herramienta de amplia aplicación en la gestión de riesgos en unidades de generación de vapor (Rahma & Hasanudin, 2023).

La identificación de riesgos constituye una etapa fundamental dentro de la gestión de la seguridad de procesos. Sin embargo, la reducción efectiva de la probabilidad y las consecuencias de los eventos no deseados requiere la implementación de medidas de control. El enfoque moderno de la seguridad de procesos también incorpora el concepto de capas de protección, entendido como el conjunto de barreras técnicas, operativas y administrativas destinadas a prevenir o mitigar eventos peligrosos (Morrison et al., 2012). En el caso de las calderas, estas barreras incluyen válvulas de seguridad, sistemas de control automático, alarmas, procedimientos operativos,

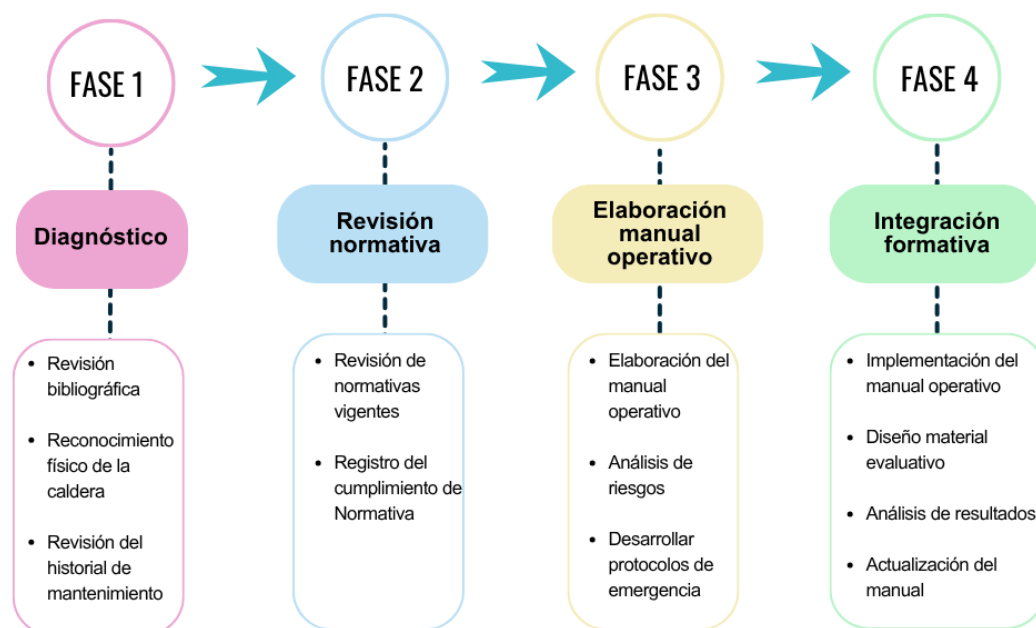
mantenimiento preventivo, capacitación del personal y planes de emergencia (Sepúlveda M. & Ramírez G., 2011). La implementación conjunta de estas medidas contribuye a reducir la probabilidad de incidentes y a fortalecer la seguridad operacional de la unidad de operación.

4. Metodología

El presente trabajo se desarrolló en cuatro fases metodológicas como se muestra en la Figura 2: diagnóstico técnico y operacional, evaluación del cumplimiento normativo relacionado con la operación segura de las calderas, elaboración del manual operativo estándar e integración formativa. Estas etapas permitieron conocer el estado actual de la unidad de operación, identificar brechas de cumplimiento frente a los requisitos normativos aplicables, estructurar procedimientos orientados al fortalecimiento de la seguridad operacional y desarrollar actividades de socialización sobre el uso adecuado y riesgos de operación de una caldera en el entorno académico.

Figura 2.

Diagrama de fases metodológicas.



4.1. Diagnóstico técnico y operacional de la caldera

Esta fase del trabajo se desarrolló a partir de una revisión bibliográfica de operación segura de calderas, un reconocimiento físico de la unidad de operación estudiada y la revisión de su historial de mantenimiento. Estas actividades permitieron recopilar información sobre las condiciones actuales de la caldera pirotubular del LabPro – EIQ, necesaria para el desarrollo de las etapas siguientes de la metodología.

4.1.1. Revisión bibliográfica y documental de la operación segura de calderas

Con el fin de reunir información relevante sobre la operación segura de calderas, se realizó una revisión bibliográfica y documental mediante la consulta de bases de datos como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y ACS Publications. La búsqueda abarcó dos frentes complementarios: por un lado, reportes de accidentalidad a este tipo de unidades de operación, y por otro, estudios que han aplicado la metodología HAZOP como herramienta de gestión de la seguridad en unidades de generación de vapor. La información recopilada se organizó en la sección de resultados.

4.1.2. Inspección física e identificación de componentes de la caldera del LabPro

Se realizó un reconocimiento físico de la caldera en acompañamiento del personal técnico del LabPro, con el propósito de identificar sus componentes principales y condiciones generales de operación. Durante esta actividad se inspeccionaron los componentes relacionados con la combustión, alimentación de agua, distribución de vapor y dispositivos de control.

Además, se realizó la revisión de la documentación técnica disponible en el LabPro, incluyendo el manual del fabricante y la documentación asociada a la caldera, lo que permitió consolidar parámetros técnicos y operativos con el fin de caracterizar la unidad de generación de

vapor y establecer una base de referencia sobre sus condiciones de operación. Las especificaciones técnicas obtenidas se presentan en la sección de resultados.

4.1.3. Recopilación del historial de mantenimiento

El historial de mantenimiento fue recopilado a partir de los registros suministrados por la empresa ARC Ingeniería, entidad contratada por la institución para la ejecución de los mantenimientos, correspondientes a las intervenciones realizadas entre los años 2009 y 2025. Esta información permitió identificar las principales actividades de mantenimiento efectuadas sobre la caldera, así como los conjuntos que han requerido mayor gestión durante su funcionamiento.

4.2. Caracterización del marco normativo aplicable a calderas

Para evaluar las condiciones de seguridad y operación de la caldera del LabPro, se llevó a cabo la identificación y evaluación de los requisitos normativos vigentes aplicables a este tipo de unidades de operación. Esta actividad se desarrolló en dos etapas: primero, la búsqueda y recopilación de leyes, decretos, resoluciones y lineamientos relacionados con mantenimiento, dispositivos de seguridad, condiciones generales de funcionamiento, control de emisiones atmosféricas y manejo de gases de combustión, estos últimos incluidos debido a que las calderas constituyen fuentes fijas de emisión dentro de los procesos térmicos (Minetti et al., 2018), y segundo, la evaluación del grado de cumplimiento actual de la caldera del LabPro frente a cada uno de los artículos identificados.

4.3. Elaboración del manual operativo de la caldera

Para la elaboración del manual operativo se desarrollaron las siguientes actividades: recopilación de información proveniente del manual del fabricante, del personal técnico del LabPro y de las hojas de procedimientos del laboratorio. El manual del fabricante se utilizó como fuente para identificar las especificaciones técnicas y condiciones de diseño de la caldera, mientras

que el personal técnico aportó información sobre las prácticas habituales de operación y mantenimiento. Por su parte, las hojas de procedimientos del laboratorio permitieron revisar las secuencias operativas empleadas en las actividades de encendido y apagado.

Con base en esta información, se estructuraron los procedimientos de encendido, operación segura, apagado, respuesta ante paradas de emergencia y tratamiento de agua, y se propusieron estrategias orientadas a garantizar la seguridad operacional de la unidad. Cada procedimiento se desarrolló en formato de lista de chequeo, con el propósito de facilitar su aplicación, promover la ejecución ordenada de las actividades y contribuir al control operacional. Esta decisión metodológica se sustenta en que, para autores como Karpenko y Bondarenko (2024), estos procedimientos involucran acciones manuales y toma de decisiones por parte del personal técnico, por lo que la existencia de procedimientos claros contribuye al fortalecimiento de la seguridad operacional y a la disminución de los riesgos asociados al factor humano.

Adicionalmente, se definieron las ventanas operativas, estableciendo para cada instrumento los límites estándar y críticos que delimitan las condiciones de funcionamiento. Finalmente, se incluyó el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) de la caldera en el manual operativo, elaborado mediante el software Microsoft Visio®, con el fin de representar de manera integrada las válvulas, líneas de proceso y elementos de control asociados a la unidad.

4.4. Evaluación de riesgos operacionales de la caldera mediante HAZOP

Se desarrolló un análisis de riesgos mediante la metodología HAZOP, con el propósito de identificar de manera sistemática posibles eventos peligrosos asociados a la unidad de generación de vapor. El análisis se llevó a cabo en dos sesiones de trabajo de dos horas cada una, con la participación de un equipo multidisciplinario conformado por docentes del área de ingeniería química y de mecánica, personal técnico del LabPro y las autoras del presente trabajo.

El análisis fue liderado por la docente Diana Paola Duarte, Doctora en Ingeniería Química, y contó con la participación del profesor Humberto Escalante, Doctor en Ingeniería Química; el profesor Oscar Bohórquez, Doctor en Ingeniería de Materiales; los técnicos del LabPro Wilson Eduardo Carreño y Camilo Andrés Becerra; y las autoras del presente trabajo, Laura Archila y Dayra Rojas. La diversidad de perfiles permitió integrar diferentes perspectivas técnicas relacionadas con la operación, el mantenimiento, los materiales y la seguridad de la unidad. Para el desarrollo del análisis, la caldera fue evaluada como un único nodo de estudio, definido a partir de los parámetros operacionales considerados críticos (Tabla 1).

Tabla 1.

Parámetros considerados durante el análisis HAZOP.

Nodo	Parámetro evaluado
Unidad de operación para la generación de vapor (caldera pirotubular)	Flujo de agua
	Composición del agua
	Flujo de Gas
	Presión
	Exposición a superficies de alta temperatura

A partir del nodo de análisis y los parámetros definidos, se evaluaron posibles desviaciones respecto a las condiciones estándar de operación, con el fin de identificar causas potenciales, consecuencias asociadas y recomendaciones orientadas a fortalecer la seguridad operacional de la unidad de generación de vapor.

4.5. Implementación de la información técnica de la caldera en el entorno académico

Con el propósito de fortalecer la apropiación del conocimiento sobre la caldera pirotubular del LabPro y promover la socialización de los riesgos asociados a su operación, se implementó una estrategia formativa dirigida a estudiantes de Ingeniería Química, desarrollada en tres etapas. La primera consistió en una charla introductoria sobre seguridad de procesos industriales,

orientada a la identificación de peligros y a los conceptos generales de la caldera. La segunda etapa comprendió una sesión práctica de reconocimiento del funcionamiento de la unidad y del tratamiento de agua, incluyendo la medición de la dureza del agua mediante titulación. La tercera etapa consistió en la validación práctica de los procedimientos de encendido y apagado incorporados en el manual operativo, ejecutados por estudiantes bajo acompañamiento técnico.

El desempeño de los estudiantes en las dos primeras etapas se evaluó mediante un cuestionario de conocimientos (quiz), lo que permitió valorar cuantitativamente la efectividad de las jornadas formativas y obtener retroalimentación sobre los temas de interés y las sugerencias metodológicas de los participantes. En conjunto, estas actividades buscaron favorecer la familiarización de los estudiantes con una unidad de generación de vapor de aplicación industrial y promover una cultura de seguridad en el entorno académico.

5. Resultados

5.1. Revisión bibliográfica y documental de la operación segura de calderas

La revisión bibliográfica permitió recopilar información sobre experiencias reportadas en la literatura, eventos de accidentalidad y aspectos críticos de seguridad asociados a la operación de calderas, proporcionando un contexto de referencia para el desarrollo de esta investigación.

5.1.1. Accidentalidad y factores de riesgo en calderas

La recopilación y análisis de accidentes reportados en la literatura permitieron identificar patrones recurrentes en la accidentalidad asociada a unidades de generación de vapor y reconocer los factores que pueden comprometer su operación segura. La Tabla 2 presenta los principales peligros y eventos de riesgo identificados en la literatura, junto con sus causas y consecuencias.

Tabla 2.

Causas y consecuencias de accidentes en calderas reportados en la literatura.

Peligro	Evento de riesgo	Causas	Consecuencias	Fuente
Presión elevada	Explosión por sobrepresión	Fallo en dispositivos de control de presión o válvula de alivio	Explosión de la caldera y daños a las instalaciones	(Kang et al., 2025);(Hatala et al., 2023)
Bajo nivel de agua	Sobrecalentamiento de los tubos de la caldera	Fallo en control de nivel o flujo de agua	Deformación o ruptura de los tubos	(Hatala et al., 2023); (Ai et al., 2015)
Fallas en el sistema de control	Pérdida del control del proceso	Mal funcionamiento de sistemas automáticos	Desviación de las condiciones de operación	(Kang et al., 2025)
Error humano	Accidente operacional	Operación no estandarizada y escasez de operadores calificados	Afectación al personal, a la unidad y a la continuidad del proceso	(Rahman et al., 2022)
Deterioro de la integridad mecánica	Falla estructural	Falta de inspección periódica y uso de unidades no certificados	Pérdida de la integridad mecánica de la caldera	(Rahman et al., 2022);(Hatala et al., 2023)
Gestión deficiente de la seguridad	Accidente mayor	Ausencia de análisis de riesgos y planes de emergencia	Afectación a las personas, las instalaciones y el ambiente	(Landi et al., 2022); (Morrison et al., 2012)
Fallas en procedimientos operativos	Accidente operacional	Errores en arranques y operación	Daños a la caldera e interrupción de la operación	(Rahman et al., 2022); (Karpenko & Bondarenko, 2024)
Combustión inadecuada	Pérdida del control de la combustión	Mezcla inadecuada aire – combustible	Combustión ineficiente e inestabilidad del proceso	(Kang et al., 2025)
Deficiencias en la comunicación	Error operativo	Deficiencias en la transmisión de información	Incremento de los errores operativos y la probabilidad de incidentes	(Landi et al., 2022)

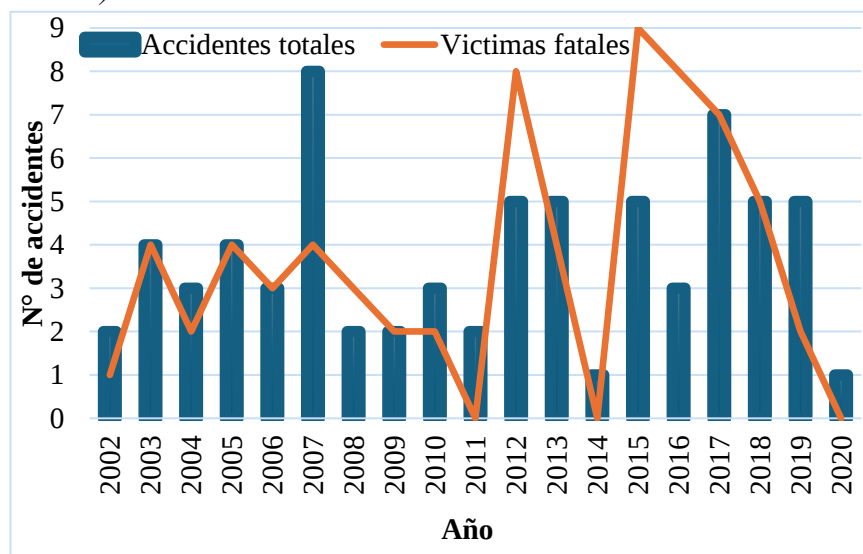
Entre los escenarios de riesgo reportados en la Tabla 2, la explosión por sobrepresión ha sido el más crítico descrito en la literatura. Un estudio basado en el análisis de 586 casos de accidentes en calderas industriales identificó, mediante la metodología HAZOP, 37 factores causales agrupados en las categorías hombre, máquina, entorno y gestión (Kang et al., 2025). Este

estudio refleja que este tipo de eventos no se originan por una causa aislada, sino por la interacción de múltiples factores que comprometen la seguridad de la caldera. Además de las fallas asociadas a la sobrepresión, la literatura señala que la degradación de la estructura por fatiga térmica, la corrosión y la pérdida de espesor del material son factores que comprometen la integridad de la unidad cuando no se cuentan con programas de inspección sistemática (Hatala et al., 2023).

No obstante, los factores humanos y organizacionales, relacionados con la capacitación del personal, el cumplimiento de los procedimientos, la comunicación efectiva y las prácticas de gestión del riesgo, concentran gran parte de las oportunidades de mejora identificadas en la prevención de accidentes (Gonyora & Ventura-Medina, 2024). Lo anterior se refleja en un análisis de incidentes ocurridos en Brasil entre 2002 y 2020 (Figura 3), el cual evidenció que los factores humanos y organizacionales suelen ser subestimados en las investigaciones oficiales, aunque influyen significativamente en la gravedad de los eventos (Landi et al., 2022).

Figura 3.

Consolidado del número de accidentes y víctimas fatales en accidentes operacionales en calderas en Brasil (2002-2020).



Nota. Adaptado de Landi et al., 2022

En la anterior gráfica se observó que la accidentalidad en calderas en Brasil mantuvo un comportamiento persistente durante casi dos décadas, registrándose al menos una víctima fatal por año, excepto en 2011, y alcanzando un máximo de 9 personas fallecidas en 2015 (Landi et al., 2022). Aunque estos resultados corresponden al contexto brasileño, constituyen una referencia para comprender la tendencia de los accidentes en calderas en escenarios latinoamericanos.

Ahora bien, en Colombia no existe una fuente oficial de acceso público que consolide la información sobre accidentes en calderas y permita realizar un análisis histórico (Sepúlveda Moya & Ramírez G., 2011). En consecuencia, en Colombia la información disponible proviene de reportes divulgados por medios de comunicación, los cuales suelen hacer énfasis en informar el suceso y sus consecuencias, sin profundizar en sus causas. La divulgación suele concentrarse en accidentes de alta gravedad, lo que dificulta conocer la magnitud de la problemática en el país.

5.2. Caracterización técnica y operativa de la caldera del LabPro

La caracterización técnica de la caldera fue necesaria para comprender sus condiciones de diseño, configuración y funcionamiento. La unidad de operación objeto de estudio corresponde a una caldera pirotubular horizontal instalada en el LabPro – EIQ – UIS, cuyas características técnicas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3.

Características técnicas de la caldera.

Parámetro	Especificación
Año de construcción	1990
Ubicación	Laboratorio de Procesos, Escuela de Ingeniería Química – UIS (Bucaramanga)
Sección de planta	Distribución de vapor
Tipo de caldera	Horizontal pirotubular
Marca	Colmaquinas S.A. / Distral S.A.

Proveedor	Calderas Continental S.A.
Serie	A-2644
Modelo	CH2-30-150
Número de pasos	2
Quemador	5LG – G
Capacidad	30 bhp
Clasificación según potencia	Categoría II (Resolución 1857 de 2024, art. 3)
Tipo de control de combustible	On - off
Tipo de combustible	Fuئل oil No.2 y gas natural
Presión de operación	125 psi
Presión de diseño	150 psi
Generación calorífica	1004,3 btu/h
Tipo de aislante	Lana mineral de 2 in
Dimensiones (Alto x Ancho)	220 x 130 cm

La Tabla 3 permitió un análisis de las condiciones de la caldera a partir de sus parámetros de diseño. La unidad fue construida en 1990, por lo que cuenta con más de tres décadas de servicio. Esta condición resulta relevante desde el punto de vista de la integridad mecánica, ya que las unidades de operación sometidas a presión durante largos períodos de operación pueden experimentar fenómenos progresivos de corrosión, fatiga térmica y pérdida de espesor del material (Deshmukh & Dhamangaonkar, 2025). Otro aspecto relevante corresponde al aislamiento térmico; la caldera emplea lana mineral, un material ampliamente utilizado en unidades de generación de vapor por su capacidad para minimizar las pérdidas de calor y reducir el riesgo de contacto del personal con superficies a altas temperaturas (Thermodyne Engineering Systems, 2026). Adicionalmente, la relación entre la presión de operación (125 psi) y la de diseño (150 psi) evidencia un margen de seguridad del 17 %, acorde con las prácticas recomendadas para calderas pirotubulares de baja y media presión (ASME, 2021).

La inspección visual de la caldera facilitó la identificación de sus componentes. En la Figura 4 se muestran los principales elementos reconocidos durante esta actividad. Adicionalmente, en el Apéndice A, correspondiente al Manual Operativo Estándar, se presentan vistas complementarias de la caldera, con el detalle de sus componentes y la función de cada uno.

Figura 4.

Principales componentes de la unidad generadora de vapor.



5.2.1. Conjuntos constitutivos de la unidad de generación de vapor

La identificación de los componentes que conforman la caldera permitió complementar el reconocimiento físico realizado. La Tabla 4 presenta los principales conjuntos identificados durante la inspección, junto con los elementos asociados a las funciones de combustión, alimentación de agua, control de nivel y presión, purgas y control eléctrico. Esta organización por conjuntos facilitó comprender la configuración general de la unidad.

Tabla 4.

Componentes principales identificados en los conjuntos de la caldera del LabPro.

Conjunto	Componentes principales
Quemador	Boquillas, fotocelda Fireye UV-2, electrodos, válvulas solenoides, transformador de ignición y porta-mirilla.
Combustión	Cámara de combustión, mirillas Pyrex, motor del ventilador SIEMENS 2.4 BHP, controles de presión de aire y gas Honeywell.
Purgas	Válvulas de cierre lento y rápido (Lunkenhaim y Everlasting).
Alimentación de agua	Bomba Aurora Pumps F5T, motor SIEMENS 3.6 HP, control de nivel Hydro VFSN-12, tanque de condensados de 70 gal, filtro en Y, válvulas de globo, compuerta y cheque, manómetro, termómetro, tanque suavizador de 11 gal y resina catiónica de ácido fuerte (SAC).
Control de nivel	Control McDonnell N.º 157, nivel visible Essex Brass, grifos, electrodo y relé Warrick.
Presión y modulación	Dos válvulas de seguridad Consolidated de 1½" y 150 psi, manómetro Ashcroft de 0–300 psi, control límite de presión Honeywell L-404, conector múltiple y sifones.
Gabinete de control	Contactores y térmicos Danfoss, control de combustión Fireye UVM2, temporizadores SIEMENS, fusibles, lámparas piloto, selectores y regleta de conexiones.

La Tabla 4 evidenció que la caldera cuenta con conjuntos destinados al suministro de combustible y agua, el control de las variables de operación y la protección de la caldera. Esta caracterización contribuyó a la elaboración del manual operativo estándar, cuyo propósito fue estandarizar los procedimientos y reducir el error humano (Karpenko & Bondarenko, 2024), además de facilitar la formación de usuarios ante la rotación frecuente propia del entorno académico (Yang et al., 2022).

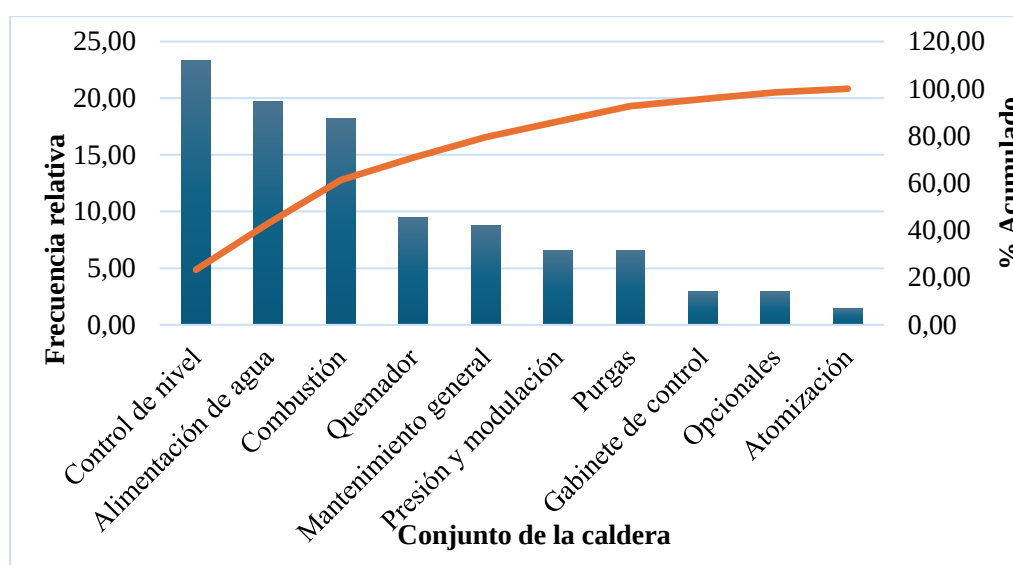
5.2.2. Análisis de mantenimientos de la caldera del LabPro

Las actividades realizadas por la empresa ARC Ingeniería incluyeron mantenimientos asociados al horno para la combustión, controles de nivel, válvulas de seguridad, bombas para la alimentación de agua y componentes eléctricos y de control. Asimismo, se identificaron intervenciones relacionadas con la limpieza interna de la caldera, pruebas hidrostáticas, mantenimiento del quemador, cambio de empaques y verificación de parámetros operacionales. A

partir de los 137 procedimientos de mantenimiento documentados entre 2009 y 2025, se clasificaron las intervenciones por conjuntos para reconocer aquellos que han requerido mayor atención durante la vida operativa de la unidad. La Figura 5 presenta el análisis de Pareto, con la frecuencia relativa y el porcentaje acumulado que permite identificar los conjuntos que concentran la mayor parte de los procedimientos de mantenimiento efectuados a la caldera.

Figura 5.

Diagrama de Pareto de los procedimientos de mantenimiento por conjunto de la caldera del LabPro (2009–2025).



La Figura 5 evidenció que los conjuntos de control de nivel, alimentación de agua, combustión, quemador y mantenimiento general (cambios de válvulas, tuercas y tornillos) concentraron cerca del 80 % de los procedimientos de mantenimiento ejecutados entre 2009 y 2025. En contraste, los conjuntos de presión y modulación, purgas, gabinete de control, opcionales (cambios de empaques y de la mariposa de las tapas de los handholes) y atomización (mantenimiento del filtro y del atomizador de ACPM) representaron una contribución menor. Este comportamiento, consistente con el principio de Pareto, indicó que los conjuntos de mayor

participación requirieron una mayor atención durante la vida útil de la caldera, dada su influencia directa en la generación de vapor y en las condiciones de operación segura.

5.3. Cumplimiento del marco normativo vigente para calderas en Colombia

La revisión normativa permitió identificar los principales requisitos legales aplicables a la operación, mantenimiento, seguridad y control ambiental de calderas en Colombia. La Tabla 5 consolidó las disposiciones establecidas en leyes, decretos y resoluciones vigentes, junto con los artículos evaluados, el grado de cumplimiento de la caldera pirotubular del LabPro y las acciones pendientes para subsanar las brechas identificadas.

Tabla 5.

Principales normativas aplicables a calderas en Colombia y su cumplimiento.

Normativa	Artículo	Aspecto evaluado	Condición caldera LabProc. - EIQ		
			Cumplimiento	Acción adelantada en este trabajo	Acción pendiente
Resolución 1857 de 2024 (Ministerio de Trabajo, 2024)	Art. 3	Clasificación y categorización de la caldera según su potencia o capacidad de generación de vapor.	Cumple	Se determinó y documentó la clasificación de la caldera como Categoría II (30 bhp ≈ 294,3 kW).	—
	Art. 6-7	Existencia y contenido del programa de gestión en trabajo en calderas.	Parcial	Con este trabajo y el manual operativo estándar se cumplen los ítems 1,2,6,8 y 14.	Por parte de la universidad implementar los ítems 3,4,5,7,9,10,11, 12,13 y 15.
	Art. 8	Identificación de peligros, evaluación y valoración de riesgos asociados a la operación y mantenimiento.	Parcial	Se desarrolló el análisis HAZOP desviaciones y definió medidas de control.	Integrar los resultados del HAZOP en la matriz de peligros que dispone la universidad y establecer revisión periódica.
	Art. 9	Inspecciones, mantenimiento	Parcial	El manual operativo estándar	Formalizar un programa

		preventivo y pruebas para verificar la integridad de la caldera.		incorpora procedimientos de verificación y ventanas operativas.	documentado de inspección con periodicidad definida.
	Art. 11	Preparación y respuesta ante emergencias derivadas de fallas o incidentes en calderas.	Parcial	El manual incluye el procedimiento de parada de emergencia.	Verificación del plan de emergencias institucional y realizar simulacros periódicos.
	Art. 12	Documentación, procedimientos operativos, registros y control operacional de la caldera.	Parcial	Se desarrolló el manual operativo estándar con procedimientos en formato de lista de chequeo.	Mantener actualizado un archivo centralizado de registros de operación y mantenimiento.
Resolución 2400 de 1979 (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1979)	Art. 272	Condiciones de seguridad y correcto funcionamiento de unidades de operación sometidas a presión.	Parcial	El manual documenta los dispositivos de seguridad identificados durante la inspección.	Verificar periódicamente su estado de funcionamiento y documentarlo.
	Art. 343	Protección de los trabajadores expuestos a altas temperaturas mediante elementos de protección personal.	Cumple	El laboratorio exige y registra vestimenta para el ingreso y cuenta con los EPP.	—
	Art. 449	Vigilancia y operación segura de unidades de operación térmicas durante su funcionamiento.	Parcial	El manual establece los procedimientos de encendido, operación y apagado.	Establecer mecanismos formales de supervisión operacional continua.
	Art. 453	Inspección periódica y mantenimiento de unidades de operación de generación de calor.	Parcial	Se evidenció un historial de mantenimiento, predominando los procedimientos correctivos.	Formalizar un programa documentado incluyendo mantenimiento predictivo.
					Incorporar formalmente los peligros y controles identificados en el SG-SST institucional.
Decreto 1072 de 2015 (Ministerio de Trabajo, 2015)	SG-SST	Integración de los riesgos asociados a la caldera dentro del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo.	Parcial	Los resultados del HAZOP quedan disponibles como insumo técnico para el SG-SST.	
Ley 9 de 1979 (Ministerio de ambiente y desarrollo)	Arts. 113–116	Requisitos sanitarios y de seguridad aplicables a recipientes sometidos a presión.	Parcial	El manual documenta los límites operacionales de la caldera.	Mejorar la señalización física de la caldera y sus zonas de riesgo

sostenible, 1979)					como se recomienda en el HAZOP.
Resolución 909 de 2008 (Ministerio de ambiente y desarrollo territorial, 2008)	Arts. 69–71	Requisitos para el diseño de chimeneas, altura mínima y sistemas de muestreo de emisiones atmosféricas.	Parcial	La chimenea fue rediseñada para cumplir con la altura mínima.	No hay registro del diseño, ni puntos de muestreo.
Decreto 1076 de 2015 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015)	Libro 2, Parte 2, Título 5	Permisos, seguimiento y control ambiental asociados a emisiones atmosféricas de fuentes fijas.	No cumple	—	Evaluar la necesidad de tramitar permisos y efectuar seguimiento a emisiones.
Resolución 2254 de 2017 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017)	Aplicación general	Estándares nacionales de calidad del aire y criterios para la protección de la salud y el ambiente.	No cumple	—	Verificar el impacto potencial de las emisiones de la caldera sobre la calidad del aire.

La evaluación normativa evidenció que, de los 15 aspectos revisados, solo dos alcanzaron cumplimiento total, once en estado parcial y dos no cumplen, concentrados en la gestión ambiental de emisiones y en los requisitos puntuales de seguridad industrial. Estos resultados confirman que la operación de la caldera se ha sustentado más en la experiencia empírica del personal que en una estructura documental. El presente trabajo contribuyó al cierre parcial de la mayoría de las brechas mediante el manual operativo y el análisis HAZOP, mientras que las brechas ambientales y de seguridad restantes quedan como recomendaciones para su gestión institucional futura.

5.4. Análisis de riesgos a partir de la metodología HAZOP

El análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP) realizado a la caldera pirotubular del LabPro - EIQ se desarrolló sobre un único nodo de análisis, conformado por la unidad de operación generadora de vapor, la línea de salida de vapor hacia el tanque distribuidor TK-103, el suministro de agua y de gas natural. A partir de la evaluación de este nodo se identificaron ocho desviaciones operacionales asociadas a los parámetros de flujo de agua, composición de agua, flujo de gas,

presión y temperatura de las superficies calientes de la unidad de operación. La Tabla 6 presenta una síntesis de las desviaciones identificadas, incluyendo sus principales causas, consecuencias, medidas de seguridad y recomendaciones. En el Apéndice B se encuentra la información completa de la herramienta HAZOP diligenciada durante el análisis.

Tabla 6.

Resultados del análisis HAZOP a la caldera del LabPro – EIQ – UIS

Parámetro	Desviación	Causa	Consecuencia	Medida de seguridad	Recomendación
Flujo de agua	Mayor flujo de agua hacia la caldera	Falla del control de nivel asociado a LG-06	Disminución de la calidad de vapor entregado por arrastre de humedad	Lazo de control asociado a LG-06, programa de calibración anual	Implementar un lazo de control de nivel redundante.
	Menor flujo de agua hacia la caldera	Falla en el suministro de agua o pérdida de capacidad de bombeo	Disminución en la generación de vapor y activación de paro por bajo nivel.	Lazo de control asociado a LG-06, programa de mantenimiento preventivo	Instalar un indicador de presión a la descarga de la bomba P-01.
	Sin flujo de agua hacia la caldera	Falla u obstrucciones en el sistema de suministro de agua	Interrupción de la generación de vapor y posible elevación excesiva de la temperatura de los tubos.	Lazo de control asociado a LG-06, programa de mantenimiento preventivo	Instalar un indicador de presión a la descarga de la bomba P-01.
Composición del agua	Mayor concentración de sales de dureza (carbonato de calcio y magnesio) en el agua que ingresa a la caldera	Saturación o falla del sistema de suavización de agua	Formación de incrustaciones, disminución de la transferencia de calor y reducción de la vida útil de la caldera	Sistema de suavización en el TK-101, retrolavado anual de la resina, revisión semestral de la dureza del agua	Realizar controles bimensuales de la dureza y pH del agua, supervisión de la vigencia del kit de la dureza.
Flujo de gas	Sin suministro de gas	Cierre de válvulas, corte de red o inyectores obstruidos.	Paro de la operación de la caldera, pérdida de generación de vapor, y posibilidad de	Presostato de baja presión PSL-15 y manual operativo estándar.	Implementación de sistema de alarma sonora/visual conectado al presostato de

	conato de incendio por fuga				baja presión PSL-15
Presión	Alta presión en la línea del gas combustible	Daño del regulador PRV-13	Combustión ineficiente, daño en el quemador por aumento de volumen de gas.	Mantenimiento anual del proveedor de gas natural	Unificar y consolidar los registros de mantenimiento del proveedor
	Alta presión de vapor en la caldera y el sistema de distribución	Pérdida del ajuste o daño del controlador de presión PC-05 y válvula de seguridad V-18	Aumento de la presión interna e inestabilidad en el suministro de vapor	Lazo de control de presión PC-05, válvula de seguridad V-18, mantenimiento de trampas de vapor	Instalar una válvula de seguridad en TK-103, realizar aperturas semanales de la válvula de seguridad V-18
Exposición a superficies de alta temperatura	Alta temperatura en las partes expuestas de la caldera	Falta o daño en el aislamiento de las líneas del sistema.	Quemaduras por la exposición a las superficies de alta temperatura	Líneas calientes aisladas y zonas expuestas demarcadas.	Instalación de señalización de puntos calientes.

La Tabla 6 muestra que las desviaciones identificadas permitieron reconocer riesgos asociados a la continuidad de la generación de vapor, el deterioro de la caldera, la sobrepresión y el incendio. Las condiciones de bajo o nulo flujo de agua representan un riesgo para la continuidad de la operación al ocasionar la interrupción de la generación de vapor. Por otra parte, el incremento en la concentración de sales de dureza favorece la formación de incrustaciones, las cuales incrementan la resistencia térmica, disminuyen la eficiencia de la transferencia de calor y aceleran el deterioro de la caldera (Lugo-Granados H. & Picon Nunez M., 2017). Por lo anterior, se recomienda incorporar técnicas de mantenimiento predictivo, particularmente ensayos no destructivos sobre el cuerpo de la caldera, los tubos y las superficies de transferencia de calor, con el fin de detectar tempranamente estos fenómenos. Las alteraciones en la presión de vapor en la caldera y el no suministro de flujo de gas natural pueden comprometer la seguridad operacional al favorecer el incremento de la presión interna y la ocurrencia de conatos de incendio asociados a posibles fugas de gas combustible.

El análisis también permitió identificar el riesgo de quemaduras derivado de la exposición del personal a superficies con altas temperaturas. La interacción permanente de estudiantes, docentes, operadores y personal de mantenimiento con la unidad durante las actividades académicas incrementa la probabilidad de contacto con estas superficies. Este hallazgo resalta la importancia de mantener en adecuadas condiciones el aislamiento térmico y la señalización de las zonas calientes mediante avisos visibles, como medidas para reducir la exposición a este riesgo.

Considerando los riesgos identificados, se formularon diversas recomendaciones orientadas a fortalecer la seguridad operacional de la caldera. Dado que estas medidas implican diferentes niveles de complejidad técnica y requerimientos de implementación, se propone su ejecución de manera gradual:

a) Primera etapa: a corto plazo, se recomienda la implementación del manual operativo estándar desarrollado en este trabajo. También se recomienda el seguimiento bimensual de variables como el pH y la dureza en dos puntos estratégicos (en la salida del tanque TK-102 y en la purga de la caldera), así como la apertura semanal de la válvula de seguridad V-18 con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y evitar su bloqueo. Finalmente, se recomienda unificar los registros de mantenimiento y verificar que los reactivos utilizados para las mediciones se encuentren vigentes y almacenados bajo las condiciones establecidas por el fabricante, para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

b) Segunda etapa: a mediano plazo, se propone la instalación de un manómetro con un rango de medición de 0 a 200 psi antes de la bomba P-101 para monitorear la presión de alimentación de agua. Como medidas complementarias, se plantea incorporar una alarma sonora/visual asociada al presostato PSL-15, realizar la verificación anual del indicador de presión

PI-01 y el mantenimiento anual de la caldera, incluyendo los inyectores de gas. Se recomienda el monitoreo de los gases de combustión, en atención a los requisitos ambientales para fuentes fijas de emisión (Resolución 909 de 2008; Decreto 1076 de 2015). De igual forma, se recomienda instalar señalización de los puntos calientes para fortalecer la seguridad durante la operación.

c) Tercera etapa: a largo plazo, la implementación de un lazo de control de nivel redundante y de una válvula de seguridad adicional en el tanque distribuidor TK-103, contribuiría a incrementar la confiabilidad de la unidad de operación frente a las desviaciones identificadas.

5.5. Manual operativo estándar de la caldera del LabPro – EIQ

Durante el diagnóstico inicial se identificó que gran parte de la información técnica y operativa se encontraba dispersa en diferentes documentos. También se identificó que varias actividades dependían principalmente de la experiencia del personal técnico encargado del laboratorio. En respuesta a esta situación, se desarrolló un documento unificado que reunió los lineamientos técnicos y operacionales necesarios para el manejo seguro de la unidad de generación de vapor, con el propósito de reducir los riesgos de accidentalidad asociados a su operación.

Como parte de la consolidación del manual, se actualizó y complementó el diagrama P&ID desarrollado previamente por Guatava Jiménez (2024) con la información obtenida durante las inspecciones realizadas a la unidad, lo que permitió reunir en un único plano la configuración actual de las líneas, válvulas e instrumentos de la caldera. Adicionalmente, esta revisión evidenció que los componentes de la unidad (válvulas, instrumentos y dispositivos de control) no contaban con una identificación clara, por lo que se realizó su caracterización y etiquetado, facilitando su reconocimiento durante las actividades de operación, mantenimiento y formación académica. La Figura 6 muestra el resultado del etiquetado sobre los componentes de la caldera.

Figura 6.

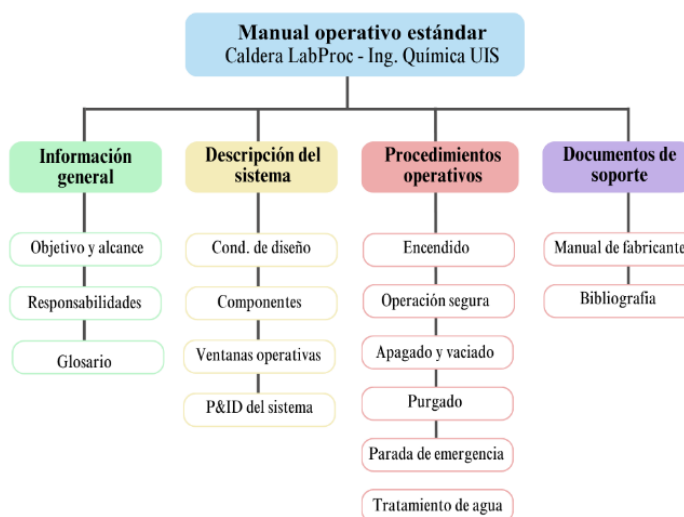
Etiquetado de válvulas e instrumentos de la caldera del LabPro.



La información recopilada sirvió de base para la elaboración del manual operativo estándar de la caldera del LabPro. El manual fue estructurado en cuatro componentes: a) información general, b) descripción de la unidad, c) procedimientos operativos, como eje central y d) documentos de soporte técnico (Figura 7). Esta organización incorporó elementos similares al Manual de Operación y Mantenimiento de Calderas de Vapor de Combustibles Fósiles (Sincal, 2018) y permitió que el documento fuese funcional tanto para usuarios con experiencia previa en calderas como para quienes se acercan por primera vez a la unidad.

Figura 7.

Estructura general del manual operativo estándar de la caldera del LabPro.



Los procedimientos operativos se revisaron frente a la práctica real del laboratorio y se estandarizaron en formato de listas de chequeo, con el propósito de establecer instrucciones secuenciales que reduzcan la omisión de pasos críticos y disminuyan la probabilidad de error humano durante la operación (Gómez Buitrago, 2013). En este sentido, los procedimientos de encendido y apagado, antes instrucciones generales transmitidas de manera informal por el personal técnico, se transformaron en secuencias detalladas de actividades, verificaciones y criterios de seguridad. Asimismo, se documentaron por primera vez procedimientos que no existían formalmente: las purgas de la unidad, el vaciado de la caldera, la verificación de dispositivos de seguridad y el tratamiento del agua de alimentación. Esta ampliación ofrece lineamientos estandarizados para actividades que antes se ejecutaban sin un procedimiento escrito.

En conjunto, estas mejoras permitieron consolidar el manual operativo estándar como una herramienta que integra información técnica, criterios de seguridad y procedimientos estandarizados en un único documento de consulta, orientado a fortalecer la seguridad operacional de la caldera del LabPro. El contenido completo del manual se presenta en el Apéndice A.

5.6. Socialización a los estudiantes de Ingeniería Química sobre el uso adecuado y riesgos en la operación de una caldera

En el marco de la implementación del manual operativo como herramienta de apoyo para la asignatura Laboratorio de Procesos I, se llevó a cabo una jornada formativa sobre seguridad de procesos industriales con énfasis en la operación de calderas. En esta sesión, se abordaron los conceptos fundamentales de seguridad de procesos, incluyendo la distinción entre peligro y riesgo, las barreras de seguridad, la escala de eventos de accidentalidad y la jerarquía de control de riesgos. Asimismo, se presentó el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) para la clasificación de sustancias peligrosas, los elementos de protección personal requeridos en el laboratorio, los

principios de funcionamiento y los dispositivos de seguridad de la caldera. Finalmente, se analizaron las fallas operacionales más frecuentes, entre ellas la sobrepresión, el sobrecalentamiento, el golpe de ariete, la corrosión en tubos, las fugas de combustible y la combustión incompleta, así como los riesgos y consecuencias derivados de una operación inadecuada, como la falta de capacitación, la omisión de purgas y la ausencia de revisión de instrumentos.

Adicionalmente, se efectuó un proceso formativo dirigido a los estudiantes de la asignatura Laboratorio de Procesos I, orientado al reconocimiento del funcionamiento general de la caldera y el tratamiento de agua asociado. Durante esta sesión se describió la función de los componentes principales de la unidad de operación, complementada con una demostración práctica de la determinación de la dureza del agua mediante titulación con EDTA (Figura 8). En el procedimiento, se añadieron tres gotas de negro de eriocromo a cada muestra como indicador. Posteriormente, el titulante se incorporó gota a gota utilizando una probeta calibrada, registrándose el volumen consumido durante la valoración, el cual corresponde directamente al valor de dureza de la muestra. Para la determinación de este parámetro, se recolectaron muestras en tres puntos del sistema: agua potable de la red hidráulica, salida del tanque de almacenamiento de agua suavizada y purga de la caldera, tal como se muestra en la Figura 9. La asistencia de los estudiantes a esta jornada se evidenció en el Apéndice C.

Figura 8.

Medición de la dureza del agua, que se alimenta a la caldera, durante las charlas en el LabPro.



Figura 9.

Muestras de agua tomadas en: i) purga interior de la caldera (izquierda), ii) salida del tanque suavizador (centro) y iii) agua potable de la red hidráulica de la UIS (derecha).



Como se observa en la Figura 9, las muestras presentaron diferente tonalidad; no obstante, la determinación de la dureza mediante titulación permitió establecer que la muestra proveniente de la red hidráulica de la UIS registró una dureza de 90 mg/L CaCO_3 , mientras que las muestras tomadas en el fondo del tanque de alimentación y en la purga de la caldera presentaron una dureza de 3 mg/L CaCO_3 . Este valor se encuentra dentro del rango recomendado de 1 a 3 ppm de dureza total para calderas pirotubulares de baja y media presión (Babcock & Wilcox, s. f.), lo que evidenció la efectividad del proceso de suavización para remover los iones de carbonato de calcio y magnesio responsables de la dureza. La baja dureza del agua de alimentación contribuye a minimizar la formación de incrustaciones en las superficies de transferencia de calor, favoreciendo una operación más eficiente y prolongando la vida útil de la unidad de generación de vapor (Lugo-Granados H. & Picon Nunez M., 2017). Asimismo, esta actividad permitió a los estudiantes relacionar los conceptos teóricos abordados durante la jornada formativa con resultados experimentales obtenidos en el LabPro.

Con el propósito de evaluar el nivel de aprendizaje alcanzado por los estudiantes a partir de las actividades desarrolladas, se aplicó un cuestionario de conocimientos (quiz, Apéndice D).

Los resultados obtenidos permitieron valorar cuantitativamente la efectividad de las jornadas de formación impartidas sobre la operación segura de la caldera, los principios básicos de su funcionamiento y los riesgos asociados a su operación. Asimismo, el análisis de los resultados proporcionó información sobre el grado de comprensión de los conceptos abordados durante las sesiones teóricas y prácticas, permitiendo identificar fortalezas y oportunidades de mejora en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Resultados del quiz implementado a los estudiantes que participaron de las charlas formativas.

Conocimiento evaluado	Criterio de evaluación	Respuestas correctas [%]
Presión de operación de la caldera	Identificación del rango de presión segura de operación (80-100 psi)	100
Nivel de agua en la caldera	Reconocimiento de las consecuencias de un bajo nivel de agua	100
Tratamiento del agua de alimentación	Comprensión de la influencia de la dureza del agua en la operación de la caldera	100
Dispositivos de seguridad	Identificación de la válvula de alivio como mecanismo de protección	100
Dispositivos de seguridad	Explicación del funcionamiento de la válvula de alivio	88
Actuador del operador	Descripción de la acción inmediata ante una falla del control de presión	74

Como se observa en la Tabla 7, el 100 % de los estudiantes respondió correctamente las preguntas relacionadas con los conceptos fundamentales sobre la operación segura de la caldera. Sin embargo, las preguntas que requerían una mayor capacidad de análisis presentaron porcentajes inferiores de respuesta correcta, alcanzando un 88 % en la explicación del funcionamiento de la válvula de alivio y un 74 % en la descripción de la acción inmediata del operador. Estos resultados evidenciaron una adecuada apropiación de los conceptos impartidos, aunque aún es necesario fortalecer la comprensión de situaciones que demandan un mayor nivel de razonamiento técnico.

Asimismo, el cuestionario incluyó dos preguntas de retroalimentación para identificar los temas que los estudiantes consideraron necesario profundizar y recopilar sugerencias sobre la metodología empleada durante la jornada formativa. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8, donde se observa que los estudiantes manifestaron mayor interés en ampliar sus conocimientos sobre el control de presión y los sistemas de seguridad asociados a la operación de la caldera. En cuanto a la metodología, las principales sugerencias estuvieron orientadas a incorporar material visual para facilitar la comprensión del funcionamiento de la caldera, sus dispositivos de seguridad y riesgos asociados a su operación. Estos resultados evidencian oportunidades para fortalecer futuras jornadas de capacitación que favorezcan la apropiación de los contenidos por parte de los estudiantes.

Tabla 8.

Resultados de las preguntas de retroalimentación aplicadas a los estudiantes.

Tema a profundizar	Frecuencia	Sugerencias metodológicas	Frecuencia
Control de presión y límites operativos	18	Material visual (diapositivas/folletos)	20
Sistemas de seguridad y válvulas	15	Visualización de casos reales	17
Tratamiento del agua	9	Demostraciones prácticas	10
Panel de control y válvulas manuales	7	La metodología fue adecuada	7
Protocolos de emergencia	6	Grupos más pequeños o uso de micrófono	5
Quemador y componentes internos	4	Diagrama P&ID y esquema	4

Como etapa final del proceso de implementación, un grupo de estudiantes de la asignatura Análisis de Procesos Químicos participó en el procedimiento de encendido y apagado de la caldera siguiendo las instrucciones del manual operativo estándar, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Prueba de encendido y apagado de la caldera mediante el manual operativo por parte de estudiantes.



Los estudiantes ejecutaron los pasos de forma ordenada y segura, identificando los componentes de la unidad de operación y aplicando las medidas de seguridad establecidas. La correcta ejecución por parte de usuarios sin entrenamiento previo específico confirmó que las instrucciones del manual fueron claras y aplicables en el entorno académico, validando su funcionalidad como herramienta técnica y pedagógica para la operación segura de la caldera. Durante la actividad no se identificaron observaciones negativas ni dificultades en la interpretación de los procedimientos, lo que respaldó la claridad y suficiencia del nivel de detalle del manual para esta primera validación. No obstante, dado que la prueba se realizó con un único grupo de estudiantes, se recomienda continuar aplicándola en los próximos semestres, con el fin de ampliar la muestra de validación y confirmar la aplicabilidad del manual de manera sostenida en el tiempo.

6. Conclusiones

El diagnóstico técnico de la unidad generadora de vapor del LabPro, con más de tres décadas de operación, se clasifica como una caldera pirotubular de Categoría II según la Resolución 1857 de 2024.

A partir de los 137 procedimientos de mantenimiento ejecutados a la caldera del LabPro por la empresa ARC Ingeniería entre 2009 y 2025, se realizó un análisis de Pareto que evidenció que los conjuntos de control de nivel, alimentación de agua y combustión concentran el 61,31 % de las intervenciones registradas, posicionándolos como los de mayor atención durante la vida útil de la caldera.

La evaluación normativa de la caldera demostró que de los 15 aspectos evaluados solo dos alcanzaron cumplimiento total, once quedaron en estado parcial y dos no cumplen, concentrados en la gestión ambiental de emisiones. Esto confirmó que la operación de la caldera se ha gestionado con base en el criterio y la experiencia del personal técnico, careciendo de una estructura documental actualizada.

Se elaboró un Manual Operativo Estándar a la caldera del LabPro que integra su información técnica, el diagrama P&ID actualizado, el etiquetado de sus componentes y los procedimientos operativos en formato de lista de chequeo, incluyendo protocolos antes inexistentes como purgas, vaciado, verificación de dispositivos de seguridad y tratamiento del agua.

Las medidas de control existentes se sustentaron en el análisis HAZOP, el cual permitió identificar los principales riesgos asociados a la operación de la caldera: sobrepresión, sobrecalentamiento, continuidad en la generación de vapor, deterioro de la caldera y quemaduras

por exposición a superficies calientes, orientando así las recomendaciones hacia los aspectos de mayor relevancia para la seguridad de los usuarios.

La implementación del manual operativo en el entorno académico, mediante las jornadas formativas (seguridad de procesos, funcionamiento de la caldera, verificación del tratamiento del agua) y la validación práctica de los procedimientos de encendido y apagado con estudiantes de pregrado de la EIQ, confirmó su funcionalidad como herramienta pedagógica: el 100 % de los estudiantes respondió correctamente los ítems evaluados. El manual queda disponible como herramienta de consulta para el uso continuo del LabPro.

7. Recomendaciones

Sobre el mantenimiento y el control operacional: se recomienda mantener un registro documentado y centralizado de las intervenciones ejecutadas por el proveedor de mantenimiento, que especifique el componente atendido y el tipo de intervención realizada, así como documentar las revisiones de la dureza y el pH del agua en la salida del tanque suavizador TK-101 y en la purga de la caldera, garantizando que los reactivos empleados en estas mediciones se encuentren vigentes y almacenados según las condiciones del fabricante.

Sobre la gestión formativa: se recomienda actualizar el manual operativo de forma periódica, incorporando las mejoras identificadas después de cada ciclo de uso académico. Con base en la retroalimentación recopilada, se sugiere ampliar la profundidad de los contenidos formativos en control de presión, sistemas de seguridad y protocolos de emergencia, y extender la socialización del manual a todos los usuarios que interactúan con la caldera, incluyendo docentes, practicantes y personal técnico de otros laboratorios que utilicen el vapor generado por la unidad.

Sobre el cumplimiento normativo pendiente: dado que la evaluación normativa identificó brechas que exceden el alcance técnico de este trabajo, se recomienda gestionar ante las instancias institucionales correspondientes: la integración formal de los resultados del análisis HAZOP en la matriz de peligros del laboratorio; la definición y el registro de la entrega de elementos de protección personal para las actividades con la caldera; y la evaluación de los requisitos ambientales aplicables a las emisiones atmosféricas de la unidad, incluyendo el diseño de la chimenea, los permisos de emisión y el monitoreo documentado de la temperatura de los gases de combustión.

Referencias Bibliográficas

- Ai, Y., Liang, X., & Guo, Z. (2015). FaultTree Analysis on Boiler Water Shortage Accidents Based on Safety Ergonomic Theories. En E. Qi, J. Shen, & R. Dou (Eds.), *Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2014* (pp. 229-234). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-102-4_48
- Argüelles, C. L. R., Lacaba, R. M. G., Ortega, R. A. S., & Cruz, R. R. de la. (2019). Importancia de la gestión de riesgos para el desarrollo local. Caso de estudio Consejo Popular Caribe, Cuba. *REVISTA CIENTÍFICA ECOCIENCIA*, 6(5), 1-23. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.65.224>
- ASME, B. (2021). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code*.
- Babcock & Wilcox. (s. f.). *The Importance of Boiler Water and Steam Chemistry*. Babcock & Wilcox. Recuperado 7 de julio de 2026, de <https://www.babcock.com/home/about/resources/learning-center/the-importance-of-boiler-water-and-steam-chemistry>
- Camargo, A. D. A., & Díaz, J. S. M. (2017). *EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CALDERA DE BIENESTAR UNIVERSITARIO UIS EMPLEANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS*.
- Castellanos, V. P. (2024, diciembre 19). *Así fue la explosión en empresa de manejo de residuos que dejó un empleado muerto en Bogotá: Esto se sabe*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/bogota/asi-fue-la-explosion-en-empresa-de-manejo-de-residuos-que-dejo-un-empleado-muerto-en-bogota-esto-se-sabe-3410816>
- Comunidad de Madrid & Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2013). *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*.

- <https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf> (Obra original publicada en Dirección General de Industria, Energía y Minas)
- Deshmukh, S., & Dhamangaonkar, P. (2025a). Investigation of the Triggering Factors that Affect the Bulge Height Estimation of SA213T91 Boiler Tube. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(17), 14131-14148. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09673-4>
- Deshmukh, S., & Dhamangaonkar, P. (2025b). Investigation of the Triggering Factors that Affect the Bulge Height Estimation of SA213T91 Boiler Tube. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(17), 14131-14148. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09673-4>
- Díaz, A. L. O., & Cardona, C. E. T. (2013). *INGENIERO QUIMICO PETROLERO*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.
- Dunjó, J., Fthenakis, V., Vilchez, J. A., & Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
- El Espectador. (2019, agosto 16). *Explosión de caldera en Granada, Meta, dejó una persona muerta y tres más heridas* [Noticia]. <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/explosion-de-caldera-en-granada-meta-dejo-una-persona-muerta-y-tres-mas-heridas-article-876406/>
- Euro air. (2020, noviembre 26). Partes de una Caldera. Componentes y Elementos Principales | Euroair. *Euroair Blog*. <https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera/>

- García J. (2025). *Seguridad de procesos químicos, una disciplina crucial en entornos industriales* [Consejo Colombiano de Seguridad].
https://ccs.org.co/portfolio/seguridad_procesos_quimicos/
- Gómez Buitrago, L. M. (2013). La lista de chequeo: Un estándar de cuidado. *Revista Colombiana de Anestesiología*, 41(3), 182-183. <https://doi.org/10.1016/j.rca.2013.07.001>
- Gonyora, M., & Ventura-Medina, E. (2024). Investigating the relationship between human and organisational factors, maintenance, and accidents. The case of chemical process industry in South Africa. *Safety Science*, 176, 106530. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106530>
- Guatava Jiménez, K. J. (2024). *Estudio de la Seguridad de la Caldera del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander* [Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniera Química].
<https://noesis.uis.edu.co/entities/publication/e412842b-6db4-4bbb-9efe-fb3fa808ded4>
- Hatala, M. H., Sukarsono, B. P., & Nukertamanda, D. (2023). Risk and Reliability Improvement Analysis of Boiler System Using the Failure Mode Effect Analysis & Critical Analysis (FMECA) Method. *Spektrum Industri*, 21(1), 8-20. <https://doi.org/10.12928/si.v21i1.98>
- Kang, J., Su, T., Jin, H., Wang, Y., Wu, L., & Fan, X. (2025). Risk analysis of boiler overpressure explosion based on complex network and fuzzy Bayesian inference. *Engineering Failure Analysis*, 170, 109261. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109261>
- Karpenko, R., & Bondarenko, E. (2024). Control of boiler equipments during starting and stopping periods and methods of optimizing these processes through the use of a decision support system with a machine vision subsystem. *Technology audit and production reserves*, 6, 41-49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.319820>

- Kemmer, F. N. & Nalco Chemical Company (Eds.). (1988). *The NALCO water handbook* (2nd ed). McGraw-Hill Book Co.
- Landi, R. G., Montedo, U. B., & Lahoz, C. H. N. (2022). Using systems theory for additional risk detection in boiler explosions in Brazil. *Safety Science*, 152, 105761. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105761>
- Lugo-Granados H. & Picon Nunez M. (2017). Scaling growth in heat transfer surfaces and its thermohydraulic effect upon the performance of cooling systems. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 799-804. <https://doi.org/10.3303/CET1761131>
- Martinez Osejo, D. E. O. (2017). *DISEÑO DE UNA CALDERA DE GENERACIÓN DE VAPOR PIRO TUBULAR DE 10 BHP EXPANDIBLE A 25 BHP MEDIANTE MÓDULOS*.
- McKay, J., & Jasmine, H. (2025). *Callide Power Station unit offline after «pressure spike», days prior to minister reaffirming coal's «critical role»*. ABC News. <https://www.abc.net.au/news/2025-04-10/callide-power-station-pressure-spike-out-of-action/105159280>
- Minetti, R. P., Fonseca, J. M., & Eduardo Gabriel López. (2018, septiembre 21). *Eficiencia Ambiental y Energética de Calderas en la Provincia de Córdoba, Argentina*. IV Congreso Argentino de Ingeniería – X Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (1979). *Ley 9 de 1979: Por la cual se dictan Medidas Sanitarias*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015, mayo 26). *Decreto 1076: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo*

Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2017). *Resolucion 2254: Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo territorial. (2008, junio 5). *Resolución 909: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-909-de-2008.pdf>

Ministerio de Trabajo. (2015). *Decreto Único Reglamentario 1072 de 2015 Nivel Nacional*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=62506>

Ministerio de Trabajo. (2024, mayo 27). *Resolución 1857 de 2024: Por la cual se establecen los requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para el manejo de calderas y sus equipos relacionados*. <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/67466765/1857.pdf/1e16b8e2-f3e8-fe1e-a0ff-b25f0f5adfb8?t=1716867698747>

Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (1979). *RESOLUCIÓN 2400 DE 1979*. <https://ventanilla.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2400%20-%201979.pdf>

Morrison, D. “Trey”, Fecke, M., & Ramirez, J. (2012). Using layer of protection analysis to understand necessary safeguards for steam boiler operation. *Process Safety Progress*, 31(3), 248-254. <https://doi.org/10.1002/prs.11500>

- Ojeda Cortés, A. (2014, agosto). *CONTROL E INSTRUMENTACION DE UN GENERADOR DE VAPOR PARA LA INDUSTRIA PETROQUIMICA*.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4225/CONTROL%20E%20INSTRUMENTACION%20DE%20UN%20GENERADOR%20DE%20VAPOR%20PARA%20LA%20INDUSTRIA%20PETROQUIMICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oliveira, M. L. de, & Ruppenthal, J. E. (2018). Using the HAZOP procedure to assess a steam boiler safety system at a university hospital located in Brazil. *Revista Gestão Da Produção Operações e Sistemas*, 13(3), 259-259. <https://doi.org/10.15675/gepros.v13i3.1959>
- Patel, S. C. (2026). *Death Toll from Boiler Explosion at Vedanta's India Coal Power Plant Rises to 24, Triggers Probes*. POWER Magazine. <https://www.powermag.com/death-toll-from-boiler-explosion-at-vedantas-india-coal-power-plant-rises-to-24-triggers-probes/>
- Pérez Albán, C. A., Cordovés García, A., & Terán Benalcázar, J. R. (2016). Diseño e implementación de un sistema de control para mejorar la calidad de los gases de combustión de una caldera pirotubular de 5 BHP. *Enfoque UTE*, 7(2), 55-68. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n2.95>
- Rahma, R. A. A., & Hasanudin, A. (2023). *Risk Assessment Analysis in Boiler System with Hazard and Operability Study (HAZOP)*.
- Rahman, Md. A., Karmaker, C. L., Ahmed, T., Khan, Md. I., Morshed, A. K. M. M., & Ali, S. M. (2022). Modelling the causes of boiler accidents: Implications for economic and social sustainability at the workplace. *Heliyon*, 8(6), e09601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09601>

- Rodríguez, M. J. L., Moya, D. A. V., & Monzón, J. A. M. (2015). *FUNCIONAMIENTO Y PÉRDIDAS EN CALDERAS PIROTUBULARES ESTUDIOS DE CASOS*.
- Sepúlveda M., D. L., & Ramírez G., J. (2011). Condiciones de seguridad en calderas de vapor de empresas afiliadas a una administradora de riesgos profesionales en Antioquia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(2), 145-152. (Antioquia, Colombia). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.6268>
- Sepúlveda Moya, D., & Ramírez G., J. (2011). Condiciones de seguridad en calderas de vapor de empresas afiliadas a una administradora de riesgos profesionales en Antioquia, 2009. *Facultad Nacional de Salud Pública: El escenario para la salud pública desde la ciencia*, 29(2), 7.
- Sincal, C. industriales. (2018). *Manual de operación y mantenimiento. Calderas de Vapor a combustibles fósiles*. <https://sincal.es/wp-content/uploads/2018/09/MANUAL-VAPOR-FOSILES.pdf>
- Thermodyne Engineering Systems. (2026). Boiler Insulation: Are You Losing Money Through Heat? *Thermodyne Engineering Systems*. <https://thermodyneboilers.com/boiler-insulation-the-most-ignored-source-of-energy-savings/>
- Viña-Rodríguez, J., Camejo Giniebra, J. J., & Castañeda Valdés, A. (2021). Métodos de estudio más utilizados para el análisis de riesgos de procesos con sustancias peligrosas. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 52(2), 138-160.
- Yang, J., Xuan, S., Hu, Y., Liu, X., Bian, M., Chen, L., Lv, S., Wang, P., Li, R., Zhang, J., Shu, C.-M., & Dou, Z. (2022). The framework of safety management on university laboratory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104871. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104871>

