

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(75)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Pérez Ibañez Hugo Alexander - Reyes Ferreira Fredy Alberto		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Especialización en Gestión de mantenimiento industrial		
DIRECTOR	Luis Alberto Mora Gutiérrez		
CODIRECTOR aplica) (si	No Aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Análisis documental para la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo basado en RCM: caso de la caldera EB-1191D en la estación centauros.		
TITULO EN INGLES	Documentary analysis for the structuring of a preventive maintenance plan based on RCM: case of the EB-1191D boiler at the Centauros station.		
RESUMEN (70 palabras)			
La monografía analiza la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo basado en la metodología rcm (reliability centered maintenance) aplicable en la caldera eb-1191d, ubicada en la estación centauros, meta, colombia. el trabajo se fundamenta en una revisión documental sistemática de literatura científica, técnica y normativa (ISO 14224, ISO 55000, ASME, API), con el objetivo de mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad operacional del equipo.			
RESUMEN EN INGLES			
This monograph analyzes the structuring of a preventive maintenance plan based on the reliability-centered maintenance (RCM) methodology applicable to the EB-1191D boiler, located at the Centauros station in meta, colombia. the work is based on a systematic review of scientific, technical, and regulatory literature (ISO 14224, ISO 55000, ASME, API), with the objective of improving the availability, reliability, and operational safety of the equipment.			
PALABRAS CLAVES	Mantenimiento, Rcm, Caldera, Confiabilidad.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Maintenance, Rcm, Boiler, Reliability.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 82	PLANOS: No	ILUSTRACIONES:33	CD-ROM: No



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co
 Línea de atención: 311 436 1717

**Análisis documental para la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo
basado en RCM: caso de la caldera EB-1191D en la estación centauros.**

Hugo Alexander Pérez Ibáñez

Fredy Alberto Reyes Ferreira

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización en Gestión de Mantenimiento Industrial

Doctor Luis Alberto Mora Gutiérrez

Noviembre 18 de 2025

Tabla de Contenido

Introducción	8
Fundamentos Generales de la Investigación	9
Tipo de Monografía	9
Elección del Tema	9
Delimitación del Tema	9
Desarrollo del Argumento	10
Metodología	11
Marco Referencial	12
Marco Teórico	12
Evolución Conceptual del Mantenimiento	13
El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	13
Integración del RCM con la Gestión de Activos	14
Tendencias Actuales en Mantenimiento Industrial	15
Síntesis Conceptual	15
Marco Normativo	16
Complemento Explicativo	17
Marco Contextual	19
Descripción de los Sistemas y Componentes de la Caldera EB-1191D	21
Estado del Arte y Metodología	51

	3
Estado del Arte.....	51
Revisión de Estudios y Aplicaciones del RCM en Calderas y Equipos Críticos	54
Metodología de Compilación.....	56
Desarrollo de la Propuesta.....	58
Introducción al Capítulo	58
Árbol de Equipos de la Caldera EB-1191D.....	59
Análisis de Criticidad (genérico/documental basado en FMEA)	60
Rutinas Preventivas Propuestas	61
Comparación con Planes Estándar del Fabricante	63
Discusión, Conclusiones y Recomendaciones	66
Discusión de Hallazgos	66
Conclusiones Generales	68
Recomendaciones Académicas y Prácticas	69
Recomendaciones Académicas.....	69
Recomendaciones Prácticas Para la Operación y Mantenimiento.....	69
Referencias	71

Lista de Figuras

Figura 1. Relación entre confiabilidad, gestión de activos e industria 4.0.....	12
Figura 2. Estructura de la norma ISO 55000 y su relación con el mantenimiento industrial.....	19
Figura 3. Caldera EB-1191D	21
Figura 4. Placa del fabricante.....	22
Figura 5. Ventilador de tiro inducido ELG-1191D	23
Figura 6. Placa del fabricante.....	24
Figura 7. Sistema lavador de gases ETK-11924D y bomba EP-11920D.....	25
Figura 8. Placa sistema lavador de gases ETK-11924D	26
Figura 9. Placa bomba EP-11920D.....	26
Figura 10. Tolva colectora de hollín EFM-1191D	27
Figura 11. Placa tolva colectora de hollín EFM-1191D.....	28
Figura 12. Rotoexclusa ELG-11903D.....	29
Figura 13. Rotoexclusa ELG-11903D.....	29
Figura 14. Visor de flama Caldera EB-1191D	31
Figura 15. Compresor EAC-1190D	32
Figura 16. Placa compresor EAC-1190D.....	33
Figura 17. Bombas de alimentación de combustible a caldera EP-11925D y EP-11926D	34
Figura 20. Precalentador de crudo combustible de la caldera EB-1191D.....	37
Figura 21. Válvulas ON–OFF de paso de combustible hacia el quemador de la caldera EB-1191D	38

Figura 22. Válvula controladora de paso de combustible hacia el quemador de la caldera EB-1191D.....	39
Figura 23. Válvula de paso de vapor utilizada para la atomización del combustible en la caldera EB-1191D.....	40
Figura 24. Quemador o atomizador de combustible de la caldera EB-1191D.....	41
Figura 25. Ventilador de tiro forzado ELG-1190D utilizado para el suministro de aire de combustión	43
Figura 26. Válvula de purga utilizada para la descarga de sedimentos en la caldera EB-1191D.....	44
Figura 27. Transmisores e indicadores de temperatura de entrada y salida de agua y vapor en la caldera EB-1191D	45
Figura 28. Tanque de agua suavizada y bombas de alimentación EP-11921D del sistema de alimentación de la caldera EB-1191D.....	47
Figura 29. Bomba EP-11921D de alimentación de agua suavizada hacia la caldera EB-1191D.....	48
Figura 30. I-Pantalla de control del sistema de operación de la caldera EB-1191D.....	49
Figura 31. II-Pantalla de control del sistema de operación de la caldera EB-1191D	50
Figura 32. Representación de la Jerarquía Técnica de un Activo según ISO 14224.....	59
Figura 33. Árbol de equipos para la caldera EB-1191D	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Proceso metodológico de la investigación documental	11
Tabla 2. Normas esenciales y aplicadas.....	17
Tabla 3. Estudios y aportes relevantes sobre la aplicación del RCM en equipos críticos y calderas.....	53
Tabla 4. Equipos críticos de la caldera EB-1191D y su relevancia para la aplicación del RCM.....	55
Tabla 5. Etapas de la metodología de compilación documental.....	57
Tabla 6. Matriz de criticidad genérica para subsistemas de la caldera EB-1191D.....	61
Tabla 7. Rutinas preventivas recomendadas para la caldera EB-1191D	62
Tabla 8. Comparación entre las rutinas del fabricante y la propuesta basada en RCM....	64

Resumen

El mantenimiento industrial es una actividad fundamental para asegurar que las empresas puedan seguir operando de manera continua, segura y eficiente. A través de una gestión adecuada, se busca evitar paradas innecesarias, reducir costos y garantizar que los equipos funcionen correctamente en todo momento.

En este contexto, las calderas industriales representan activos críticos cuya gestión adecuada contribuye a la eficiencia energética y a la calidad del tratamiento del crudo en la industria petrolera. Por ello, esta monografía de compilación tiene como objetivo analizar documentalmente la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance), tomando como caso de referencia la caldera EB-1191D, ubicada en la Estación Centauros, en el departamento del Meta, Colombia.

La investigación se desarrolla mediante una revisión sistemática de literatura científica, técnica y normativa, compilando información proveniente de bases de datos como Scopus y ScienceDirect, normas internacionales (ISO 14224, ISO 55000) y literatura especializada en gestión de mantenimiento. A partir del análisis comparativo de experiencias reportadas, se plantean lineamientos orientados a mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad operacional del equipo de estudio.

El trabajo se enmarca en la línea de investigación de Mantenimiento Preventivo de la Especialización en Gestión de Mantenimiento Industrial de la UFPSO, aportando una propuesta académicamente sólida para la aplicación de metodologías de confiabilidad en activos críticos del sector energético.

Introducción

En la actualidad, la gestión del mantenimiento industrial es un factor decisivo para la sostenibilidad y eficiencia de los procesos productivos, especialmente en sectores como el petrolero, donde la continuidad operacional depende de la confiabilidad de equipos críticos como las calderas. La complejidad tecnológica y las exigencias de seguridad han impulsado la adopción de metodologías estructuradas como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), orientado a optimizar recursos y reducir fallas (Moubray, 1997).

La caldera EB-1191D, ubicada en la Estación Centauros (Campo Mago, Caño Sur Este, Meta), es esencial en la generación de vapor para el tratamiento del crudo. No obstante, las fallas repetitivas y la falta de un plan de mantenimiento preventivo sólido han generado paradas no programadas, aumento de costos y riesgos operacionales, lo que evidencia la necesidad de implementar estrategias basadas en criterios de confiabilidad (Smith & Hawkins, 2017).

Esta monografía de compilación aborda dicha problemática mediante una revisión documental sistemática (Kitchenham, 2004), analizando estudios relacionados con la aplicación del RCM en equipos de generación de vapor y otros activos críticos. Además, se soporta en directrices técnicas y normativas internacionales como (ISO 14224, 2016) e (ISO 55000, 2018), así como en aportes de la literatura especializada (Garg & Deshmukh, 2020). El objetivo es proponer lineamientos para un plan de mantenimiento preventivo ajustado al contexto operativo de la caldera EB-1191D, contribuyendo a mejorar su confiabilidad y disponibilidad, y fortaleciendo la gestión del riesgo en la operación industrial.

Fundamentos Generales de la Investigación

Tipo de Monografía

Este trabajo se desarrolla bajo la modalidad de monografía de compilación, ya que se fundamenta en la revisión, análisis y síntesis de información documentada en fuentes académicas, técnicas y normativas relacionadas con el mantenimiento preventivo en equipos industriales. No se requiere trabajo experimental ni levantamiento de datos en campo; por el contrario, el aporte principal se construye a partir de la sistematización crítica del conocimiento disponible, orientado a proponer lineamientos aplicables en un entorno real de operación industrial.

Elección del Tema

La selección del tema responde a la necesidad actual de fortalecer la gestión del mantenimiento en activos críticos que intervienen en procesos de generación de vapor para la industria petrolera. Las calderas industriales son fundamentales para asegurar continuidad operacional, eficiencia energética y cumplimiento de normativas de seguridad. Por ello, analizar estrategias de mantenimiento preventivo alineadas con metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) resulta pertinente académica y profesionalmente, dado su impacto en la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de los equipos.

Delimitación del Tema

El trabajo se centra en el análisis documental de estrategias de mantenimiento preventivo aplicadas a calderas industriales de generación de vapor, considerando como caso de referencia la caldera EB-1191D instalada en la Estación Centauros, perteneciente al sector petrolero colombiano. La delimitación es de carácter:

Temático: mantenimiento preventivo basado en RCM

Tecnológico: calderas industriales de proceso

Espacial: Estación Centauros — industria petrolera

Temporal: análisis documental y propuesta teórica, sin ejecución ni verificación en planta

Esta acotación permite desarrollar una propuesta técnica estructurada, pero sin intervenir directamente el activo.

Desarrollo del Argumento

La gestión eficiente del mantenimiento en activos críticos constituye un elemento clave para garantizar la productividad industrial. Las fallas recurrentes en equipos como las calderas pueden generar pérdidas económicas, riesgos operacionales y afectaciones al proceso productivo. En este contexto, las metodologías preventivas, y en particular el enfoque del RCM, permiten priorizar funciones, evaluar modos de falla y definir acciones que mitiguen riesgos y maximicen la confiabilidad operacional.

El desarrollo de esta monografía busca construir una propuesta de mantenimiento preventivo sustentada en experiencias reportadas a nivel académico e industrial, manuales técnicos y normativa internacional, con el fin de aportar una guía metodológica aplicable en el contexto del caso de estudio.

Metodología

La investigación se fundamenta en una revisión documental sistemática de literatura técnica y científica. El proceso metodológico incluye:

Tabla 1.

Proceso metodológico de la investigación documental

Etapa / Paso	Descripción	Fuentes y herramientas	Resultado esperado
Búsqueda y recolección de información	Se recopila información académica, técnica y normativa relacionada con el mantenimiento preventivo y la metodología RCM.	Bases de datos <i>Scopus</i> , <i>ScienceDirect</i> , <i>Google Scholar</i> ; normas técnicas (ISO 14224, ISO 55000, ASME, API); manuales de fabricantes.	Base documental inicial organizada según criterios de relevancia y actualidad.
Selección y clasificación de documentos	Se depura la información recolectada, seleccionando las fuentes más pertinentes según su aporte teórico, técnico y metodológico.	Matriz de referencias; fichas de análisis; criterios de inclusión y exclusión definidos.	Matriz de fuentes clasificadas por categorías temáticas (teórico, normativo, contextual).
Análisis comparativo de experiencias	Se realiza el estudio y comparación de casos documentados sobre aplicación de RCM en calderas y equipos críticos, identificando patrones y buenas prácticas.	Artículos científicos, informes técnicos, estudios de caso; revisión sistemática (Kitchenham, 2004).	Identificación de estrategias aplicables y brechas en la gestión del mantenimiento preventivo.
Síntesis y estructuración de la propuesta	Se integran los resultados del análisis documental para formular una propuesta de plan de mantenimiento preventivo aplicable al caso de la caldera EB-1191D.	Software ofimático (Excel, Word); plantillas institucionales; lineamientos de la UFPSO.	Propuesta de mantenimiento preventivo basada en RCM, sustentada en evidencia documental.

Nota. Elaboración propia con base en (Kitchenham, 2004), (ISO 14224, 2016), (ISO 55000, 2018) y (Garg & Deshmukh, 2020).

Marco Referencial

Marco Teórico

El mantenimiento industrial constituye uno de los pilares fundamentales para garantizar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa de los activos físicos que participan en los procesos productivos. Su correcta gestión permite evitar fallas, reducir costos y optimizar el desempeño de los equipos, contribuyendo directamente a la sostenibilidad organizacional (Garg & Deshmukh, 2020).

A lo largo de la historia, el mantenimiento ha evolucionado desde enfoques reactivos centrados en la reparación posterior a la falla hacia metodologías proactivas y predictivas, orientadas a prevenir incidentes y maximizar el valor de los activos. Esta evolución se ha visto impulsada por el desarrollo de la ingeniería de confiabilidad, la digitalización industrial y la implementación de sistemas de gestión basados en normas internacionales como la (ISO 14224, 2016) (ISO 55000, 2018).

Figura 1

Relación entre confiabilidad, gestión de activos e industria 4.0



Evolución Conceptual del Mantenimiento

(Crespo Márquez, 2007) identifica cinco generaciones del mantenimiento:

- Correctivo: centrado en reparar después de la falla.
- Preventivo: introducción de rutinas periódicas para evitar averías.
- Predictivo: uso de monitoreo y diagnóstico para anticipar fallas.
- Proactivo: búsqueda de causas raíz y mejora continua.
- Inteligente o digital: integración de tecnologías de la Industria 4.0 como sensores, análisis de datos y sistemas ciberfísicos.

Estos enfoques han permitido pasar de una visión operativa a una gestión estratégica del mantenimiento, donde la confiabilidad se convierte en un indicador clave de desempeño (Ahuja & Khamba, 2008).

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El Reliability-Centered Maintenance (RCM) es una metodología sistemática creada en la década de 1960 por la industria aeronáutica y posteriormente adaptada a otros sectores.

(Moubray, 1997) la definió como un proceso lógico y estructurado que busca determinar las tareas de mantenimiento más efectivas para asegurar que los sistemas continúen cumpliendo las funciones que los usuarios requieren en su contexto operativo.

Según (Moubray, 1997), el RCM se desarrolla mediante siete preguntas fundamentales:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño del activo?
2. ¿De qué manera puede fallar en cumplir esas funciones?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre la falla?
5. ¿Qué consecuencias tiene cada falla?

6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o mitigar la falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se puede prevenir ni mitigar?

Este enfoque permite vincular la gestión del mantenimiento con la seguridad, el costo y la confiabilidad, priorizando intervenciones según el riesgo y la criticidad (Smith & Hawkins, 2017).

El RCM combina principios de ingeniería de confiabilidad (Reliability Engineering) y gestión de riesgos, aplicando herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) y el Análisis de Criticidad (CA). Estas herramientas ayudan a identificar los componentes más vulnerables y establecer planes preventivos específicos (Dhillon, 2006).

Integración del RCM con la Gestión de Activos

Con la publicación de la serie ISO 55000 sobre gestión de activos, el mantenimiento dejó de considerarse una actividad aislada y pasó a formar parte de una estrategia corporativa integral. La norma propone una visión sistémica del ciclo de vida del activo, en la que la planificación, ejecución y evaluación del mantenimiento se alinean con los objetivos estratégicos, financieros y operacionales de la organización (ISO 55000, 2018).

De acuerdo con (Hastings, 2010), la gestión de activos y el RCM son complementarios: mientras el primero define la política general de administración de los recursos físicos, el segundo proporciona las herramientas prácticas para garantizar la confiabilidad de dichos activos.

(Smith & Hawkins, 2017) sostiene que esta integración fortalece la toma de decisiones basada en datos, lo que permite priorizar inversiones, mejorar la trazabilidad de las intervenciones y optimizar los indicadores de desempeño (KPIs) del mantenimiento.

Tendencias Actuales en Mantenimiento Industrial

La incorporación de tecnologías de la Industria 4.0 ha transformado los modelos tradicionales de mantenimiento hacia esquemas predictivos e inteligentes, sustentados en monitoreo continuo, análisis de datos y automatización (Lee, Bagheri, & Kao, 2015). En este contexto, la digitalización permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo y prescriptivo, integrando inteligencia artificial, sensores IoT y gemelos digitales (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2019).

Estas tendencias fortalecen el RCM clásico, ampliando su alcance hacia un mantenimiento basado en la gestión del conocimiento y la analítica avanzada, lo cual incrementa la confiabilidad, reduce costos y mejora la toma de decisiones en tiempo real (Crespo Marquez & De las Heras, 2021)

Síntesis Conceptual

En conclusión, el marco teórico consolida una visión contemporánea del mantenimiento industrial como un proceso estratégico que integra la confiabilidad operativa, la gestión de activos y la innovación tecnológica. Dentro de esta visión, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se posiciona como el eje articulador entre la planificación técnica y la toma de decisiones basada en riesgo, permitiendo optimizar los recursos disponibles y garantizar la continuidad operacional (Moubray, 1997), (Smith & Hawkins, 2017).

La incorporación de estándares internacionales como la ISO 14224 (2016) y la ISO 55000 (2018) refuerza la necesidad de una gestión estructurada y alineada con los objetivos organizacionales, mientras que la transformación digital impulsada por la Industria 4.0 amplía el alcance del mantenimiento hacia modelos predictivos e inteligentes (Lee, Bagheri, & Kao, 2015), (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2019), (Crespo Marquez & De las Heras, 2021).

Autores como (Mora Gutiérrez, 2019) destacan que el mantenimiento moderno debe concebirse como un sistema integral de planeación, ejecución y control, donde las acciones preventivas se sustentan en información técnica confiable, el análisis de criticidad y la mejora continua. Este enfoque permite fortalecer la sostenibilidad operativa de las organizaciones industriales y la eficiencia global de los procesos.

En síntesis, el marco teórico respalda el desarrollo de esta monografía al consolidar el RCM como un modelo de gestión integral que une los principios clásicos de la confiabilidad con las oportunidades que ofrece la digitalización industrial, impulsando un mantenimiento más eficiente, proactivo y alineado con los retos de la cuarta revolución industrial.

Marco Normativo

El desarrollo de la presente monografía se fundamenta en un conjunto de normas internacionales y guías técnicas que establecen buenas prácticas para la gestión del mantenimiento industrial, la confiabilidad y la seguridad operacional.

Estas normas constituyen el marco de referencia que orienta la propuesta metodológica y técnica para la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance), aplicado al caso de la caldera EB-1191D en la Estación Centauros.

Seguidamente se describen las normas esenciales que sirven de base para este estudio

Tabla 2*Normas esenciales y aplicadas*

Norma / Documento	Descripción general	Aplicación en el estudio
ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.	Establece los lineamientos para la recolección, clasificación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento en equipos de la industria petrolera y petroquímica.	Sirve como base para estructurar la base documental y la clasificación técnica de la información relativa a la caldera EB-1191D, garantizando trazabilidad y consistencia de los datos.
ISO 55000:2018 Asset Management – Overview, Principles and Terminology.	Define los principios, conceptos y terminología de la gestión integral de activos físicos, promoviendo la integración entre mantenimiento, producción, seguridad y finanzas.	Sustenta la propuesta de alinear el mantenimiento con los objetivos estratégicos organizacionales, en coherencia con la gestión de activos y la sostenibilidad operativa.
ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section I: Power Boilers.	Regula los requisitos de diseño, fabricación, inspección, operación y mantenimiento de calderas de potencia, garantizando su seguridad y confiabilidad.	Proporciona criterios técnicos y de seguridad aplicables al funcionamiento de la caldera EB-1191D, asegurando el cumplimiento de estándares internacionales.
API Recommended Practice 580 (RBI).	Guía técnica para la implementación de programas de inspección basados en riesgo (Risk-Based Inspection), integrando confiabilidad y gestión del riesgo operacional.	Complementa el enfoque preventivo del RCM mediante la evaluación y priorización de riesgos técnicos, fortaleciendo la toma de decisiones de mantenimiento.

Nota. Información elaborada con base en ISO (2016, 2018), ASME BPVC Section I, y API RP 580.

Complemento Explicativo

El conjunto de normas referenciadas constituye la base técnica y metodológica que respalda la formulación del plan de mantenimiento preventivo.

Cada una aporta criterios específicos que, en conjunto, fortalecen la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia operativa de los activos industriales.

La ISO 14224 (2016) es fundamental porque permite organizar y analizar los datos de mantenimiento y confiabilidad de forma estandarizada, facilitando la identificación de patrones de falla y la mejora continua de los planes de mantenimiento. Su aplicación favorece el aprendizaje organizacional a partir de la experiencia acumulada de los equipos.

La ISO 55000 (2018) amplía el alcance del mantenimiento tradicional, al incorporar el concepto de gestión de activos físicos. Esta norma promueve la integración entre las áreas técnica, operativa y administrativa, garantizando que las decisiones sobre mantenimiento estén alineadas con los objetivos estratégicos y financieros de la organización.

Las normas ASME BPVC Section I y API RP 580 complementan el enfoque técnico del estudio al establecer requisitos de seguridad, integridad y gestión del riesgo aplicables a calderas de potencia. Estas directrices aseguran que las operaciones se desarrollen bajo estándares internacionales de calidad y protección, reduciendo la probabilidad de fallas críticas y mejorando la confiabilidad global del sistema.

En conjunto, estas normas proporcionan un marco coherente que permite desarrollar una propuesta de mantenimiento estructurada, verificable y sustentada en buenas prácticas internacionales, coherente con la realidad técnica de la Estación Centauros y la caldera EB-1191D.

Figura 2.

Estructura de la norma ISO 55000 y su relación con el mantenimiento industrial



En conjunto, estas normas proporcionan un marco sólido y coherente para orientar la gestión del mantenimiento industrial en entornos de alta exigencia técnica como el sector petrolero. Su aplicación integrada garantiza que las decisiones relacionadas con la caldera EB-1191D se basen en criterios de confiabilidad, seguridad operativa y alineación estratégica con los objetivos organizacionales. De esta manera, el marco normativo no solo respalda la formulación del plan de mantenimiento preventivo propuesto, sino que también asegura que dicho plan se desarrolle conforme a estándares internacionales reconocidos, favoreciendo la mejora continua y la sostenibilidad de las operaciones.

Marco Contextual

La presente monografía se desarrolla en el contexto operativo de la Estación Centauros, ubicada en el Campo Mago – Caño Sur Este, jurisdicción del municipio de Puerto Gaitán, en el departamento del Meta (Colombia). Esta zona se caracteriza por ser uno de los corredores

energéticos más importantes del país, con una infraestructura destinada principalmente a la producción, tratamiento y transporte de crudo pesado y extra-pesado.

Dentro de las instalaciones de la Estación, la caldera EB-1191D constituye un activo crítico para la generación de vapor saturado, insumo indispensable en diversos procesos térmicos asociados al acondicionamiento y mejoramiento del crudo. Su operación continua es determinante para la estabilidad del sistema productivo, razón por la cual requiere un esquema de mantenimiento confiable y sustentado en criterios técnicos claros.

Durante los últimos años se han presentado fallas recurrentes, eventos de indisponibilidad y desviaciones en los parámetros operativos de la caldera. Estas situaciones se han visto reflejadas en tiempos de parada no programados, disminución en la eficiencia del proceso térmico e incremento de costos asociados a reparaciones y consumo energético. A pesar de que la Estación cuenta con diferentes rutinas de mantenimiento, se evidencia la ausencia de un plan preventivo formalmente estructurado que integre análisis de criticidad, datos históricos y metodologías de confiabilidad como el RCM.

Adicionalmente, la dinámica propia de la operación petrolera exige la adopción de estándares internacionales que garanticen la seguridad operativa, la integridad de los equipos y la eficiencia en el uso de recursos. En este sentido, la implementación de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad no solo permite mejorar el desempeño de la caldera EB-1191D, sino también alinear la gestión del mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización, la normativa vigente y las necesidades reales del proceso.

Por lo tanto, el marco contextual establece claramente el entorno técnico, geográfico y operativo en el que se desarrolla este estudio, destacando la importancia de la caldera como

equipo crítico y justificando la pertinencia de estructurar una propuesta de mantenimiento preventivo que responda a los desafíos identificados en la Estación Centauros.

Descripción de los Sistemas y Componentes de la Caldera EB-1191D

La caldera EB-1191D está compuesta por diversos sistemas mecánicos, eléctricos y neumáticos que permiten su operación continua y segura dentro del proceso de generación de vapor de la Estación Centauros. Cada uno de estos componentes cumple funciones específicas dentro del ciclo de combustión, transferencia de calor y control operacional, por lo que su comprensión es fundamental para el análisis técnico del equipo.

En este apartado se presentan las principales partes que integran la caldera y sus sistemas auxiliares, acompañadas de imágenes reales y una descripción detallada de su función operativa, importancia dentro del proceso térmico y su relación con la confiabilidad global del equipo. Esta caracterización permite identificar los elementos más críticos del sistema, facilitando posteriormente la formulación del plan de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad.

Figura 3.

Caldera EB-1191D

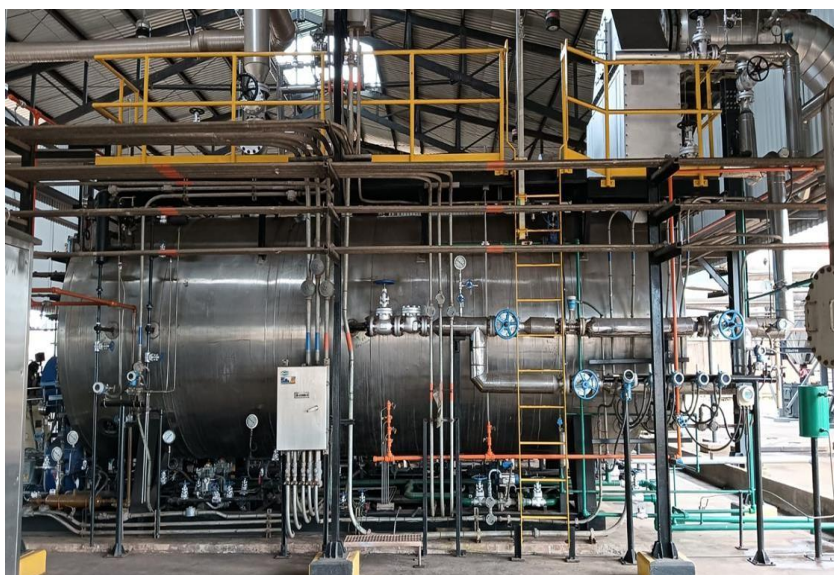
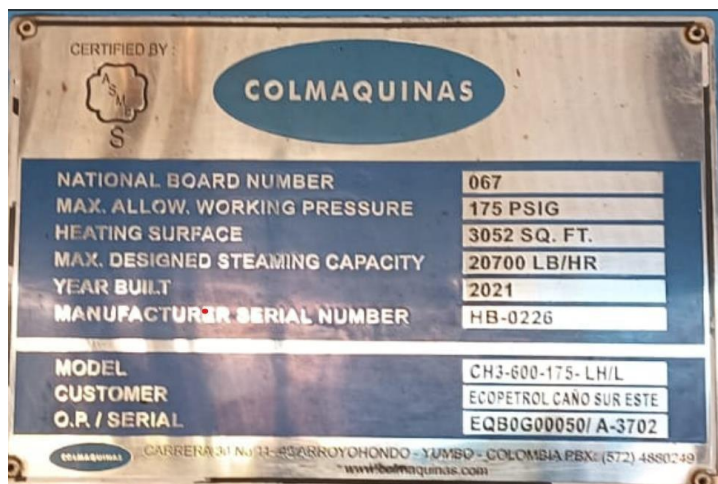


Figura 4*Placa del fabricante*

La caldera EB-1191D es el equipo principal del sistema de generación de vapor en la Estación Centauros y constituye uno de los activos de mayor criticidad dentro del proceso térmico. Su función es producir vapor saturado requerido para diferentes operaciones de acondicionamiento y tratamiento del crudo. Este equipo integra sistemas mecánicos, térmicos, neumáticos y de combustión que deben operar de manera coordinada para garantizar estabilidad operativa, seguridad y eficiencia energética.

La caldera trabaja bajo condiciones exigentes debido a las características del crudo combustible utilizado, las variaciones de carga térmica y la necesidad de mantener un funcionamiento continuo. Por esta razón, la integridad de sus componentes quemador, serpentines de transferencia de calor, ventiladores de tiro, sistemas neumáticos y líneas de combustible es fundamental para evitar fallas que puedan generar paradas no programadas, pérdidas de eficiencia o riesgos de seguridad.

La imagen presentada corresponde a la vista general del equipo y permite identificar la estructura principal, los accesos de inspección, el sistema de combustión y los elementos

asociados a la operación. Esta referencia visual es clave para contextualizar los sistemas descritos posteriormente y para comprender la importancia de establecer un plan de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad.

Figura 5.

Ventilador de tiro inducido ELG-1191D.



Figura 6*Placa del fabricante*

El ventilador de tiro inducido ELG-1191D es un componente esencial del sistema de manejo de gases de la caldera EB-1191D, encargado de extraer los gases de combustión desde la cámara interna hacia el sistema de tratamiento y evacuación. Su operación mantiene la presión negativa adecuada dentro del hogar de la caldera, favoreciendo una combustión estable, eficiente y segura. Un desempeño deficiente del ventilador puede generar acumulación de gases, pérdidas de eficiencia térmica, inestabilidad de la llama y un aumento significativo en la formación de hollín.

La placa del fabricante asociada al equipo proporciona información técnica clave como potencia, velocidad nominal y especificaciones operativas, necesarias para realizar diagnósticos, selecciones de repuestos y labores de mantenimiento. La combinación de ambas imágenes permite identificar tanto la configuración física del ventilador como los parámetros técnicos requeridos para su correcta operación y control.

Figura 7.

Sistema lavador de gases ETK-11924D y bomba EP-11920D



Figura 8.

Placa sistema lavador de gases ETK-11924D

**Figura 9.**

Placa bomba EP-11920D



El sistema lavador de gases ETK-11924D forma parte del proceso de control ambiental de la caldera EB-1191D y tiene como función principal la reducción de partículas, hollín e impurezas presentes en los gases de combustión antes de su salida hacia el sistema de evacuación. Su operación garantiza el cumplimiento de parámetros ambientales y evita la acumulación de contaminantes que pueden afectar equipos posteriores. Para su funcionamiento requiere del apoyo de la bomba EP-11920D, encargada de recircular el fluido de lavado hacia el

interior del sistema, manteniendo el caudal y la presión necesarios para asegurar una limpieza efectiva de los gases.

Las placas del sistema lavador y de la bomba proporcionan información técnica fundamental como capacidad, materiales, presión nominal y características de operación necesaria para la correcta identificación de repuestos, la planificación del mantenimiento y la verificación de condiciones de diseño. La visualización conjunta de estos elementos permite comprender la relación operativa entre el sistema ETK-11924D y la bomba EP-11920D, así como su importancia dentro del proceso de manejo de emisiones de la caldera.

Figura 10.

Tolva colectora de hollín EFM-1191D



Figura 11.

Placa tolva colectora de hollín EFM-1191D



La tolva colectora de hollín EFM-1191D es un componente fundamental del sistema de manejo de residuos sólidos generados durante la combustión en la caldera EB-1191D. Su función principal es recibir y almacenar el material particulado desprendido del hogar y de los pasos de gases, evitando su recirculación dentro del sistema y reduciendo la acumulación de depósitos que pueden afectar la transferencia térmica. El hollín retenido en esta tolva es resultado directo de la combustión incompleta o de variaciones en la atomización del crudo, por lo que su monitoreo permite identificar desviaciones operativas relevantes.

La información técnica contenida en la placa de identificación del equipo como capacidad nominal, condiciones de operación y materiales de fabricación es esencial para planificar actividades de inspección, limpieza y reposición de componentes.

Según (Ahuja & Khamba, 2008), la gestión adecuada de los sistemas auxiliares asociados a la combustión, incluyendo los dispositivos de recolección de residuos, contribuye significativamente a mejorar la eficiencia energética y la confiabilidad operacional de las

calderas. En este sentido, la tolva EFM-1191D cumple un rol clave dentro del mantenimiento preventivo orientado a garantizar una operación segura y sostenida del equipo.

Figura 12.

Rotoexclusa ELG-11903D



Figura 13.

Rotoexclusa ELG-11903D



La rotoexclusa ELG-11903D forma parte del sistema de manejo y descarga de material particulado generado en la combustión de la caldera EB-1191D. Su función principal es permitir la extracción controlada del hollín y sólidos finos, garantizando un flujo continuo hacia el sistema de recolección sin comprometer la presión interna del ducto de gases. Este tipo de dispositivo actúa como un “sello rotativo” que impide el retorno de gases calientes al interior del

equipo, contribuyendo a la estabilidad del proceso y reduciendo riesgos asociados a fugas o recirculación de partículas.

La información contenida en la placa del fabricante, como capacidad volumétrica, velocidad de rotación y especificaciones mecánicas, resulta fundamental para la selección de repuestos, la verificación de condiciones operativas y la planificación de tareas de mantenimiento. Según la literatura técnica, los alimentadores rotativos tipo rotoexclusa cumplen un rol crítico en la gestión de residuos sólidos y en el control de presión en sistemas de combustión industrial, siendo indispensables para mantener la eficiencia y confiabilidad operativa de las calderas (Cortez & Wild, 2015). En este sentido, la ELG-11903D es un componente clave para asegurar un manejo adecuado del hollín y una operación continua del sistema de gases.

Figura 14.

Visor de flama Caldera EB-1191D



El visor de flama de la caldera EB-1191D permite la observación directa del comportamiento de la combustión dentro del hogar del equipo, facilitando la verificación visual

de la presencia, forma, estabilidad e intensidad de la llama durante el proceso operativo. Este elemento es fundamental para detectar irregularidades asociadas a la atomización del combustible, deficiencias en la mezcla aire–combustible o inestabilidades generadas por problemas en el quemador o en los sistemas de tiro. La supervisión a través del visor contribuye a prevenir condiciones peligrosas como combustión incompleta, acumulación de gases sin quemar o encendidos retardados, que pueden comprometer la seguridad del equipo y del personal.

De acuerdo con (Lee, Bagheri, & Kao, 2015), la monitorización de la llama es un parámetro clave en los sistemas térmicos industriales, ya que proporciona información crítica para la eficiencia energética y la confiabilidad operacional. Por ello, el visor de flama constituye un punto de inspección esencial dentro de las tareas de operación y mantenimiento preventivo de la caldera EB-1191D.

Figura 15

Compresor EAC-1190D



Nota: Compresor exclusivo para el arranque de la caldera.

Figura 16.*Placa compresor EAC-1190D*

El compresor EAC-1190D es un componente esencial del sistema neumático de la caldera EB-1191D, encargado de suministrar el aire comprimido necesario para el accionamiento de válvulas ON-OFF, mecanismos de control y dispositivos de seguridad asociados al proceso de combustión. Su funcionamiento garantiza que la caldera cuente con la presión mínima requerida para ejecutar de manera correcta la secuencia de arranque y mantener la modulación del quemador durante la operación. Una caída en la presión neumática puede impedir la apertura de válvulas críticas, provocar fallas en el encendido o generar disparos automáticos del sistema por condiciones inseguras. La placa de identificación del compresor proporciona información relevante como potencia, caudal nominal, presión de descarga y parámetros de diseño, indispensables para labores de mantenimiento, selección de repuestos y verificación de condiciones operativas.

Según (Smith & Hawkins, 2017), los sistemas de aire comprimido juegan un papel determinante en la confiabilidad de equipos industriales, ya que su desempeño afecta directamente la automatización y seguridad de los procesos. En este sentido, el compresor EAC-1190D es un equipo de alta criticidad dentro de la operación de la caldera EB-1191D, imprescindible para garantizar un funcionamiento seguro y continuo.

Figura 17.

Bombas de alimentación de combustible a caldera EP-11925D y EP-11926D



Las bombas EP-11925D y EP-11926D conforman el sistema de alimentación de crudo combustible hacia la caldera EB-1191D y garantizan el suministro continuo del fluido necesario para la combustión. Estas unidades trabajan en configuración principal-respaldo, lo que permite mantener la estabilidad del proceso térmico y evitar interrupciones inesperadas durante la operación. Su función principal es suministrar el combustible con el caudal y la presión adecuados hacia el precalentador y el atomizador, asegurando una atomización eficiente y una combustión estable.

Cualquier variación en el desempeño de estas bombas puede generar inestabilidad en la llama, fallas en el quemador y disparos automáticos por seguridad, por lo que se consideran equipos de alta criticidad dentro del sistema de combustión.

Figura18.

Bomba EP-11926D de alimentación de crudo combustible, equipo principal de del sistema de combustión.



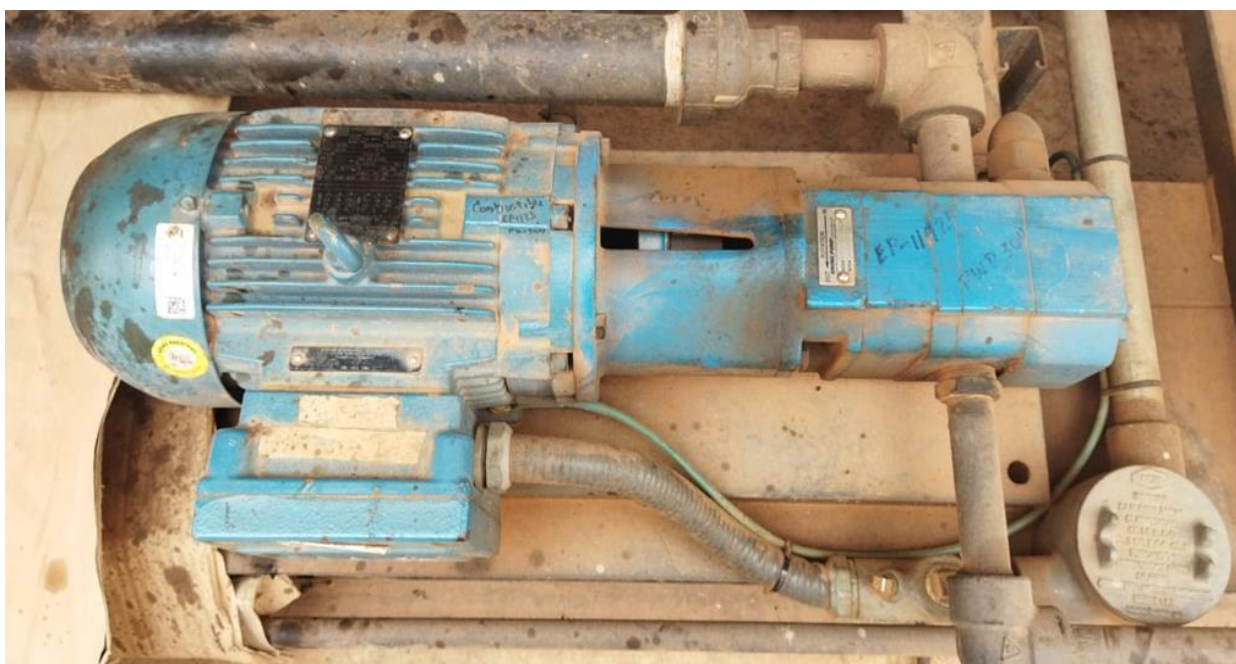
La bomba EP-11926D es la encargada del suministro directo de crudo combustible hacia el sistema de combustión de la caldera EB-1191D. Su función consiste en llevar el combustible hacia el precalentador y posteriormente al quemador, manteniendo condiciones óptimas de caudal y presión para garantizar una correcta atomización del crudo. Debido a la alta viscosidad

del combustible y a la presencia de sedimentos e impurezas, esta bomba opera bajo condiciones exigentes que pueden generar desgastes prematuros en sus componentes internos como sello mecánico y buje centralizador o presentar obstrucciones en la línea de succión.

Como señalan (Igor J, Joseph, Messina, Paul, & Charles C, 2001), el rendimiento de las bombas de proceso influye directamente en la estabilidad del flujo y en la eficiencia de los sistemas térmicos industriales, por lo que cualquier disminución en su desempeño afecta de manera inmediata la estabilidad de la llama y la eficiencia térmica de la caldera. Por estas razones, la EP-11926D es considerada un componente crítico dentro del proceso de combustión.

Figura 19.

Bomba EP-11925D de alimentación de crudo mezcla, equipo redundante hacia el sistema de combustión de la caldera.



La bomba EP-11925D actúa como equipo redundante dentro del sistema de alimentación de crudo-mezcla, garantizando la continuidad operativa cuando la bomba principal EP-11926D está fuera de servicio por mantenimiento, fallas o bajas en su rendimiento. Esta bomba asegura el

caudal y la presión requeridos para alimentar el precalentador y el quemador, permitiendo que la caldera opere sin afectaciones en la estabilidad de la llama o en la eficiencia del proceso térmico. La redundancia en sistemas de bombeo es un criterio esencial en instalaciones industriales de operación continua, ya que mejora la disponibilidad del equipo y reduce el riesgo de fallas críticas.

De acuerdo con (Heinz P & Allan R, 2010), los sistemas de bombeo redundante incrementan significativamente la confiabilidad operacional al asegurar que el proceso no dependa de un solo equipo crítico. En este contexto, la EP-11925D desempeña un rol fundamental en la continuidad del suministro de combustible y en la estabilidad de la combustión.

Figura 18.

Precalentador de crudo combustible de la caldera EB-1191D.



El precalentador de crudo combustible de la caldera EB-1191D cumple la función esencial de elevar la temperatura del crudo mezcla antes de su ingreso al quemador, reduciendo su viscosidad y facilitando una atomización eficiente durante la combustión. Este proceso es

indispensable para asegurar una llama estable, mejorar la transferencia térmica y minimizar la formación de hollín dentro de los pasos de gases.

Un precalentamiento insuficiente puede generar combustión incompleta, mayor consumo energético y un desgaste prematuro del quemador. La operación adecuada de este equipo también protege a las bombas de alimentación de combustible, evitando esfuerzos excesivos derivados de la alta viscosidad del crudo a bajas temperaturas.

De acuerdo con (Boyce, 2011), el control térmico previo al proceso de combustión es un factor determinante para optimizar la eficiencia y estabilidad de los sistemas energéticos industriales, especialmente cuando se utilizan combustibles pesados. En este sentido, el precalentador de crudo combustible es un componente crítico para garantizar la confiabilidad y el rendimiento operativo de la caldera EB-1191D.

Figura 19.

Válvulas ON-OFF de paso de combustible hacia el quemador de la caldera EB-1191D



Las válvulas ON-OFF de paso de combustible al quemador cumplen una función crítica dentro del sistema de combustión de la caldera EB-1191D, ya que son las encargadas de permitir o interrumpir el flujo de crudo mezcla hacia el quemador según lo requiera la operación. Estas

válvulas actúan como dispositivos de bloqueo primario durante la secuencia de arranque, operación y apagado del equipo, garantizando que el combustible solo ingrese cuando se cumplan las condiciones de seguridad establecidas.

Su accionamiento, generalmente neumático, depende del funcionamiento adecuado del compresor EAC-1190D y del sistema de control asociado. Una falla en estas válvulas ya sea por atascamiento, pérdida de presión neumática o desgaste interno puede ocasionar encendidos irregulares, inestabilidad de la llama o incluso riesgos asociados a acumulación de combustible sin combustionar.

De acuerdo con (Lipták, 2013), las válvulas de aislamiento utilizadas en sistemas térmicos industriales deben cumplir con estrictos criterios de respuesta, estanqueidad y confiabilidad, dada su relevancia en la seguridad del proceso. Por ello, las válvulas ON–OFF del sistema de combustible se consideran componentes de alta criticidad dentro del mantenimiento preventivo de la caldera EB-1191D.

Figura 20.

Válvula controladora de paso de combustible hacia el quemador de la caldera EB-1191D



La válvula controladora de paso de combustible al quemador es un elemento fundamental del sistema de combustión de la caldera EB-1191D, ya que regula de manera modulante el caudal de crudo mezcla que ingresa al quemador, permitiendo ajustar la intensidad de la llama según la demanda térmica del proceso. A diferencia de las válvulas ON–OFF, esta válvula opera de forma continua, realizando variaciones precisas en su apertura para mantener una combustión estable, eficiente y con la relación aire/combustible adecuada.

Su funcionamiento depende del sistema neumático y del lazo de control del equipo, por lo que fallas en actuadores, diafragmas o señal de control pueden generar fluctuaciones de llama, pérdidas de eficiencia y aumentos en el consumo de combustible. La placa del fabricante proporciona datos clave como presión nominal, rango de modulación y características del actuador, información necesaria para la selección de repuestos y el mantenimiento preventivo.

Según (Lipták, 2013), las válvulas modulantes son componentes críticos en sistemas térmicos, ya que determinan la estabilidad operativa y la eficiencia energética del proceso de combustión. En este sentido, la válvula controladora de combustible es indispensable para el funcionamiento seguro y confiable de la caldera EB-1191D.

Figura 21.

Válvula de paso de vapor utilizada para la atomización del combustible en la caldera EB-1191D



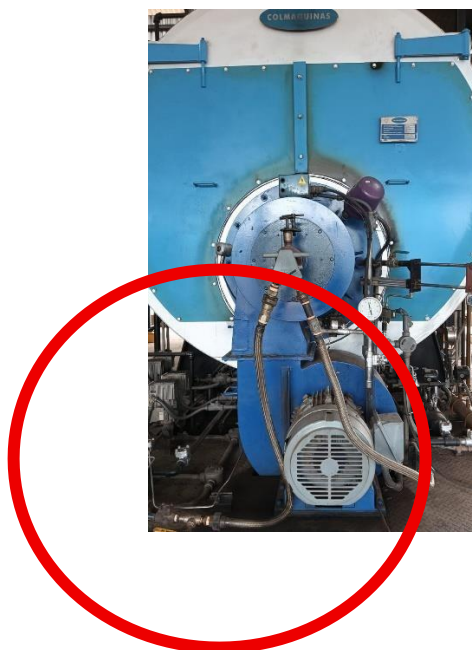
La válvula de paso de vapor a atomización es un componente clave dentro del sistema de combustión de la caldera EB-1191D, ya que controla el suministro de vapor utilizado para atomizar el crudo mezcla antes de su ingreso al quemador. El proceso de atomización con vapor reduce el tamaño de las gotas de combustible, facilitando su mezcla con el aire y favoreciendo una combustión más completa, estable y eficiente. Esta válvula debe mantener una apertura precisa para garantizar el flujo adecuado de vapor, evitando tanto un exceso que podría enfriar la llama y disminuir la eficiencia térmica como un déficit, que generaría gotas grandes, combustión incompleta, aumento de hollín y mayor riesgo de inestabilidad en la llama.

Su operación depende del sistema neumático y del lazo de control, por lo que fallas en actuadores, empaques o sedimentos en la línea pueden afectar el desempeño del quemador.

De acuerdo con (Turns, 2012), el control adecuado de los parámetros de atomización es fundamental para garantizar una combustión eficiente y minimizar la formación de contaminantes y residuos. Por ello, la válvula de paso de vapor a atomización se considera un componente crítico dentro del proceso térmico de la caldera EB-1191D.

Figura 22.

Quemador o atomizador de combustible de la caldera EB-1191D



El quemador o atomizador de combustible de la caldera EB-1191D es el elemento encargado de transformar el crudo mezcla en un rocío fino mediante un proceso de atomización, permitiendo su adecuada mezcla con el aire de combustión dentro del hogar de la caldera. Este proceso es esencial para garantizar una llama estable, eficiente y de alta temperatura, ya que una atomización deficiente genera gotas grandes de combustible que provocan combustión incompleta, incremento de hollín, pérdida de transferencia térmica y riesgos asociados a encendidos retardados.

El desempeño del quemador depende de la presión y caudal suministrados por las bombas EP-11926D y EP-11925D, así como del vapor de atomización regulado por la válvula correspondiente. Problemas como obstrucciones en la boquilla, variaciones en la presión de combustible o mal funcionamiento del sistema neumático pueden generar inestabilidad de la llama.

Según (Turns, 2012), la calidad de la atomización es un factor determinante en la eficiencia y seguridad de los sistemas de combustión industrial, ya que influye directamente en la formación de contaminantes y en el rendimiento térmico. Por ello, el quemador constituye uno de los componentes de mayor criticidad en la operación de la caldera EB-1191D y requiere un mantenimiento preventivo riguroso.

Figura 23.

Ventilador de tiro forzado ELG-1190D utilizado para el suministro de aire de combustión



El ventilador de tiro forzado ELG-1190D es el encargado de suministrar el aire primario y secundario necesario para el proceso de combustión en la caldera EB-1191D. Su función consiste en impulsar aire a presión hacia el quemador, asegurando la mezcla adecuada con el combustible para obtener una llama estable, uniforme y eficiente. El desempeño de este ventilador es determinante para la calidad de la combustión, ya que un flujo insuficiente de aire puede generar combustión incompleta, incremento de hollín y disminución en la transferencia térmica, mientras que un exceso provoca enfriamiento del hogar, inestabilidad de la llama y

pérdida de eficiencia. Entre las fallas comunes se encuentran desbalanceo del ventilador centrífugo, desgaste en rodamientos, vibraciones excesivas y obstrucciones en los ductos de aire.

Según (Bloch, 2012), los ventiladores industriales utilizados en sistemas térmicos requieren un monitoreo continuo de vibraciones, alineación y condiciones de operación para garantizar su confiabilidad, dado que su desempeño impacta directamente la eficiencia y seguridad de los procesos de combustión. En este sentido, el ventilador de tiro forzado ELG-1190D constituye un elemento crítico para la operación segura y eficiente de la caldera EB-1191D.

Figura 24.

Válvula de purga utilizada para la descarga de sedimentos en la caldera EB-1191D



La válvula de purga de la caldera es un componente esencial del sistema de generación de vapor, encargado de evacuar los sedimentos, lodos, sales y sólidos disueltos que se acumulan en el interior del recipiente a presión durante la operación. Este proceso de purga evita la formación de incrustaciones en los tubos de transferencia de calor y reduce el riesgo de sobrecalentamiento localizado, corrosión y pérdida de eficiencia térmica. La válvula debe operar con total

estanqueidad, ya que fugas o fallas en su mecanismo pueden generar pérdidas de vapor, inestabilidad en los niveles de agua y daños en el sistema. Su manipulación periódica forma parte de las rutinas de mantenimiento preventivo para garantizar la calidad del vapor producido y prolongar la vida útil de la caldera.

Según el American Society of Mechanical Engineers (ASME, 2019), las válvulas de purga y los sistemas de descarga de fondo son elementos críticos para el control de sólidos y para el cumplimiento de los requisitos de seguridad en calderas industriales. En este sentido, la válvula de purga de la caldera EB-1191D desempeña un papel clave en la preservación de la integridad del equipo y en la eficiencia del proceso de generación de vapor.

Figura 25.

Transmisores e indicadores de temperatura de entrada y salida de agua y vapor en la caldera EB-1191D



Los transmisores e indicadores de temperatura de entrada y salida de agua y vapor cumplen una función fundamental en el control operativo de la caldera EB-1191D, ya que permiten monitorear en tiempo real el comportamiento térmico del sistema durante el proceso de

generación de vapor. Estos dispositivos registran la temperatura del agua que ingresa al sistema, así como la del vapor producido, proporcionando información clave para la regulación de la combustión, el ajuste del quemador y la evaluación de la eficiencia térmica. Una lectura inexacta o una falla en estos transmisores puede conducir a operaciones fuera de los parámetros de diseño, con riesgos de sobrecalentamiento, inestabilidad del nivel de agua o disminución en la calidad del vapor.

Además, estos instrumentos son esenciales para detectar gradientes térmicos anormales que podrían indicar problemas en los serpentines, corrosión interna o acumulación de incrustaciones.

Según (Doebelin & Manik, 2011), los sistemas de medición de temperatura en aplicaciones industriales deben mantener alta precisión y confiabilidad, ya que cualquier desviación afecta directamente la estabilidad y seguridad del proceso. En este sentido, los transmisores de temperatura de la caldera EB-1191D son componentes críticos para garantizar una operación segura, eficiente y acorde con los parámetros establecidos.

Figura 26.

Tanque de agua suavizada y bombas de alimentación EP-11921D del sistema de alimentación de la caldera EB-1191D



El tanque de agua suavizada y las bombas de alimentación EP-11921D conforman el sistema encargado de suministrar el agua tratada necesaria para la operación de la caldera EB-1191D. El tanque almacena agua previamente suavizada para reducir la dureza, evitando la formación de incrustaciones en los tubos de intercambio térmico y mejorando la eficiencia global del sistema. Las bombas asociadas impulsan esta agua hacia la caldera con el caudal y la presión requeridos, manteniendo la estabilidad del nivel de agua en el domo y asegurando una producción continua de vapor. Una deficiencia en este sistema puede ocasionar sobrecalentamiento, pérdida de capacidad de transferencia térmica y un aumento significativo del riesgo de fallas por incrustaciones y corrosión.

Además, variaciones en la presión o en el flujo de alimentación pueden provocar disparos automáticos de seguridad o inestabilidad en la generación de vapor.

De acuerdo con (Black & Chisnell, 2014), la calidad del agua de alimentación y la confiabilidad de los sistemas de bombeo son factores determinantes para prolongar la vida útil de las calderas y prevenir fallas catastróficas asociadas a depósitos minerales y fluctuaciones de nivel. Por ello, tanto el tanque de agua suavizada como sus bombas de alimentación son considerados componentes críticos dentro del plan de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad.

Figura 27.

Bomba EP-11921D de alimentación de agua suavizada hacia la caldera EB-1191D



La bomba EP-11921D es la encargada de impulsar el agua suavizada desde el tanque de almacenamiento hacia la caldera EB-1191D, garantizando un suministro continuo y estable durante el proceso de generación de vapor. Su función es mantener el caudal y la presión adecuados para conservar los niveles de agua dentro del domo de la caldera, evitando fluctuaciones que puedan comprometer la estabilidad térmica o activar disparos automáticos de seguridad. Debido a que el agua suavizada es fundamental para evitar incrustaciones y depósitos minerales en los tubos de intercambio de calor, el funcionamiento confiable de esta bomba influye directamente en la eficiencia térmica, la vida útil del equipo y la seguridad operativa.

Entre las fallas comunes se encuentran pérdida de eficiencia por desgaste de los impulsores y fugas en sellos mecánicos. Según la American Boiler Manufacturers Association (ABMA, 2013), la integridad del sistema de bombas de alimentación es un factor crítico para prevenir fallas catastróficas asociadas a bajo nivel de agua y para garantizar la eficiencia del proceso de generación de vapor. En este contexto, la bomba EP-11921D se considera un componente prioritario dentro del plan de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad.

Figura 28.

. I-Pantalla de control del sistema de operación de la caldera EB-1191D



Figura 29.

II-Pantalla de control del sistema de operación de la caldera EB-1191D



La pantalla de control de la caldera EB-1191D constituye el principal punto de supervisión y operación del sistema, ya que permite visualizar en tiempo real las variables críticas del proceso, tales como presión de vapor, nivel de agua, temperatura de gases, estado del quemador, alarmas y secuencias de operación. A través de esta interfaz, el operador puede iniciar y detener la caldera, ajustar parámetros del sistema de combustión, monitorear el funcionamiento de los transmisores e instrumentos asociados y reaccionar oportunamente ante cualquier condición anómala.

Su funcionamiento adecuado es esencial para la seguridad operacional, dado que muchas protecciones como baja presión de aire, baja presión de combustible, alto nivel de agua o fallas en la llama se gestionan directamente desde el panel. Una falla en la pantalla, en la señal de sus módulos electrónicos o en la comunicación con el PLC puede ocasionar pérdida de control, disparos de emergencia y riesgos operativos.

De acuerdo con (Parr, 2016), los sistemas de interfaz hombre-máquina (HMI) son elementos críticos en instalaciones industriales modernas, ya que integran la supervisión, el

control y la respuesta a fallas en una misma plataforma, elevando los estándares de confiabilidad y seguridad. En este sentido, la pantalla de control de la caldera EB-1191D es un componente clave para garantizar una operación estable, eficiente y segura.

En conclusión, el presente capítulo permitió establecer los fundamentos conceptuales, normativos y técnicos necesarios para comprender el funcionamiento integral de la caldera EB-1191D y de todos los equipos que intervienen en su operación. A partir del marco teórico y normativo, se identificaron las metodologías, estándares y lineamientos que orientan las buenas prácticas de mantenimiento, confiabilidad y seguridad operacional. Asimismo, la descripción detallada de los componentes principales sistema de combustión, bombas, válvulas, ventilación forzada, tratamiento de agua, instrumentación y control facilitó reconocer su importancia dentro del proceso de generación de vapor y su influencia directa en la eficiencia y continuidad del servicio.

El análisis conjunto de estos elementos constituye la base para abordar, en el siguiente capítulo, la metodología de investigación y el proceso de construcción de una propuesta de mantenimiento preventivo centrada en la confiabilidad. Esta transición permitirá articular la teoría con la práctica, orientando el estudio hacia un enfoque sistemático, documentado y aplicable al contexto operativo de la caldera EB-1191D.

Estado del Arte y Metodología

Estado del Arte

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) ha sido ampliamente estudiado y aplicado en diversos sectores industriales debido a su efectividad para mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los equipos críticos. En el ámbito de generación de vapor, la literatura reporta que las calderas son equipos especialmente sensibles a fallas derivadas de

combustión ineficiente, calidad inadecuada del agua, desgaste en componentes rotativos y errores de operación, lo que las convierte en candidatas naturales para la aplicación de metodologías basadas en confiabilidad.

Diversos estudios documentan los beneficios del RCM en equipos térmicos e instalaciones de proceso. Por ejemplo, (Moubray, 1997) plantea la estructura fundamental del RCM y su capacidad para identificar funciones, fallas funcionales y modos de falla priorizados. En el sector industrial, (Smith & Hawkins, 2017) destacan que la aplicación de RCM en sistemas de combustión permite reducir tiempos de parada y optimizar el uso de recursos técnicos y económicos. Asimismo, investigaciones de (Garg & Deshmukh, 2020) evidencian mejoras en disponibilidad y reducción de costos al implementar estrategias basadas en confiabilidad en equipos como calderas, intercambiadores y turbo maquinaria.

En cuanto a aplicaciones específicas, algunos estudios (Ahuja & Khamba, 2008), (Crespo Marquez & De las Heras, 2021) muestran que la integración del RCM con herramientas de análisis de riesgo, datos históricos y estándares internacionales como (ISO 14224, 2016) fortalece la toma de decisiones técnicas en equipos donde la seguridad y la continuidad operativa son prioritarias. Estos enfoques coinciden en que el éxito del RCM depende de una adecuada caracterización del equipo, una revisión sistemática de fallas y un soporte técnico basado en documentación confiable.

En el caso de las calderas industriales, la literatura enfatiza que su criticidad requiere metodologías estructuradas para evitar fallas que pueden comprometer la integridad del equipo, la seguridad del personal y la eficiencia del proceso. La revisión del estado del arte demuestra que el RCM es una herramienta ampliamente validada, adaptable a diferentes contextos y especialmente útil en equipos térmicos como la caldera EB-1191D.

Tabla 3.

Estudios y aportes relevantes sobre la aplicación del RCM en equipos críticos y calderas

Autor(es)	Año	Tipo de estudio	Aportes principales	Aplicación para esta monografía
Moubray, J.	1997	Libro técnico	Define los fundamentos del RCM, funciones, fallas funcionales y modos de falla.	Base metodológica para estructurar el análisis funcional de la caldera EB-1191D.
Smith & Hawkins	2017	Libro técnico	Aplicación práctica del RCM en mantenimiento industrial; reducción de fallas y optimización de recursos.	Soporte para justificar la implementación de estrategias preventivas en equipos críticos.
Ahuja & Khamba	2008	Artículo científico	Integración del mantenimiento productivo total y confiabilidad en equipos industriales.	Relación entre confiabilidad, operación continua y criticidad de calderas.
Lee, Bagheri & Kao	2015	Artículo científico	Uso de sistemas inteligentes y monitoreo avanzado en equipos críticos de la industria 4.0.	Sustento para la importancia del monitoreo de combustión, transmisores y sensores.
Tao et al.	2019	Artículo científico	Integración de RCM con tecnologías digitales y análisis de riesgo.	Apoyo para abordar la evaluación técnica en sistemas de combustión y presión.
Crespo Márquez & De las Heras	2021	Libro técnico / estudios de caso	Aplicaciones del RCM y gestión de activos (ISO 55000, ISO 14224).	Justificación técnica para usar estándares internacionales en el mantenimiento de la caldera.
Garg & Deshmukh	2020	Artículo científico	Resultados de implementación de RCM en equipos térmicos y de proceso.	Evidencia de reducción de fallas y mejoras en disponibilidad.

Nota: Se presenta una síntesis de los estudios más relevantes relacionados con la aplicación del RCM en calderas y equipos críticos, los cuales fundamentan el desarrollo del presente trabajo y permiten comprender la pertinencia de esta metodología en el análisis de la caldera EB-1191D.

Revisión de Estudios y Aplicaciones del RCM en Calderas y Equipos Críticos

La aplicación del RCM en calderas y equipos asociados ha sido abordada en múltiples investigaciones debido al impacto que estos sistemas tienen en la confiabilidad operacional. Por ejemplo, (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2019) y (Lee, Bagheri, & Kao, 2015), resaltan que los equipos críticos del sector energético y petrolero deben ser gestionados bajo metodologías basadas en riesgo y confiabilidad, dada su alta sensibilidad a fallas.

En estudios aplicados, se ha demostrado que el RCM permite:

Identificar modos de falla frecuentes como desgaste de bombas, fallas en válvulas modulantes, problemas de atomización y acumulación de incrustaciones.

Priorizar intervenciones mediante análisis funcional y de criticidad.

Establecer planes de mantenimiento preventivo alineados con estándares como ISO 55000 y API RP 580.

Reducir fallas inesperadas en sistemas térmicos, especialmente en etapas de combustión y alimentación de agua.

(Crespo Marquez & De las Heras, 2021) destaca que el RCM, complementado con bases de datos de confiabilidad (ISO 14224, 2016), mejora significativamente la gestión de activos en equipos con altos requerimientos de seguridad operacional, como calderas horizontales o verticales de uso industrial.

Este conjunto de estudios confirma que el RCM es una metodología plenamente vigente y eficaz para equipos térmicos, lo que justifica su aplicación en el análisis y propuesta de mantenimiento preventivo para la caldera EB-1191D.

Tabla 4.

Equipos críticos de la caldera EB-1191D y su relevancia para la aplicación del RCM

Equipo / Subsistema	Función principal	Riesgos asociados a fallas	Relación con el RCM
Caldera EB-1191D (recipiente a presión)	Generación de vapor mediante transferencia térmica.	Sobrepresión, rupturas, ineficiencia, fallas catastróficas.	Identificación de fallas funcionales y modos de falla de mayor criticidad.
Quemador / atomizador	Atomizar y mezclar combustible con aire para formar la llama.	Combustión incompleta, hollín, disparos por falla de llama.	Análisis de funciones, modos de falla por combustión deficiente y tareas preventivas.
Válvulas ON-OFF de combustible	Bloqueo y habilitación del paso de crudo hacia el quemador.	Fugas, encendidos irregulares, riesgos de seguridad.	Clasificación de fallas potenciales y controles obligatorios según estándares.
Válvula modulante de combustible	Regulación fina del flujo de crudo hacia el quemador.	Inestabilidad de llama, pérdida de eficiencia y sobreconsumo.	Identificación de modos de falla por desgaste o mala calibración.
Válvula de vapor para atomización	Suministro de vapor para la atomización del combustible.	Gotas grandes, ineficiencia, hollín, riesgos térmicos.	Priorización de fallas que afectan la combustión.
Ventilador de tiro forzado ELG-1190D	Suministro de aire para combustión.	Falta de aire, vibraciones, combustión incompleta.	Evaluación de modos de falla mecánicos y eléctricos.
Compresor EAC-1190D	Suministro de aire neumático para actuadores.	Pérdida de control, fallas en válvulas, paradas inesperadas.	Identificación de fallas funcionales que afectan sistemas automáticos.
Bombas de combustible EP-11925D / EP-11926D	Impulsar el crudo mezcla hacia el quemador.	Desgastes, fugas, pérdida de eficiencia, inestabilidad de llama.	Análisis de fallas mecánicas recurrentes y priorización de redundancia.

Precalentador de crudo combustible	Reducir viscosidad del crudo para mejorar la atomización.	Combustión deficiente, hollín, sobreesfuerzo en bombas.	Modos de falla térmicos y por obstrucción.
Tanque de agua suavizada	Almacenar agua tratada libre de dureza.	Formación de incrustaciones, baja calidad del agua.	Identificación de condiciones operativas críticas.
Bomba EP-11921D de agua suavizada	Suministro de agua hacia la caldera.	Bajo nivel, disparos de seguridad, sobrecalentamiento.	Modos de falla críticos para integridad del equipo.
Transmisores/indicadores de temperatura y presión	Monitoreo de variables operativas críticas.	Lecturas erróneas, fallas de control, riesgos operativos.	Enfoque RCM en fallas instrumentales y preventivos.
Pantalla / panel de control HMI	Supervisión y operación del sistema.	Pérdida de control, disparos inesperados, fallas de comunicación.	Análisis de fallas funcionales y operacionales.

Nota: Tabla de equipos críticos asociados a la operación de la caldera EB-1191D y su relevancia dentro del enfoque del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Esta clasificación permite identificar los subsistemas que requieren mayor atención en el análisis funcional y en la priorización de modos de falla.

Metodología de Compilación

La presente monografía se desarrolló bajo un enfoque documental–descriptivo, sustentado en la recopilación, análisis y organización de información proveniente de fuentes técnicas, normativas y científicas relacionadas con la confiabilidad de equipos térmicos y la aplicación del RCM. El proceso metodológico se estructuró en cuatro etapas:

Tabla 5.*Etapas de la metodología de compilación documental*

Etapas	Descripción	Actividades realizadas	Resultado obtenido
1. Búsqueda de información	Identificación de fuentes técnicas, normativas y científicas relacionadas con el RCM y equipos térmicos.	- Consulta en Scopus, ScienceDirect, Google Scholar. - Revisión de normas: ISO 14224, ISO 55000, ASME BPVC, API RP 580. - Selección de libros especializados.	Conjunto inicial de documentos relevantes para el estudio.
2. Selección de fuentes	Filtrado de la información recopilada según pertinencia y rigor académico.	- Priorización de estudios sobre calderas y equipos críticos. - Incluye aplicaciones reales del RCM y análisis de confiabilidad. - Exclusión de documentos sin respaldo técnico.	Corpus depurado de información confiable y directamente relacionada con el tema.
3. Organización de la información	Clasificación temática para facilitar el análisis y estructuración del contenido.	- Agrupación en categorías: fundamentos RCM, normas técnicas, estudios aplicados, documentación de la caldera EB-1191D. - Construcción de matrices comparativas y síntesis.	Información ordenada y coherente, apta para análisis comparativo y conceptual.
4. Síntesis y análisis	Integración crítica de las fuentes para construir el marco técnico de la propuesta.	- Elaboración de conclusiones. - Identificación de vacíos y puntos clave. - Relación entre teoría del RCM y operación real de la caldera.	Sustento teórico sólido para el desarrollo de la propuesta de mantenimiento preventivo.

Nota: resumen las etapas que conformaron la metodología de compilación utilizada en esta monografía, la cual permitió estructurar un proceso de revisión documental sistemático, ordenado y coherente con los principios del enfoque RCM.

El presente capítulo permitió consolidar una visión amplia y actualizada sobre el estado del arte del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y su aplicación en calderas y equipos críticos utilizados en la industria. La revisión de la literatura evidenció que el RCM continúa siendo una metodología vigente, robusta y altamente efectiva para optimizar la

disponibilidad, confiabilidad y seguridad operativa de sistemas térmicos similares a la caldera EB-1191D.

Tal como señalan (Ben-Daya, Duffuaa, Raouf, Knezevic, & Ait-Kadi, 2016), las metodologías basadas en confiabilidad permiten estructurar decisiones de mantenimiento más precisas, reducir la incertidumbre operativa y priorizar intervenciones de manera estratégica, especialmente en equipos donde la continuidad del proceso es esencial.

Asimismo, la identificación y clasificación de los equipos críticos asociados a la caldera EB-1191D permitió contextualizar los elementos técnicos sobre los cuales se desarrollará el análisis posterior, destacando su importancia en el proceso de generación de vapor y en la eficiencia del sistema de combustión y alimentación. Por otra parte, la metodología de compilación utilizada basada en una búsqueda sistemática, selección rigurosa de fuentes, organización temática y análisis crítico garantizó la construcción de un marco conceptual sólido, fundamentado y acorde con los lineamientos del enfoque documental/descriptivo.

Este capítulo sienta las bases para avanzar hacia el siguiente apartado, donde se presentará el análisis funcional del sistema, la identificación de fallas potenciales y la estructuración inicial de la propuesta de mantenimiento preventivo centrado en confiabilidad para la caldera EB-1191D.

Desarrollo de la Propuesta

Introducción al Capítulo

El presente capítulo desarrolla la propuesta de mantenimiento preventivo centrado en la confiabilidad para la caldera EB-1191D, integrando los elementos teóricos, normativos y documentales analizados en los capítulos anteriores. A partir de la estructura funcional del equipo, se construye un árbol de equipos basado en bibliografía técnica especializada, el cual

permite identificar los subsistemas y componentes relevantes para el análisis. Posteriormente, se realiza un análisis genérico de criticidad fundamentado en estudios previos y en FMEA documentados para calderas y sistemas de combustión, con el fin de reconocer los modos de falla de mayor impacto sobre la seguridad, eficiencia y disponibilidad operacional.

Con base en estos resultados, se formulan rutinas preventivas adaptadas de manuales técnicos, literatura especializada y recomendaciones normativas. Finalmente, se establece una comparación entre las actividades propuestas y las prácticas estándar sugeridas por fabricantes y entidades especializadas, con el propósito de validar la pertinencia técnica del plan de mantenimiento planteado.

Árbol de Equipos de la Caldera EB-1191D

A continuación, se presenta el árbol de equipos, elaborado conforme a las recomendaciones de (Smith & Hawkins, 2017), (Ben-Daya, Duffuaa, Raouf, Knezevic, & Ait-Kadi, 2016) e (ISO 14224, 2016), que sugieren clasificar los activos por niveles jerárquicos:

Figura 30.

Representación de la Jerarquía Técnica de un Activo según ISO 14224

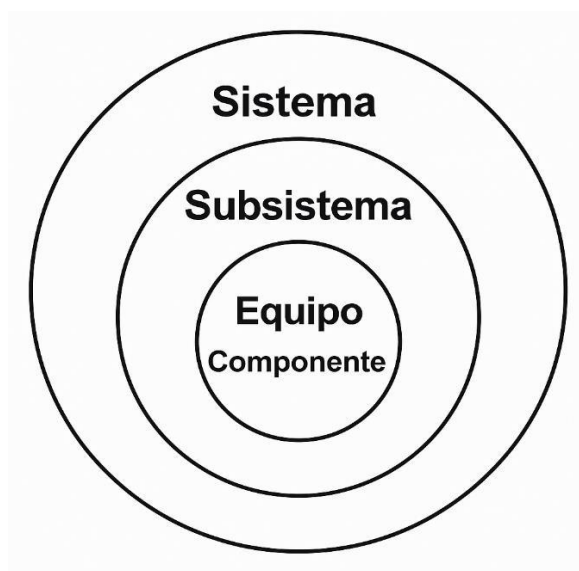
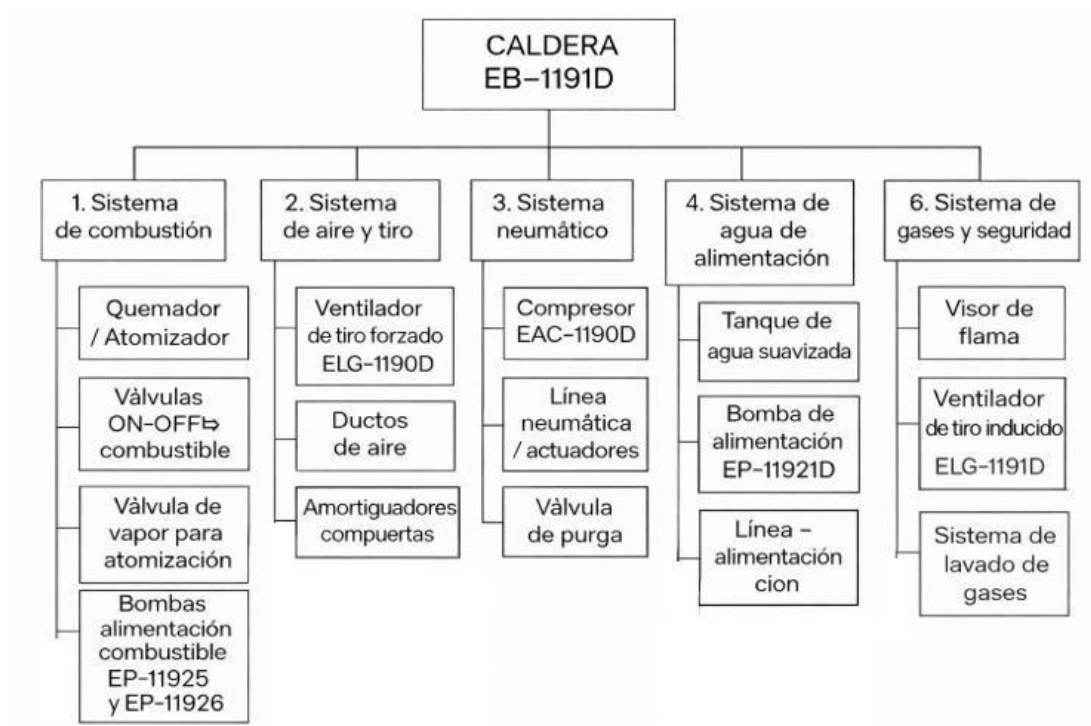


Figura 31.

Árbol de equipos para la caldera EB-1191D



Análisis de Criticidad (genérico/documental basado en FMEA)

El análisis de criticidad presentado en la Tabla 5 se construyó a partir de criterios establecidos en metodologías FMEA ampliamente documentadas en la literatura técnica. Este enfoque permite identificar los modos de falla más relevantes, evaluar sus efectos sobre la seguridad y la operación, y priorizar los subsistemas que requieren mayor atención dentro del plan de mantenimiento.

De acuerdo con (Stamatis, 2003), la evaluación sistemática de severidad, ocurrencia y detección constituye la base para estructurar estrategias preventivas efectivas. Asimismo, (Ben-Daya, Duffuaa, Raouf, Knezevic, & Ait-Kadi, 2016) destacan que la criticidad orienta la asignación de recursos y facilita la toma de decisiones en activos industriales de alta exigencia operativa. Por su parte, la norma (API, 2016) respalda el uso de enfoques basados en riesgo para

sistemas térmicos y de combustión, justificando la priorización de aquellos equipos cuya falla puede comprometer la seguridad o la disponibilidad del proceso. En conjunto, estas referencias fortalecen el análisis documental y validan la pertinencia del enfoque utilizado para la caldera EB-1191D.

Tabla 6.

Matriz de criticidad genérica para subsistemas de la caldera EB-1191D

Subsistema	Función	Modo de falla típico	Efectos	Severidad	Ocurrencia	Detección	Criticidad
Combustión	Generar llama estable	Mala atomización	Hollín, bajo rendimiento	Alta	Media	Media	Alta
Aire/tiro	Suministrar aire	Fallo ventilador	Combustión incompleta	Alta	Media	Alta	Alta
Neumático	Accionar válvulas	Baja presión	Falla de control	Media	Media	Media	Media
Agua suavizada	Alimentar caldera	Cavitación	Disparo por nivel	Alta	Media	Alta	Alta
Control e HMI	Supervisar operación	Fallo de lectura	Operación insegura	Alta	Baja	Media	Alta
Gases	Evacuar productos	Obstrucción	Sobrepresión	Alta	Baja	Media	Media

Rutinas Preventivas Propuestas

Las rutinas preventivas propuestas para la caldera EB-1191D se estructuraron a partir de manuales técnicos, literatura especializada y normas internacionales aplicables a sistemas de combustión y generación de vapor. Estas actividades buscan asegurar la continuidad del servicio,

reducir la probabilidad de fallas funcionales y mantener la eficiencia operativa del equipo. De acuerdo con (Smith & Hawkins, 2017), la implementación de tareas preventivas basadas en confiabilidad permite disminuir los tiempos de paro y optimizar el uso de recursos técnicos. Por su parte, la American Boiler Manufacturers Association (ABMA, 2013) destaca que elementos como bombas de alimentación, válvulas y sistemas de control requieren mantenimientos periódicos para evitar fallas asociadas a desgaste, obstrucciones o condiciones térmicas extremas.

Finalmente, (Bloch, Heinz P, 2012) señala que los equipos rotativos como ventiladores y compresores demandan inspecciones de vibración, alineación y lubricación para garantizar su confiabilidad.

En conjunto, estas fuentes permitieron adaptar actividades documentadas a las condiciones reales de operación de la caldera EB-1191D, asegurando que las intervenciones propuestas resulten coherentes, aplicables y técnicamente justificadas dentro del enfoque del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

Tabla 7.

Rutinas preventivas recomendadas para la caldera EB-1191D

Equipo	Actividad preventiva	Frecuencia sugerida (documental)	Fuente / Referencia
Quemador / atomizador	Limpieza de boquilla y verificación de patrones de atomización	Mensual	(Smith & Hawkins, 2017)
Ventilador de tiro forzado ELG-1190D	Inspección de vibraciones, balanceo ventilador y lubricación rodamientos motor.	Trimestral	(Bloch, Heinz P, 2012)

Ventilador de tiro inducido ELG-1191D	Inspección de vibraciones, alineación de poleas, tensión de correas y lubricación rodamientos motor y chumaceras.	Trimestral	(Bloch, Heinz P, 2012)
Bombas EP-11925D / EP-11926D	Revisión de acople, ajuste de sellos mecánicos, validación de caudal y presión.	Mensual	(ABMA, 2013)
Bomba EP-11921D	Lubricación rodamientos y verificar estado de sellos mecánicos.	Mensual	(Bloch, Heinz P, 2012)
Válvulas ON–OFF	Prueba de estanqueidad, ciclo de funcionamiento	Mensual	(Lipták, 2013)
Válvula modulante de combustible	Revisión del actuador, calibración y respuesta	Mensual	(Lipták, 2013)
Transmisores de temperatura / presión	Calibración y verificación de linealidad	Trimestral	(Doebelin & Manik, 2011)
Panel HMI / PLC	Pruebas de alarmas, simulación de fallas y verificación de comunicaciones	Mensual	(Parr, 2016)

Nota. Las actividades preventivas propuestas se fundamentan en literatura técnica especializada y manuales reconocidos de mantenimiento industrial. Su adaptación a la caldera EB-1191D responde a criterios documentales y a buenas prácticas de confiabilidad descritas por autores como (Bloch, 2012), (Smith & Hawkins, 2017) y (ABMA, 2013), con el fin de garantizar la pertinencia técnica y la aplicabilidad de las intervenciones sugeridas.

Comparación con Planes Estándar del Fabricante

La comparación entre las actividades preventivas propuestas y las recomendaciones típicas de los fabricantes de calderas permite validar la pertinencia técnica del plan elaborado. Aunque la caldera EB-1191D no cuenta con un manual disponible para consulta directa en esta

monografía, se utilizaron referencias documentales de fabricantes reconocidos como Cleaver-Brooks, Fulton y Superior Boiler los cuales establecen rutinas de inspección periódica orientadas a preservar la seguridad, estabilidad de combustión y eficiencia térmica.

Los fabricantes suelen sugerir actividades generales como limpieza del quemador, verificación de válvulas, inspección de bombas y pruebas de seguridad. Sin embargo, el enfoque basado en confiabilidad (RCM) permite profundizar en tareas más específicas, aumentar la frecuencia en equipos de alta criticidad y priorizar actividades de acuerdo con el impacto operativo.

La Tabla 8 presenta la comparación entre las recomendaciones del fabricante y las rutinas preventivas propuestas para la caldera EB-1191D.

Tabla 8.

Comparación entre las rutinas del fabricante y la propuesta basada en RCM

Actividad	Recomendación estándar del fabricante	Propuesta basada en RCM	Observaciones
Limpieza del quemador / boquilla	Mensual	Mensual	Coincide. Actividad crítica para estabilidad de la llama.
Inspección de ventilador de tiro forzado	Trimestral	Trimestral	Coincide. RCM agrega análisis de vibraciones (Bloch, 2012).
Inspección de ventilador de tiro inducido	Trimestral	Trimestral	Coincide. RCM agrega análisis de vibraciones (Bloch, 2012).
Verificación de válvulas ON-OFF	Trimestral	Mensual	RCM prioriza seguridad, por eso aumenta la frecuencia.
Revisión del precalentador	Trimestral	Mensual	RCM lo prioriza por impacto en atomización del combustible.
Calibración de transmisores	Semestral	Trimestral	RCM eleva frecuencia para mejorar confiabilidad de control.

Actividad	Recomendación estándar del fabricante	Propuesta basada en RCM	Observaciones
Inspección de bombas de alimentación	Trimestral	Mensual	RCM considera cavitación y fallas de nivel como riesgos altos.
Pruebas de alarmas y HMI	No siempre especificado	Mensual	RCM añade pruebas funcionales por criticidad del control.

Nota. La comparación se realizó con base en recomendaciones generales de fabricantes de calderas industriales, tales como (Cleaver-Brooks, 2011) y (Superior Boiler Works, Inc., 2015). La propuesta RCM incrementa la confiabilidad operacional al priorizar subsistemas críticos y establecer frecuencias fundamentadas en literatura especializada.

El desarrollo de este capítulo permitió estructurar una propuesta de mantenimiento preventivo centrada en la confiabilidad para la caldera EB-1191D, integrando componentes documentales, técnicos y metodológicos derivados del análisis realizado. A partir del árbol de equipos construido bajo criterios de descomposición funcional, fue posible identificar los subsistemas y componentes más relevantes para el desempeño del equipo, lo que facilitó una comprensión integral de su funcionamiento y de las relaciones entre los distintos elementos del sistema.

El análisis de criticidad, fundamentado en metodologías FMEA documentadas en la literatura y guías de inspección basada en riesgo, permitió reconocer los modos de falla más significativos y las consecuencias que estos pueden generar sobre la seguridad, eficiencia y disponibilidad operacional. Este diagnóstico sirvió como base para priorizar los equipos y definir el alcance de las rutinas preventivas, las cuales fueron elaboradas a partir de manuales técnicos, estándares internacionales y recomendaciones de autores especializados en mantenimiento industrial.

Asimismo, la comparación entre las actividades propuestas y los planes estándar de fabricantes como Superior Boiler Works permitió validar la pertinencia técnica de la propuesta, evidenciando que el enfoque RCM no solo se ajusta a las buenas prácticas industriales, sino que también fortalece la confiabilidad del sistema al incorporar actividades adicionales orientadas a prevenir fallas críticas.

En conjunto, los elementos desarrollados en este capítulo constituyen el fundamento técnico para formular un plan de mantenimiento preventivo estructurado, coherente y aplicable al contexto operativo de la caldera EB-1191D. Con ello, se establecen las bases necesarias para avanzar hacia la consolidación de la propuesta final, orientada a mejorar la disponibilidad, la seguridad y el rendimiento del sistema térmico.

Discusión, Conclusiones y Recomendaciones

Discusión de Hallazgos

El análisis documental y técnico desarrollado en esta monografía permitió evidenciar una tendencia clara en la literatura: el RCM es una metodología ampliamente validada y eficaz para optimizar la confiabilidad y disponibilidad de equipos críticos, especialmente en sistemas térmicos como las calderas industriales. Los estudios revisados (Moubray, 1997), (Ben-Daya, Duffuaa, Raouf, Knezevic, & Ait-Kadi, 2016), (Smith & Hawkins, 2017) coinciden en que la identificación de modos de falla, la priorización de subsistemas críticos y la estructuración de rutinas preventivas sólidas son elementos determinantes para mejorar el desempeño operativo.

En el caso de la caldera EB-1191D, los beneficios esperados tras la implementación del plan de mantenimiento preventivo propuesto incluyen:

Reducción de fallas inesperadas, especialmente en el sistema de combustión y en los equipos rotativos.

Mejora de la estabilidad de la llama, gracias a una atención más frecuente sobre el quemador, válvulas modulantes y precalentador.

Disminución del hollín y optimización de la transferencia térmica, producto del control sobre atomización y suministro de aire.

Mayor confiabilidad del sistema de control, mediante calibración periódica de transmisores y pruebas de alarmas en la HMI.

Mejor calidad del agua de alimentación y reducción de riesgos asociados a incrustaciones.

Los resultados también demuestran que el enfoque RCM es más completo que los planes básicos sugeridos por fabricantes, ya que incorpora análisis de criticidad, aumento en la frecuencia de actividades de seguridad, monitoreo más riguroso de equipos rotativos y una visión centrada en la funcionalidad del sistema y no solo en mantenimientos por intervalos.

En síntesis, los hallazgos de la literatura y el análisis técnico aplicado confirman que el enfoque propuesto es viable, documentado y aporta mejoras concretas en seguridad, disponibilidad y eficiencia operativa.

Conclusiones Generales

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) constituye una metodología adecuada y aplicable al contexto operativo de la caldera EB-1191D, gracias a su enfoque estructurado basado en funciones, modos de falla y consecuencias operativas.

El árbol de equipos elaborado permitió identificar y jerarquizar los subsistemas críticos, facilitando la comprensión del sistema térmico y orientando el análisis hacia los componentes con mayor impacto en la continuidad operacional.

El análisis de criticidad basado en FMEA evidenció que los sistemas de combustión, aire de tiro, bombas y control representan los elementos de mayor riesgo, debido a su influencia directa sobre la seguridad, estabilidad de la llama y eficiencia del proceso.

Las rutinas preventivas propuestas superan en alcance a las recomendaciones estándar de fabricantes, al integrar inspecciones funcionales, monitoreo de variables críticas, calibración sistemática y pruebas periódicas de seguridad.

La propuesta desarrollada contribuye a la mejora de la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de la caldera, y constituye una base sólida para implementar un programa de mantenimiento preventivo documentado y sustentado en literatura técnica.

Recomendaciones Académicas y Prácticas

Recomendaciones Académicas

Continuar promoviendo investigaciones basadas en RCM dentro de la Especialización en Gestión de Mantenimiento Industrial, especialmente en equipos térmicos, rotativos y sistemas de combustión.

Fomentar el uso de normas internacionales como ISO 14224, ISO 55000 y API RP 580 en trabajos académicos, para fortalecer la rigurosidad metodológica y la toma de decisiones técnicas.

Incentivar la formación en análisis de datos, FMEA, gestión de activos y monitoreo de condición, herramientas claves para el mantenimiento moderno.

Recomendaciones Prácticas Para la Operación y Mantenimiento

Implementar el plan preventivo propuesto, priorizando los subsistemas de combustión, aire de tiro y bombas de alimentación, debido a su criticidad operacional.

Establecer registros históricos y bases de datos de fallas alineadas con ISO 14224, para mejorar la toma de decisiones futuras.

Realizar calibración periódica de transmisores e instrumentos, dado su impacto en la estabilidad del proceso.

Ajustar el plan de mantenimiento conforme se recopile información real de operación, adoptando un enfoque de mejora continua.

Integrar monitoreos predictivos básicos (vibración, temperatura, presión) en equipos rotativos como ventiladores y bombas.

Capacitar al personal en operación segura de calderas, pruebas funcionales y respuesta ante alarmas.

El presente trabajo consolidó una propuesta técnica y metodológica para fortalecer la gestión del mantenimiento de la caldera EB-1191D mediante la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). A lo largo de los capítulos se integraron fundamentos teóricos, normativos y documentales con un análisis detallado de los equipos, fallas potenciales y prácticas recomendadas. El enfoque adoptado permitió no solo estructurar un plan preventivo viable y alineado con estándares internacionales, sino también evidenciar la importancia de incorporar herramientas modernas de análisis, evaluación de riesgos y toma de decisiones basada en datos dentro del mantenimiento industrial. En conjunto, la monografía aporta una visión integral que combina conocimiento académico y aplicación práctica, constituyendo una guía sólida para la mejora continua y la operación segura y eficiente de equipos críticos en entornos productivos.

Referencias

- ABMA. (2013). *American Boiler Manufacturers Association*. Vienna, Virginia, Estados Unidos: ABMA Press. doi:978-0981825035
- Ahuja, I. P., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. Obtenido de <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- API. (2016). *American Petroleum Institute*, Tercera. (A. P. Services), Editor) doi:RP 580-2016
- ASME. (2019). *American Society of Mechanical Engineers*. (B. 2019, Editor) doi:978-0791832313
- Ben-Daya, M., Duffuaa, S., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (2016). *Handbook of Maintenance Management and Engineering* (Segunda ed.). New York: Springer. Obtenido de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-6696-7>
- Black, S., & Chisnell, J. (2014). *Operación de calderas, tratamiento de agua, mantenimiento y seguridad* (Segunda ed.). Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: Fairmont Press, distribuido por CRC Press. doi:978-1466553055
- Bloch, H. P. (2012). *A Practical Guide to Machinery Lubrication and Reliability*. (E. /. ScienceDirect, Ed.) Oxford, Reino Unido: Elsevier. Obtenido de <https://www.elsevier.com/books/a-practical-guide-to-machinery-lubrication-and-reliability/bloch/978-0-12-397243-9>
- Bloch, Heinz P. (2012). *A practical guide to machinery lubrication and reliability*. Oxford, Reino Unido: Elsevier (Butterworth–Heinemann). doi:978-0123972439
- Boyce, M. P. (2011). *Gas Turbine Engineering Handbook* (Tercera ed.). Burlington, Massachusetts, Estados Unidos: Elsevier. Obtenido de

<https://www.elsevier.com/books/gas-turbine-engineering-handbook/boyce/978-0-12-383842-1>

Cleaver-Brooks. (2011). *Boiler Operation and Maintenance Manual*. Milwaukee, WI, USA: Cleaver-Brooks Company.

Cortez, B., & Wild, G. (2015). Rotary Airlock Valves: Design, Operation and Maintenance in Industrial Dust Handling Systems. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 229(4), 289–301.

Crespo Márquez, A. (2007). *The Maintenance Management Framework*. Países Bajos: Springer.

Crespo Marquez, A., & De las Heras, A. (2021). A review of maintenance management models: Towards the integration of maintenance and asset management within Industry 4. *Computers in Industry (Elsevier)*, 129, 103–114. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103444>

Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. EE. UU.: CRC Press.

Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2011). *Measurement Systems: Application and Design* (Sexta ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education. doi:978-0070699681

Garg, A., & Deshmukh, S. G. (2020). Maintenance management: Literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(3), 431–455.

Hastings, N. A. (2010). *Physical Asset Management*. Reino Unido: Springer.

Heinz P, B., & Allan R, B. (2010). *Pump User's Handbook: Life Extension*. Estados Unidos: Fairmont Press (distribuido por CRC Press). doi:978-1420062308

Igor J, K., Joseph, P., Messina, Paul, C., & Charles C, H. (2001). Pump Handbook. En K. Igor J, P. Joseph, Messina, C. Paul, & H. Charles C, *Ingeniería de bombas, fundamentos, diseño*

- y operación* (3ra edición ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill Professional. doi:978-0070340323
- ISO 14224. (2016). *International Organization for Standardization*. Obtenido de Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment: <https://www.iso.org/standard/62586.html>
- ISO 55000. (2018). *International Organization for Standardization*. Obtenido de Asset management — Overview, principles and terminology: <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews (Tech. Rep. TR/SE-0401). (K. U. School of Computing & Mathematics / Department of Computer Science, Ed.) *Keele University*. Obtenido de <http://www.it.hiof.no/~haralddh/misc/2016-08-22-smat/Kitchenham-Systematic-Review-2004.pdf>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
doi:DOI:10.1016/j.mfglet.2015.05.001
- Lipták, B. G. (2013). *Válvulas, actuadores, control, automatización* (Cuarta ed.). Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: CRC Press / Taylor & Francis. doi:978-1439817763
- Mora Gutiérrez, L. A. (2019). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control* (Primera edición ed.). Ciudad de México, México: Alfaomega Grupo Editor. doi:978-607-538-565-0
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (Segunda edición ed.). New York, United States: Industrial Press.
- Parr, E. A. (2016). *Programmable Controllers: An Engineer's Guide* (Cuarta ed.). Oxford, Reino Unido: Newnes / Elsevier. doi:978-0081023188

- Smith, & Hawkins. (2017). *Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share*. Oxford, United States: Elsevier. doi:978-0-12-812400-8
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution* (Segunda ed.). ASQ Quality Press.
- Superior Boiler Works, Inc. (2015). Industrial Boiler Maintenance Guide. *Mantenimiento de calderas industriales*. Hutchinson, kansas, USA. Obtenido de <https://superiorboiler.com/resources/>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-art and future trends. *Advances in Manufacturing*, 5(1), 1–15. doi:DOI:10.1007/s40436-019-00276-8
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (Tercera ed.). Nueva York: McGraw-Hill Education. doi:978-0073380197