

**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA “JOSÉ SIMEÓN CAÑAS”  
UNIVERSIDAD DON BOSCO**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN  
CONFIABILIDAD PARA UNA CALDERA BAGACERA”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA**

**LA FACULTAD DE POSTGRADOS UCA**

**Y**

**FACULTAD DE INGENIERÍA UDB**

**PARA OPTAR AL GRADO DE**

**MAESTRO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**Por:**

**Salvador Flores Claros**

**Yasser Alfredo Chávez Posada**

**Diciembre 2021**

**ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.**

**Rectores**

**Andreu Oliva de la Esperanza, S.J.**

**Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.**

**Secretarias Generales**

**Silvia Elinor Azucena de Fernández**

**Yesenia Xiomara Martínez Oviedo**

**Decana de Postgrados UCA**

**Nelly Arely Chévez Reynosa**

**Decano Facultad de Ingeniería**

**Mario Guillermo Juárez Pérez**

**Directores de la Maestría en Gerencia de Mantenimiento Industrial**

**José Luis Martínez (UDB)**

**Diana Carolina Cruz (UCA)**

**Director de Tesis**

**Luis Aarón Martínez Figueroa**

# Índice

Agradecimientos .....	7
Resumen.....	8
Capítulo 1 Introducción.....	9
Capítulo 2 Antecedentes .....	10
2. 1. Periodo de mantenimiento .....	10
2. 2. Periodo de zafra .....	10
2. 3. Alimentación y Molinos.....	10
2. 4. Fabricación .....	10
2. 5. Cogeneración.....	11
Capítulo 3 Justificación Práctica .....	12
Capítulo 4 Reseña histórica del RCM .....	13
Capítulo 5 Objetivos .....	15
5.1. Objetivo General .....	15
5.2. Objetivos Específicos.....	15
Capítulo 6 Alcance del proyecto.....	16
Capítulo 7 Marco Teórico.....	17
7.1. Descripción de la organización.....	17
7.2. Descripción del macroproceso Cogeneración.....	18
7.3. Descripción del activo en estudio Caldera Bagacera .....	19
7.4. Descripción de problemas y oportunidades de mejora .....	34
7.5. Limitaciones y alcances del proyecto.....	35
7.6. Normativa y leyes asociadas al proyecto .....	35
7.7 Identificación de problemas y oportunidades de mejora .....	36
7.8 El mantenimiento y su historia en el Ingenio.....	36
7.9. El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).....	37
7.10 Auditoria AMORMS (Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey) .....	40
Capítulo 8 Metodología.....	41
Capítulo 9 Conformación del Equipo de Trabajo para la implementación del RCM alrededor de la caldera bagacera. ....	43
Capítulo 10 Resultado Auditoria AMORMS.....	44
Capítulo 11 Matriz de criticidad .....	45

Capítulo 12 Ingeniería del proyecto .....	55
Capítulo 13 Hojas de Información FMECA .....	57
13.1. Análisis Horno de Caldera Bagacera.....	57
13.2. Análisis Desaireador de caldera .....	59
13.3 Análisis Transmisor de presión de agua de alimentación de la caldera.....	61
13.4 Análisis Válvula bypass de principal de vapor .....	62
13.5 Análisis Ventilador de tiro forzado caldera bagacera .....	65
13.6 Análisis Lavador de gases de caldera bagacera.....	67
Capítulo 14 Hojas de Decisión RCM .....	69
Capítulo 15 Implementación .....	77
Capítulo 16 Recomendaciones .....	94
Capítulo 17 Conclusiones .....	95
Capítulo 18 Referencias.....	96

# Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ciclo Termodinámico de ingenio azucarero .....	18
Ilustración 2. Ciclo Rankine termodinámico con recalentamiento .....	19
Ilustración 3. Tasa de combustión del bagazo de caña en base seca como función de la fracción máscica de humedad y el precalentamiento del aire primario .....	20
Ilustración 4. Esquema de agua y vapor.....	23
Ilustración 5.Sistema de aire y gases de combustión .....	24
Ilustración 6. Transición de ductos a boquillas de aire de sobre-fuego.....	24
Ilustración 7. Alimentadores dosificadores.....	25
Ilustración 8. Tolvas de alimentación de combustible .....	26
Ilustración 9. Esquema de “damper” motorizado.....	26
Ilustración 10. Soplador de hollín.....	27
Ilustración 11. Sinfín transportador de cenizas.....	28
Ilustración 12.Diagrama de extracción de cenizas.....	29
Ilustración 13.Diagrama de extracción de cenizas .....	30
Ilustración 14. Válvulas de descarga de lecho fluidizado .....	31
Ilustración 15.Transportador vibratorio de arena .....	31
Ilustración 16.Diagrama de arena .....	33
Ilustración 17. Esquema para la implementación del RCM .....	41
Ilustración 18. Diagrama radar de resultados de auditoria AMORMS.....	44
Ilustración 19. Horno de Caldera .....	57
Ilustración 20. Desaireador .....	59
Ilustración 21. Transmisor de presión de agua de alimentación .....	61
Ilustración 22. Esquema de válvula de bypass .....	62
Ilustración 23. Información según modelo de válvula de bypass .....	63
Ilustración 24. Diagrama de flujo .....	63
Ilustración 25. Diagrama de montaje de ventilador forzado 1 .....	65
Ilustración 26. Especificaciones técnicas de ventilador de tiro forzado 1 .....	65
Ilustración 27. Curva de flujo vs presión de ventilador de tiro forzado 1 .....	66
Ilustración 28. Lavador de gases (Scrubber) .....	67
Ilustración 29.Cuadro de Indisponibilidad de la Caldera Bagacera.....	76
Ilustración 30.Cuadro de avance semanal .....	77
Ilustración 31 Porcentaje de avance por áreas .....	78
Ilustración 32. Pantalla de solicitud de mantenimiento .....	78
Ilustración 33. Generación de órdenes de trabajo.....	79
Ilustración 34. Algoritmo para la generación de OT .....	80
Ilustración 35. Consulta de intervención de equipos.....	81
Ilustración 36 Esquema de Identificación de modos de fallo .....	84
Ilustración 37 Pantalla modificada de solicitudes de mantenimiento .....	85
Ilustración 38 Modificación de pantalla de órdenes de trabajo .....	86
Ilustración 39 Modificación de pantalla de bitácora en zafra.....	88
Ilustración 40 Pantalla de disponibilidad de caldera .....	91

Ilustración 41. Cronograma de implementación de RCM ..... 93

## Índice de Tablas

Tabla 1. Puntuación de fases evaluadas.....	44
Tabla 2. Descripción de variables de matriz de criticidad .....	45
Tabla 3. Ponderación de variables .....	46
Tabla 4. Componentes de caldera.....	53
Tabla 5. Niveles de criticidad.....	54
Tabla 6. Equipos de mayor criticidad .....	55
Tabla 7. Análisis FMECA de Horno de Caldera HPB.....	58
Tabla 8. Análisis FMECA Desaireador de Caldera.....	60
Tabla 9. Análisis FMECA de Transmisor de Presión de Agua de Alimentación .....	61
Tabla 10. Análisis FMECA de válvula principal de bypass de vapor .....	64
Tabla 11. Análisis FMECA de ventilador de tiro forzado 1 .....	66
Tabla 12. Análisis FMECA de Lavador de Gases de Caldera .....	68
Tabla 13. Propuestas de mejoras para Horno de Caldera.....	69
Tabla 14. Propuesta de mejoras para desaireador .....	70
Tabla 15. Propuesta de mejoras para Transmisor de presión de agua de alimentación .....	71
Tabla 16. Propuesta de mejoras para válvula de bypass .....	72
Tabla 17. Propuestas de mejora para ventilador forzado.....	73
Tabla 18. Propuestas de mejora para lavador de gases.....	74
Tabla 19. Resumen de Costo Total de RCM .....	75

## Agradecimientos

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad, y por esta nueva meta alcanzada en nuestra vida profesional.

Agradecemos a Ingenio El Ángel, por haber financiado nuestros estudios de Maestría en Gestión de Mantenimiento Industrial otorgándonos una beca.

Gracias a nuestros padres, por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A esposa e hijos por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar con nosotros en todo momento. A todas nuestras familias porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de nosotros mejores personas y de una u otra forma nos acompañan en todos nuestros sueños y metas.

Quiero expresar también nuestro más sincero agradecimiento al Ing. German Molina por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis. Debemos destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia que hizo que nuestras discusiones redundaron benéficamente tanto a nivel profesional como personal. No cabe duda de que su participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Queremos extender un sincero agradecimiento al Dr. Luis Aarón, por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplio conocimiento sobre la elaboración del material estudiado en esta tesis. Le agradecemos también por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos.

De igual manera nuestros agradecimientos a la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” y la Universidad Don Bosco, a nuestros catedráticos quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que podamos crecer como profesionales, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente agradecer a todos nuestros amigos, por apoyarnos, por extender su mano en momentos difíciles.



## Resumen

Las plantas de producción necesitan tener mayor disponibilidad en sus activos físicos y para ello se deben destinar recursos al mantenimiento de sus equipos. Lo anterior parece ser una frase fácil de llevar a cabo en la práctica, sin embargo, los recursos se deben dirigir de forma correcta, ya que de no ser así la organización podría caer en despilfarros económicos y pérdida de confiabilidad en sus maquinarias, lo que se traduce en pérdidas de producción, pedidos con llegada tardía y en cantidades que no corresponde.

En la industria hay algunas metodologías que se pueden ocupar para aumentar la confiabilidad de la planta a través de sus activos físicos. Una de esas metodologías es el llamado Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el cual fue utilizado en primera instancia en la industria de la aviación comercial, luego algunas entidades como Fuerzas Armadas y finalmente llevado a aplicarse en la industria.

El presente trabajo, pretende emplear la metodología RCM abarcando todos los sistemas y subsistemas de una caldera bagacera, que es un activo crítico para el Ingenio Azucarero, en el cual se requiere aumentar la confiabilidad y disponibilidad de esta para poder llevar a cabo los compromisos comerciales generados con los estándares más exigentes del mercado.

# Capítulo 1 Introducción

La metodología del mantenimiento basado en confiabilidad fue implementada primeramente en la industria de la aviación, ya que es ahí donde se requería una alta confiabilidad de los equipos y mejoras en los costos de mantenimiento. De allí en adelante varias industrias han copiado el modelo y se han obtenido grandes beneficios al implementar dicha metodología en los planes de mantenimiento en las plantas industriales.

En el presente trabajo se busca aplicar los conceptos de criticidad de máquinas y confiabilidad operacional en los equipos que componen las diferentes partes de una caldera bagacera. Esto se justifica desde el punto de vista que es uno de los equipos más importantes dentro del proceso en un ingenio azucarero y la implementación de una metodología de mantenimiento basado en confiabilidad para este equipo sería la mejor opción, ya que el análisis identifica las funciones de los equipos, sus fallas funcionales, sus modos de fallas y sus consecuencias. Gracias a la exhaustiva observación y generación de distintas visiones en el análisis, se llega a generar un menor costo en mantenimiento, debido a que el número de tareas a realizar se reducen, concentrando los esfuerzos solamente en las más importantes, ya que por el momento no se tiene definido un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad. Los planes de mantenimiento existentes en los ingenios azucareros no han evolucionado como se debe y es por eso que se tienen oportunidades de mejora con los equipos que operan en la producción de azúcar y generación de energía. Las fallas generan altos costos de mantenimiento y reducciones en la productividad. Estos problemas pueden ser minimizados implementando un plan de mantenimiento adecuado. Para esto hay que dar varias definiciones previas, como cuales son los equipos más críticos de cada macroproceso y es con estos equipos con los cuales se debe comenzar a trabajar en el plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, debido a que en estos equipos se verá la mayor recuperación económica y el impacto de un buen mantenimiento.

Por el momento los planes de mantenimiento que se tienen para estos equipos son basados únicamente en la metodología preventiva y correctiva de mantenimiento. La caldera cuenta con varias mediciones de parámetros en línea que son importantes para la buena operación de esta y esto se puede aprovechar también para cambiar a una metodología basada en la confiabilidad operacional. Esto es un punto a favor ya que no se tendría que hacer una inversión grande para dar inicio con esta parte tan importante. A algunos componentes del sistema como ventiladores, motores y bombas ya se les hace inspecciones predictivas como análisis de vibraciones, termografía y líquidos penetrantes. Esto ha disminuido considerablemente las fallas imprevistas y ha mejorado la disponibilidad de estos componentes.

Se seleccionó este equipo (caldera bagacera) debido a que después de hacer un análisis de criticidad que abarcó todos los equipos del ingenio fue el que resultó con el porcentaje de criticidad más alto. Se trabajará por etapas hasta llegar a la implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad operacional, llegando a los objetivos buscados midiendo con los indicadores el avance de estos para llevar el seguimiento y mejora continua de dicho plan. Después de lograr esta implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad en una caldera bagacera se procederá posteriormente a extender dicho enfoque a los demás equipos críticos que se encuentran en todas las áreas del ingenio y así poder generar ahorro y mejorar la utilidad de la planta.

## Capítulo 2 Antecedentes

La caña de azúcar es la principal materia prima de los ingenios azucareros de El Salvador, durante el periodo de zafra, para obtener sus 3 productos finales: azúcar, melaza y energía eléctrica. Una vez terminada la producción, se procede con el periodo de mantenimiento para aprovechar el tiempo fuera de producción hasta el próximo periodo de zafra. La crisis de los precios bajos del azúcar y la energía eléctrica, obligan a los ingenios a buscar alternativas para reducir costos en los procesos y hacer más eficiente la producción.

### 2. 1. Periodo de mantenimiento

Durante el periodo de mantenimiento predomina el mantenimiento preventivo y predictivo, para lo cual se establece una distribución de equipos a los cuales se les realiza el mantenimiento. Dicho proceso dura un periodo que va desde mayo hasta octubre (aproximadamente 180 días).

### 2. 2. Periodo de zafra

Durante la zafra, el mantenimiento tiene una óptica diferente en cuanto a sus políticas de mantenimiento, pues se tiene una producción de 24 horas a lo largo de los 135 días que dura la zafra. Por tanto, solamente se tiene paros de 6 horas cada 250,000 toneladas de caña molida para los respectivos cambios de cuchillas en el área de preparación de caña debido a los desgastes que sufren, y lo mismo aplica para los peines raspadores de molinos. De esta manera evitamos pérdidas por mala eficiencia en la preparación de caña y molienda. Aprovechando estas paradas programadas de 6 horas, las otras áreas del ingenio (Fabrica y Cogeneración) también realizan mantenimiento preventivo y correctivo en algunos equipos que hayan presentado síntomas anormales.

El ingenio se divide en tres macroprocesos principales:

### 2. 3. Alimentación y Molinos

Inicia con la alimentación de caña, en esta fase del proceso, se recibe la materia prima en la mesa alimentadora, donde la caña de azúcar inicia su transporte en movimiento continuo para la siguiente etapa. En el área de picado se prepara la caña de azúcar en fibras a través de un conjunto de cuchillas que giran a gran velocidad. En esta operación se limpia y desintegra la materia extraña y la caña de azúcar para pasar a los molinos. Después de haberse desfibrado la caña es recibida en los molinos que contienen cuatro masas de rodamiento cada uno, para extraer la mayor cantidad de jugo. El bagazo pasa por cada molino y al llegar al último se le aplica agua caliente, para poder extraer el máximo de sacarosa. Una vez se ha pasado por los molinos, el jugo cae en unas bateas, donde es bombeado a los tanques pesadores y el bagacillo es transportado a las calderas, donde sirve de materia prima para la generación de vapor y energía eléctrica para que la maquinaria siga funcionando.

### 2. 4. Fabricación

El proceso continúa con la recepción del jugo en los tanques pesadores donde se calcifica y azufra para obtener la pureza óptima del jugo, lo cual consiste en la precipitación de materias extrañas y otras impurezas. Al jugo se le aplica altas temperaturas a vapor de 210 grados a 220 grados Fahrenheit, con el fin de eliminar el exceso de cal y otros cuerpos impuros. Luego en la clarificación su función es atrapar el bagacillo y carboncillo que lleva el jugo, manteniendo la temperatura por

medio de una sustancia floculante y formando una masa llamada cachaza, la cual es bombeada como un desecho. En la evaporación se extrae el agua, y el jugo se convierte en miel virgen, la cual pasa a los tanques de meladura. Luego se cristaliza en los tanques denominados tachos donde reciben las mieles y siguen en movimiento constante a temperatura alta, donde se solidifica y se cristaliza formando el grano de azúcar. Posteriormente pasa al área de centrifugado, en este proceso la miel se separa del grano de azúcar cristalizado. Las mieles desprendidas del grano se clasifican en miel de primera, segunda y de tercera; ésta última es conocida como melaza, siendo éste el punto de separación de la melaza como subproducto. En el área de secado el grano de azúcar blanca es transportado al secado para pulverizarlo y luego pasa a ser enfriado y pesado para envasarlo.

## 2. 5. Cogeneración

Luego que se separa el bagazo del jugo de la caña de azúcar, se deposita en un área, y se lleva por medio de bandas transportadoras hacia la planta termoeléctrica. Ya en la planta, la banda deposita el bagazo en el horno de la caldera para quemarlo en movimiento a una temperatura que va de los 850 a los 900 grados centígrados. El bagazo por su propia naturaleza combustiona prácticamente al instante. Dentro de la caldera hay un sistema interno de inyección de aire para crear la turbulencia, para que una vez entre al horno sea esparcido en toda el área de este y se cree un remolino para que se queme en el aire, para que se queme instantáneamente. En el ingenio azucarero, se emplea actualmente el bagazo de la caña como combustible en las calderas que generan el vapor que necesitan las turbinas para el accionamiento de generadores eléctricos, energía eléctrica que es utilizada para el movimiento de los molinos, bombas centrífugas, ventiladores, etc.; y el vapor de escape se destina al proceso de fabricación de azúcar. Las presiones y temperaturas del vapor generado en estas calderas son suficientes para lograr un equilibrio energético entre fuerza motriz y vapor para el proceso. Con calderas de presión y temperatura de vapor más altas y mejor rendimiento, se puede accionar una turbina con un generador eléctrico de mayor potencia que cubre las necesidades propias de la fábrica y queda un importante excedente que se podría exportar a la red eléctrica sin que haya incremento en el uso de la biomasa. Esta energía eléctrica generada por un combustible renovable, que se entregaría al sistema eléctrico nacional reemplaza a la generada en centrales térmicas que consumen combustibles fósiles, con un impacto ambiental favorable.

## Capítulo 3 Justificación Práctica

Los ingenios en el presente deben buscar distintas alternativas para ser competitivos y diferenciarse, esto con el fin de permanecer vigentes en el mercado ofreciendo sus productos. Por lo anterior, es importante ver en qué frentes se pueden generar disminuciones de costos, revisar en forma constante la cadena de valor, dedicar tiempo y recursos a la innovación tecnológica y como en el presente caso, también enfocar los esfuerzos de la empresa en la gestión de los costos de mantenimiento.

La gestión del mantenimiento a nivel industrial, dependiendo de cada organización, tiene variadas alternativas las cuales van desde abarcar todas las fallas que pueda tener un activo físico (Mantenimiento Productivo Total) u otro en el cual la orientación se enfoque solamente en las fallas que tengan mayores consecuencias para las personas, el medio ambiente y las operaciones y además genere una disminución de los costos en el mediano y largo plazo (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad). Así cada empresa usará sus recursos disponibles para derivar a una u otra forma de gestionar el mantenimiento y con ello ejecutar las estrategias de mantenimiento propias de cada metodología.

El Ingenio, debido a los constantes cambios en el mercado del azúcar y la energía, la competencia creciente y agresiva del mercado de azúcar de India y Brasil entre otros, el ingreso descontrolado al país de generadores de energía eléctrica y la obligación de mejorar los procesos internos para ser sostenible en el tiempo como organización, hace dirigir esfuerzos a la disminución de costos de mantenimiento, por lo que la filosofía del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RMC) ayuda a seguir este lineamiento estratégico.

La importancia de desarrollar la metodología RCM para el activo Caldera Bagacera en el Ingenio Azucarero, es fundamental debido a su alta criticidad, resultado de un estudio que se realizó en etapas pasadas dentro del ingenio. Representando altos costos en pérdidas de producción de azúcar anuales que ascienden a \$ 114,000.00 y perdidas por energía no vendida de \$ 79,000.00 anuales, así también como los altos costos de reparación y tiempos de indisponibilidad promedios de 26 horas por zafra, ya que es un activo que es parte del proceso para generar la energía eléctrica para mantener todo el ingenio y el vapor para la producción de azúcar. Así mismo, que a través de dicho desarrollo se incrementa el conocimiento de los operadores y mantenedores de la maquinaria y se centran los esfuerzos en disponer los escasos recursos en las fallas más catastróficas que pueda presentar el activo.

En consecuencia, utilizando el RCM se logra el objetivo principal de disminuir los costos de mantenimiento, sosteniendo o incluso aumentando la Confiabilidad del activo físico en estudio, ya que algunas tareas de Mantenimiento Preventivo (MP) pueden quedar eliminadas de las nuevas estrategias que se usen producto de los resultados del análisis del equipo multidisciplinario RCM. Además, se mejoran los procedimientos tanto de operadores, como de mantenedores, debido a que aumentan sus conocimientos técnicos, se familiarizan de mejor forma con su propio trabajo y los de sus colegas, obteniendo un mayor grado de pertenencia con la participación en el progreso del proyecto.

## Capítulo 4 Reseña histórica del RCM

La importancia del Mantenimiento en los procesos ha ido de la mano con el aumento de las exigencias de Confiabilidad y Disponibilidad de los equipos, esto debido a que las rigurosidades de los requerimientos y las expectativas de los consumidores de productos y servicios se van incrementando más y más. Es así como se pasó de una 1era 2da y 3era Generación de Mantenimiento, la cual fue evolucionando a medida que se incrementaba la demanda por maquinarias disponibles y la tecnología fue en progreso.

La industria de la aviación comercial fue pionera en el uso de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, esto impulsado por la necesidad de disminuir la cantidad de accidentes aéreos, los cuales tenían tasas de 60 accidentes por cada millón de despegues a finales de 1950 y además se conocía que un tercio de los siniestros eran provocados por fallas en los equipos. Lo anterior hizo necesario buscar los medios disponibles para aumentar la confiabilidad de los equipos que estaban fallando y revertir la tendencia en aumento de la tasa de accidentes (Pérez, 2012).

La aviación comercial logró con muy buenos resultados afrontar el problema ya descrito, por lo que la misma metodología empezó a expandirse hacia otros campos como el Ejército, la Fuerza Aérea y la Armada principalmente en EE. UU. Al tener también en otros sectores resultados satisfactorios, se lleva este modo de abarcar las fallas a la Industria, en la cual uno de los actores protagónicos es John Moubray, quien con su experiencia en la formulación de estrategias se interesó en el modelo usado y logró aplicarlo en la Industria Minera, primeramente, la que por su exitoso modelo se desplegó a varios países y muchas industrias también.

Uno de los problemas presentados, a medida que la metodología se fue implementando en varios sectores en forma transversal, fue que en algunas organizaciones no se desarrollaba de una forma que pudiera ser llamada RCM como tal, por lo que surgió la necesidad imperativa de crear una Norma que fuera una especie de guía a consultar paso a paso. Fue así como después de años de trabajo y consenso entre varios expertos, se creó la Norma SAE JA1011 y posteriormente la Norma SAE JA1012, las cuales conforman el cuerpo y los pasos que se deben seguir para que un proceso pueda ser nombrado como un RCM (Pérez, 2012).

La filosofía RCM aplicada a la industria pudo aportar otras consideraciones que en un principio (cuando el método se utilizaba solamente para la aviación comercial) no se trataban, como son la seguridad de las personas, el compromiso con el medio ambiente, los que están muy en boga hoy en día. En el mundo, el uso del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se ejecuta en algunas instalaciones industriales siguiendo los patrones aplicados e incluidos en esta forma de hacer mantenimiento. Básicamente el análisis identifica las funciones de los equipos, sus fallas funcionales, sus modos de fallas y sus consecuencias. Gracias a la exhaustiva observación y generación de distintas visiones en el análisis, se llega a generar un menor costo en mantenimiento, debido a que el número de tareas a realizar se reducen, concentrando los esfuerzos solamente en las más importantes; los costos de mantenimiento preventivo bajan alrededor de un 60% y aumentan los de mantenimiento a condición en un 40%, lo último porque hay nuevas tareas también que antes no se estimaban hasta antes del estudio; el RCM deja un registro documentado el cual guarda los eventos de pérdidas de función, por lo que puede servir a los operadores y

mantenedores como guía de fallas anteriores y además se eleva el nivel técnico de las personas involucradas en el funcionamiento y el mantenimiento (Poveda, 2011).

Como se ha demostrado, en general el método de implementar un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad logra orientar esfuerzos, disminuir costos y mantener estándares de operación. Sin embargo, durante el avance del proyecto y las reuniones del grupo RCM, se alargan en demasiado en los análisis, ya que no hay un marco a seguir para el nivel de detalle y profundidad con el cual se quiera abarcar un Sistema, Subsistema y/o Componente del activo que se está evaluando. Una de las soluciones planteadas a esta cuestión, es la creación de la Norma ISO 14224, la cual es una herramienta ideada para el registro de datos durante el tratamiento con metodología RCM de un equipo, además otorga márgenes claros a seguir y estandariza el lenguaje, el que puede ser compartido y comparado con otras organizaciones. Con esta modalidad de abordar el RCM, se acotan más los tiempos de observaciones que utiliza el equipo de expertos que participan en las reuniones del proyecto (Troffé, 2011).

## Capítulo 5 Objetivos

### 5.1. Objetivo General

Nuestro objetivo está planteado bajo una estructura SMART. (Specific, Measurable, Attainable, Relevant and Timely).

- Diseñar e implementar una metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, basado en los lineamientos de la estructura ISO 55001 en el equipo crítico Caldera Bagacera de Ingenio Azucarero. Permitiendo la optimización de la disponibilidad del conjunto de equipos en estudio.

### 5.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información de distintas fuentes para conocer los variados sistemas y subsistemas que conforman la Caldera Bagacera.
- Realizar el análisis de criticidad para conocer los sistemas y subsistemas que representan mayor criticidad dentro de la Caldera Bagacera.
- Diseñar la metodología RCM al activo físico Caldera Bagacera, previo análisis a su contexto operacional actual.
- Implementar la metodología RCM al activo físico Caldera Bagacera a través del sistema de control de mantenimiento actual.
- Reducir el tiempo de parada por fallas inesperadas. De manera que se analizarán las partes críticas de la caldera bagacera.



## Capítulo 6 Alcance del proyecto

Los alcances del proyecto incluyen el desarrollo de la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el cual participa un grupo multidisciplinario del Ingenio y se llevan a cabo reuniones semanales, se revisan avances de compromisos acordados, se confeccionan tablas de criticidad de cada componente y se proponen las Estrategias de Mantenimiento más convenientes para la Caldera Bagacera.

Hacia el final del proyecto deberá ser estimada por la Superintendencia de Mantenimiento hasta que etapa del proyecto se podrá llegar de acuerdo con la disponibilidad económica del Ingenio, con el objetivo final de disponer los recursos para la implementación de las estrategias de mantenimiento a aplicar en la maquinaria.

## Capítulo 7 Marco Teórico

### 7.1. Descripción de la organización

El Ingenio es una empresa generadora de inversión, empleo y desarrollo en el país. Cuenta con un modelo de negocio que genera valor y beneficia a toda la cadena productiva.

Se invierte constantemente en innovación y tecnología de punta en busca de soluciones integrales y creativas a retos que presentan aquellas industrias en las que estamos presentes.

Innovación Agrícola: Se prepara para la diversificación de cultivos alternativos, como una solución integral, sostenible y creativa que genera valor y contribuye al desarrollo económico y social de una región, que tradicionalmente ha sido cañera.

El azúcar es el principal producto que produce el Ingenio. Los tipos de azúcares que se realizan son azúcar sulfatada, morena y refinada, producto que se encuentra listo para abastecer todos los mercados, desde el mercado local, preferencial, hasta el mercado mundial.

La energía limpia es uno de los principales productos de la diversificación del Ingenio, la cual, proveniente de fuentes renovables y es utilizada para alimentar todo el proceso industrial. El excedente se comercializa en la red eléctrica nacional.

## 7.2. Descripción del macroproceso Cogeneración

La cogeneración es la generación simultánea de energía eléctrica y calor útil a partir de un único proceso de consumo energético primario. Esta tecnología engloba todos los conceptos y tecnologías en las cuales el calor y la potencia eléctrica son conjuntamente generadas por una sola unidad y utilizadas por uno o varios consumidores.

Los altos niveles de eficiencia que nos provee esta tecnología se deben a utilizar energía residual resultante de la generación de potencia. La cogeneración es mucho más eficiente que la producción de electricidad y calor por separado, aportando en más de 30% a la eficiencia del sistema conjunto y reduciendo el consumo de combustible en más de un 50%. Los sistemas de cogeneración convierten la energía contenida en el combustible en 2 tipos de energías utilizables por la industria:

- 1.- Energía mecánica y eléctrica
- 2.- Energía térmica, vapor útil o gases calientes para proceso

La cogeneración moderna es un sistema tecnológico que incorpora diferentes principios, entre ellos la competitividad y la disminución de emisiones contaminantes; los cuales están contemplados en las políticas de globalización económica regional, así como la política internacional orientada a lograr un desarrollo sostenible.

El propósito principal de la cogeneración es lograr un mejor aprovechamiento de los combustibles primarios, razón por la cual se considera en los programas de ahorro de energía como una alternativa fundamental.

El sistema utilizado en la industria azucarera es un ciclo Rankine con sobrecalentamiento y recalentamiento. Los equipos involucrados en el sistema son los siguiente, de manera general:

- Caldera Bagacera
- Turbina de vapor a extracción o condensación
- Calentadores regenerativos
- Bombas centrífugas y multietapas
- Condensadores
- Torres de enfriamiento
- Transportadores de bagazo

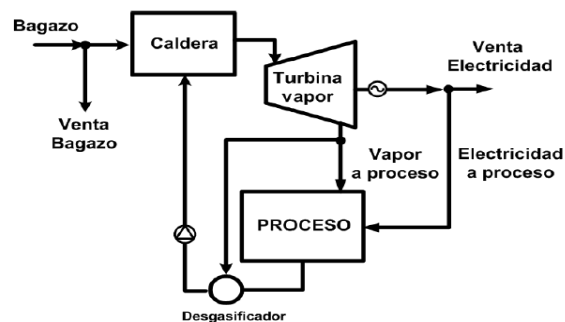
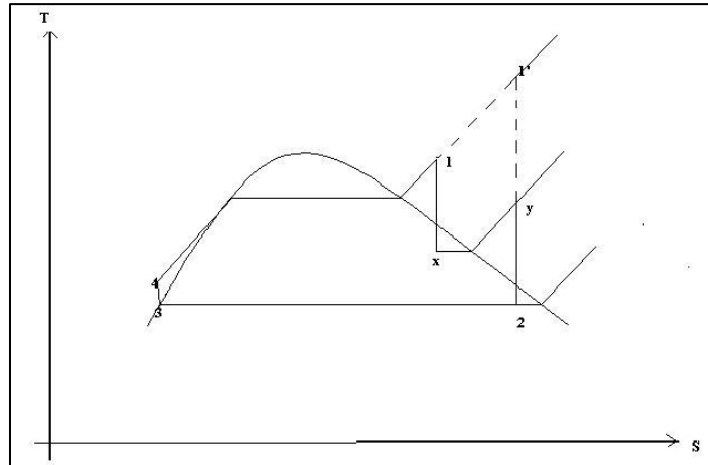


Ilustración 1. Ciclo Termodinámico de ingenio azucarero  
Fuente: Ángel Rubio-González, Integración y esquemas energéticos



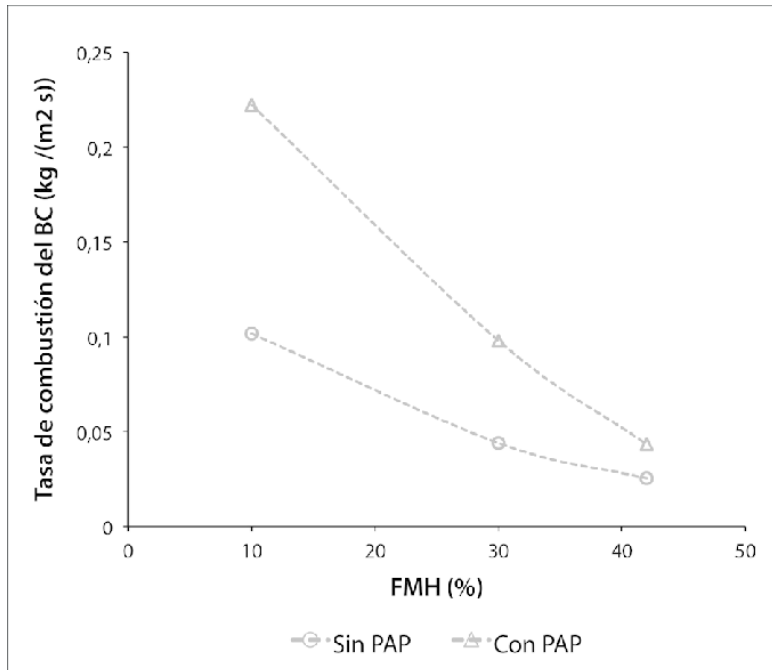
*Ilustración 2. Ciclo Rankine termodinámico con recalentamiento*  
 Fuente: Ángel Rubio-González, Integración y esquemas energéticos

Con el ciclo Rankine puede incrementarse también aumentando la presión de operación en la caldera. Sin embargo, un aumento en la presión de operación de la caldera origina un mayor grado de humedad en los últimos pasos de la turbina. Este problema puede solucionarse haciendo uso de recalentamiento, en donde el vapor a alta presión procedente de la caldera se expande solo parcialmente en una parte de la turbina, para volver a ser recalentado en la caldera. Posteriormente, el vapor retorna a la turbina, en donde se expande hasta la presión del condensador. Un ciclo ideal con recalentamiento, y su correspondiente diagrama temperatura-entropía aparece en la ilustración 2. Obsérvese en esta figura que el ciclo Rankine con sobrecalentamiento solamente sería más eficiente que el ciclo con recalentamiento, si en el primero fuera posible calentar el vapor hasta el estado 1' sin incurrir en problemas de materiales.

El ciclo Rankine con recalentamiento puede ayudar a elevar mínimamente la eficiencia del ciclo, pero se usa para alargar el tiempo de vida de la turbina. Idealmente podríamos usar una cantidad infinita de recalentamientos para continuar elevando la eficiencia.

### 7.3. Descripción del activo en estudio Caldera Bagacera

Las calderas bagaceras, proyectadas para trabajo en intemperie, son formada básicamente por un domo de vapor, conectado a un haz vertical de tubos convectivos, un hogar vertical formado por tubos de agua membrados, siendo que la pared frontal es curvada en la parte superior para formar el techo del hogar. Esta caldera es dotada de un horno, apropiado para la quema de bagazo de caña con alto contenido de humedad.



*Ilustración 3. Tasa de combustión del bagazo de caña en base seca como función de la fracción másica de humedad y el precalentamiento del aire primario*

*Fuente: Zamir Sánchez Castro, Efecto del precalentamiento del aire primario y la humedad del bagazo*

La tasa de combustión del bagazo de caña en base seca calculada se presenta en la Ilustración 3. Al aumentar la fracción másica de humedad (FMH) de 10% a 42% se observa una reducción en la tasa de combustión en base seca del bagazo de caña casi constante, de 49% y de 55% para los experimentos sin Precalentador de aire primario (PAP) y con Precalentador de aire primario PAP, respectivamente.

Para que haya un eficiente desempeño en la producción de vapor, el domo de vapor posee “internos” que tienen dos funciones esenciales: una de ellas es separar el vapor de agua (separadores tipo ciclón y primarios), para que los tubos de bajada reciban el agua libre de vapor; la otra función es separar la humedad del vapor (secadores secundarios), con el fin que este sea enviado al proceso.

El hogar de la caldera es constituido por paredes enteras, formadas por tubos inter unidos por aletas soldadas longitudinalmente en toda longitud de estos, produciendo así una pared refrigerada y estructuralmente auto soportada. En donde existe discontinuidad de las aletas, son colocados cubiertas de placas, protegidos por refractarios, garantizando la estanqueidad a los gases.

Las calderas del tipo bagaceras, poseen hogar balanceado, operan a través de circulación natural del agua, utilizándose bagazo de caña como combustible, que es introducido dosificadamente, en el interior del hogar, a través de alimentadores rotativos y distribuido por los esparcidores neumáticos, para ser quemado dentro del horno de lecho fluidizado.

El horno de lecho fluidizado a diferencia de un horno de parrilla convencional es un horno en el que ocurre un fenómeno físico, que, al tener una cantidad de una sustancia sólida particulada, que para

nuestro caso es arena contenida dentro las tolvas del horno, se coloca en condiciones apropiadas para hacer que una mezcla sólida / fluido que se comporte como un fluido por medio de inyección de aire a través de los ventiladores forzados.

La razón de quema puede ser controlada manual o automáticamente, para mantener constante la presión de salida del vapor de la caldera, en diferentes cargas.

Las calderas del tipo bagacera son diseñadas y construidas bajo las especificaciones dictadas por el Código ASME Sección I.

#### Características generales

Producción Nominal de Vapor .....	235,000 kg/h
Presión de Operación .....	102 kgf/cm <sup>2</sup> (g)
Temperatura del Vapor .....	545°C
Temperatura del Agua de Alimentación .....	145°C
Operación .....	tiro balanceado
Circulación de agua .....	natural
superficie de total de calentamiento .....	4,637 m <sup>2</sup>
Combustible Principal .....	Bagazo de caña
Humedad del Combustible .....	49.91%
Poder Calorífico Superior (PCS) base húmeda .....	2,233 kcal/kg
Poder Calorífico Inferior (PCI) base húmeda .....	1,789 kcal/kg
Consumo de Bagazo de Caña a Plena Carga .....	88,900 kg/h
Exceso de Aire .....	26.52%
Temperatura del Aire en la Entrada de los Calentadores a Vapor .....	27°C
Temperatura del Aire en la Entrada del Calentador a Gas .....	80°C
Temperatura del Aire en la Salida del Calentador a Gas .....	224°C
Temperatura de los Gases en la Salida de la Caldera .....	386°C
Temperatura de los Gases en la Salida del Economizador .....	261°C
Temperatura de los Gases en la Salida del Calentador a Gas .....	160°C
Temperatura del Agua en la Salida de lo Cambiadores de Calor del Ciclo .....	210°C
Temperatura de la Agua en la Salida del Economizador .....	273°C
Rendimiento Térmico al PCI .....	91.8% +/- 1.5%

## Sistema de agua y vapor

El agua de alimentación que proviene del desaireador, es bombeada por medio de las bombas especialmente dimensionadas para esta finalidad, y trasladada a través de tuberías para los intercambiadores de calor del ciclo y después economizador, donde es calentada, dirigiéndose hacia la caldera.

Entonces, el agua de alimentación es distribuida uniformemente en el interior del domo, a través de una tubería especialmente instalada para esta finalidad. Por medio de un conjunto de compartimientos el agua es enviada para el sistema de tubos de bajada (downcomers). De ellos el agua sigue para los cabezales de alimentación del haz tubular y cabezales inferiores de las paredes del hogar, volviendo al domo de vapor a través de los circuitos ascendentes del haz tubular y paredes de agua, ya transformada en vapor como se muestra en la Ilustración 4.

En las paredes tubulares del hogar, ocurre el cambio de fase, y la mezcla de agua y vapor es enviada al domo, existiendo para esto un conjunto de tubos "risers", interuniendo el domo a los cabezales superiores. Los tubos de las paredes frontal y trasera son unidos directamente a un cabezal, siendo este conectado por medio de tubos al domo de vapor.

La porción de vapor generado en la caldera es colectada en el domo y dirigida a los separadores de vapor, que permiten el paso del vapor, reteniendo las partículas de agua.

Los separadores de vapor forman parte del conjunto de internos del domo, los cuales tienen dos funciones que deben ser totalmente cumplidas para asegurar un desempeño eficiente. Una de ellas es separar el vapor de agua, para que el sistema de tubos de bajada reciba agua libre de vapor, proporcionando circulación adecuada y segura. La otra función es separar la humedad del vapor para asegurar que éste deje el domo extremadamente seco.

Los internos del domo de vapor son proyectados para realizar eficientemente ambas funciones, por medio de dos etapas de separación. La primera supe agua sin vapor al sistema circulatorio de la caldera y la segunda extrae las últimas partículas de agua e impurezas del vapor saturado.

Los internos son separadores tipo ciclón vertical, siguiendo por depuradores primarios, ubicados lateralmente al largo del domo y depuradores secadores secundarios, colocados al largo del eje superior del domo de vapor.

Estos secadores combinan los efectos de la baja velocidad del vapor y de los cambios bruscos en dirección de la trayectoria del flujo de vapor, con una superficie de gran área, en la cual se adhiere la humedad arrastrada por el vapor. Después de pasar por los internos, el vapor deja el domo extremadamente seco.

Para asegurar estanqueidad, los separadores son soldados en deflectores espaciadores, que también sirven para direccionar el flujo de vapor. Este grupo de internos del domo permite total acceso para la inspección o mantenimiento y al mismo tiempo proporciona una producción de vapor extremadamente seco.

El domo de vapor es equipado también con tuberías internas para distribuir el agua de alimentación, tubería para introducir los productos químicos y tubería para descarga continua.

El agua proveniente de la descarga continua es trasladada a través de tuberías para el vaso de descarga continua y el agua de la descarga de fondo es trasladada para el vaso de descarga de fondo.

El vapor saturado que deja el domo se dirige hacia el sobrecalentador, el cuál es formado por serpentinas tubulares instaladas en la parte superior del hogar.

Los elementos del sobrecalentador como tubos, cabezal y espaciadores de espesores y materiales son adecuados para las condiciones de presión y temperatura necesarias, calculados de acuerdo con las exigencias del Código ASME.

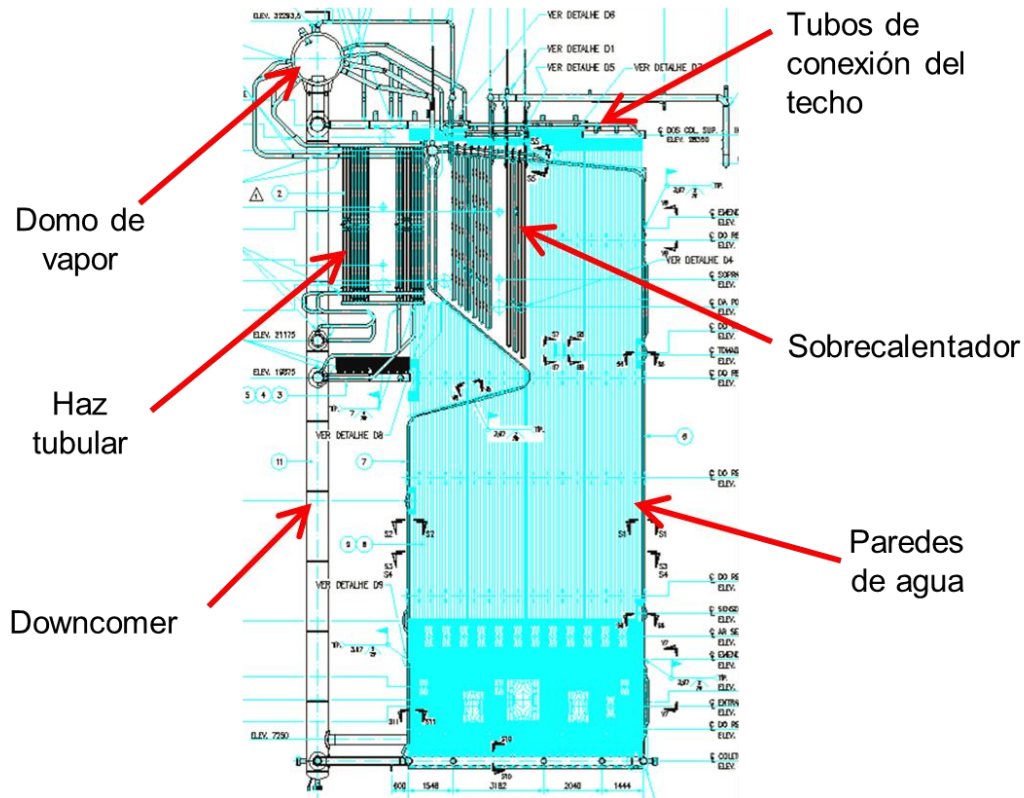


Ilustración 4. Esquema de agua y vapor

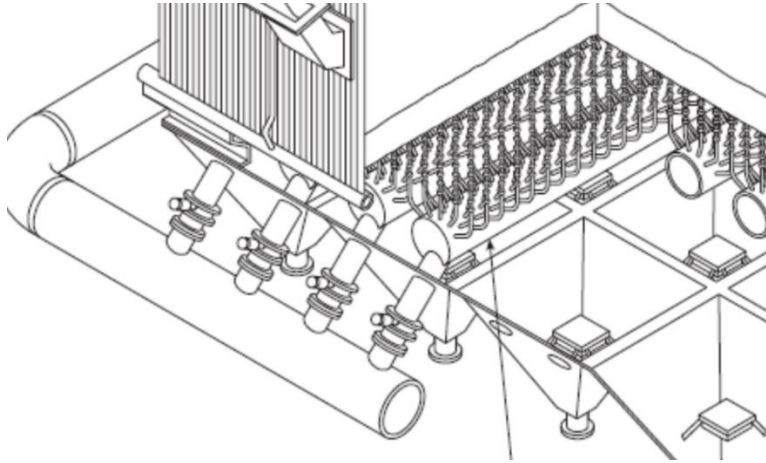
Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

### Sistema de aire y gases de combustión

Sistema de aire para la combustión

El aire de combustión proviene de los ventiladores de aire forzado, pasando por los calentadores de aire a vapor y precalentador a gas. Enseguida el aire es encaminado a través de los ductos a los colectores que contienen los boques de distribución al horno.

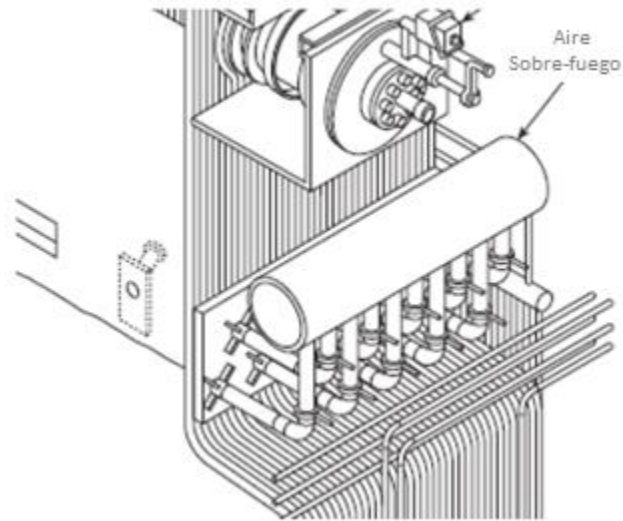




*Ilustración 5. Sistema de aire y gases de combustión*

*Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera*

El aire de sobre-fuego proviene del ventilador de aire de sobre-fuego, pasando por el calentador de aire a vapor y precalentador de aire a gas, es trasladado por medio de ductos a las boquillas del aire de sobre-fuego, instalados en las paredes laterales del hogar de la caldera, para los quemadores de arranque del lecho y para quemadores de carga.



*Ilustración 6. Transición de ductos a boquillas de aire de sobre-fuego*

*Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera*

El calentador de aire a vapor es un intercambiador de calor tipo concha y tubo, de tubos aleteados, con el vapor pasando por dentro de los tubos y el aire por fuera.

El calentador de aire a gas es del tipo tubular formado por un conjunto de tubos circulares, fijados en los espejos por medio de expender y cerrado por una cubierta de placa de acero carbono, con gases pasando por dentro de los tubos y aire por el lado de fuera.

Los tubos que forman la superficie de calentamiento del calentador de aire son de acero carbono y soldados por resistencia.

El sistema de aire de sobre-fuego (overfire), consiste en ductos, “dampers” y boquillas de acero inoxidable, distribuidos en las paredes laterales. La finalidad es introducir chorros de aire de alta presión, causando turbulencia en el interior del hogar y proporcionar combustión completa y disminución de hollín y humo cuando se produce la quema de bagazo de caña.

#### Sistema de gases de combustión

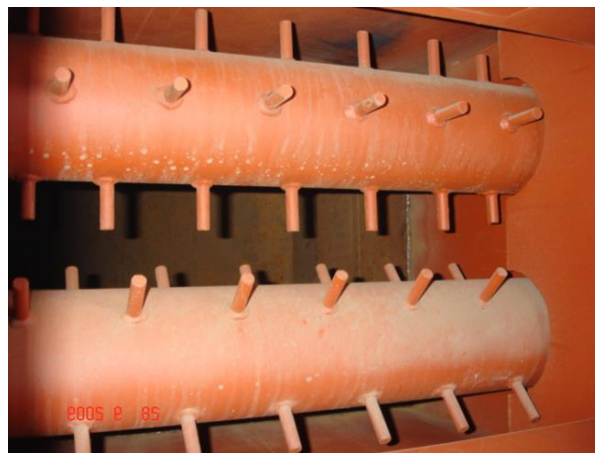
Los gases provenientes de la combustión salen de la cámara de combustión de la caldera, subiendo hasta la región superior del hogar y pasando enseguida por el sobrecalentador, por el haz tubular, economizador, calentador de aire a gases, en seguida por el lavador y al final pasan a través de ductos hacia la chimenea.

El sistema de gases tiene también un ventilador para recirculación de gases. Antes del lavador de gases y después del calentador de aire a gases es hecha una extracción de gases por medio de un ventilador de recirculación, pasando antes por un filtro de mangas. El ventilador de recirculación de gases es responsable de introducir gases en los colectores que contienen los bocales hacia el horno, de manera que se pueda controlar la temperatura del horno y mantener la presión del horno.

#### **Sistema de alimentación y quema de combustible**

El combustible es admitido en el sistema a través de un transportador de bagazo que descarga el bagazo sobre los alimentadores, los cuales tienen la función de dosificar la cantidad de combustible necesario para atender las necesidades de la caldera y ejecutar el sellado de aire manteniendo una columna permanente entre el transportador y el alimentador.

Los alimentadores dosificadores son del tipo doble tambor, constituidos básicamente de una estructura fija y dos tambores con revolución variable, dimensionados para introducir en el hogar una cantidad de combustible compatible con la demanda de vapor generado por la caldera.



*Ilustración 7. Alimentadores dosificadores*

Los alimentadores son construidos a partir de planchas de acero al carbono, con refuerzos con perfiles estructurales y dotados de soportes para fijar en la estructura de sustentación.

Cada alimentador es arrancado individualmente, a través de un motor con inversor de frecuencia, que es acoplado a un reductor, proyectado para trabajar en un rango de revoluciones adecuada a las necesidades de la caldera. La transmisión de un tambor al otro es hecha por medio de un par de engranajes.

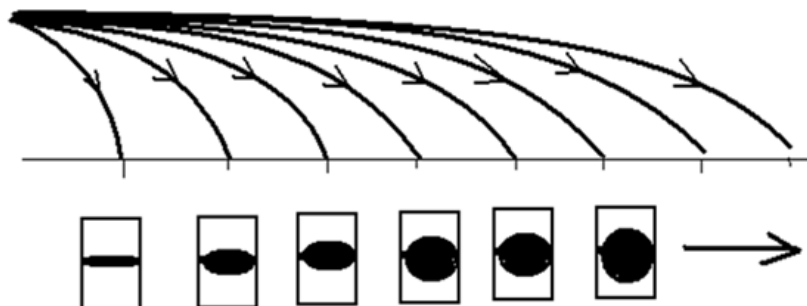
Los inversores de velocidad son comandados individualmente, a través de botones instalados en el panel de control o automáticamente y en sincronismo con el bucle de control de combustión. Para conectar los alimentadores con la caldera, son utilizadas tolvas de alimentación de combustible, las cuales son construidas en acero carbono, reforzadas donde es necesario.

El combustible sólido es distribuido en el hogar a través de los esparcidores neumáticos, para ser mezclado en el horno. Los esparcidores neumáticos son formados por una boquilla de aire instalada en la pared del hogar, inmediatamente debajo de cada tolva de alimentación de combustible.

Cada esparcidor tiene un “damper” rotativo motorizado, para controlar el flujo y la presión del aire, proporcionando una distribución uniforme de combustible sobre el horno. Para direccionar el flujo de combustible esparcido, es instalada en la base del conjunto esparcidor una bandeja controlada por un dispositivo especial, que distribuye el combustible exactamente sobre la región de quema.



*Ilustración 8. Tolvas de alimentación de combustible*



*Ilustración 9. Esquema de “damper” motorizado*

*Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera*

El aire necesario para el sistema proviene de los ventiladores de aire forzado.

### **Sistema de quema de Gas LP**

El sistema de quema de Gas LP se compone de cuatro quemadores de arranque instalados en la región del horno, que son utilizados para calentar el horno.

El Gas LP es admitido en el sistema y dirigido a través de tuberías a los medidores de caudal, para ser posteriormente dirigidos a los quemadores de arranque.

Cada quemador dispone de dos lanzas. Una de las lanzas es responsable por la quema del gas, mientras la segunda lanza es responsable por la llama piloto. Las tuberías son equipadas con accesorios como válvulas manuales, válvulas de control, trampas de vapor, manómetros, filtros, etc.

### **Sistema de extracción de cenizas**

Las cenizas de la caldera colectadas en las tolvas son removidas por medio seco, sin uso de agua, a través de tornillos y válvulas rotativas. El sistema es completo y detallado abajo:

Sopladores de hollín

El sistema de soplado es constituido por los siguientes sopladores:

sopladores de hollín de tipo rotativo retráctil, instalados en el sobrecalentador.

El sistema es completo, con las válvulas necesarias, tuberías de interconexión y accesorios, conforme lo requerido.

El material de las lanzas de los sopladores es adecuado para el rango de temperatura de trabajo en la región de soplado y las boquillas de pulverización están diseñadas de forma de proporcionar chorros de soplo, con elevada energía cinética y gran penetración.

El soplador de hollín tipo retráctil, está instalado en la región de temperaturas elevadas, sujetas a incrustaciones moderadas. El elemento de soplo permanece fuera de la caldera, siendo que, a través de su mecanismo, éste es insertado y retirado de la caldera durante el proceso de limpieza.



*Ilustración 10. Soplador de hollín*

### Tornillos de extracción de cenizas

El sistema de remoción/transporte de cenizas son accionadas por motorreductores de velocidad. Los ejes de los tornillos son enfriados internamente con flujo de agua continuo para soportar las temperaturas de la región donde son instalados.

Son instalados tornillos de cenizas en los siguientes puntos de la caldera:

- Tornillo en la tolva de descarga de cenizas del haz tubular.
- Tornillos en la tolva de descarga de cenizas del calentador de aire a gases.



*Ilustración 11. Sinfín transportador de cenizas*

### Válvulas rotativas

El sistema de extracción de cenizas posee dos válvulas rotativas, siendo ellas instaladas:

- Válvula en la descarga del tornillo de cenizas del haz tubular.
- Válvulas en la descarga de los tornillos de cenizas del calentador de aire a gases.

### Lavadores de Gases

Los gases formados en el proceso de combustión, después de pasar por todos los cambiadores de calor del conjunto de la caldera, se van en dirección a depurador húmedo, que en este caso es un lavador de gases. Antes de entrar en el lavador, los gases se aceleran cuando son forzados a pasar por un Venturi como se muestra en la ilustración 12. En la entrada del Venturi están ubicadas tuberías de agua limpia, conteniendo spray-balls, que son boquillas responsables por la pulverización de agua.

Mientras los gases son acelerados ellos van siendo humedecidos, se genera la transferencia del polvo de los gases para el agua. Cuando entran en la parte inferior del cuerpo cilíndrico del lavador como se muestra en la ilustración 12 a la derecha del esquema, los gases ganan movimiento circular ascendente, una vez que pasan a ser desplazada sobre la pared del lavador. Como consecuencia del movimiento circular surge una fuerza centrífuga que hace que partículas sólidas atrapadas en el agua choquen con la pared del lavador y disipen su energía, consecuentemente, precipitándose.

Las partículas más ligeras siguen la subida hasta que chocan con un cono localizado en la parte superior del lavador. Desde este punto, los gases son forzados a pasar por un área estrecha, resultante de la diferencia entre el diámetro interno del lavador y el diámetro externo del cono. Arriba de este cono existe una tubería de agua conteniendo spray-balls, que pulverizan agua sobre el mismo (intermitente). El agua que se precipita sobre el cono forma una cascada entre el cono y la pared del lavador, que es responsable de realizar un proceso de lavado de los gases además de lavar las paredes del lavador auxiliando en el proceso de precipitación de los particulados sólidos que puedan adherirse en la pared.

Los particulados que consiguen pasar por esta cascada, pasarán por un tercer proceso de lavado que se produce cuando los gases pasan por la cortina de agua que surge de la pulverización de agua sobre el cono. A través de este proceso, se garantiza una buena eficiencia en el proceso de eliminación de particulados sólidos arrastrados con los gases de combustión.

El agua de lavado en la salida del Lavador de Gases debe ser dirigida para un sistema de tratamiento de agua ceniza para poder ser reutilizada; los gases limpios en la salida del lavador son aspirados por los ventiladores de tiro inducido y salen por la chimenea.

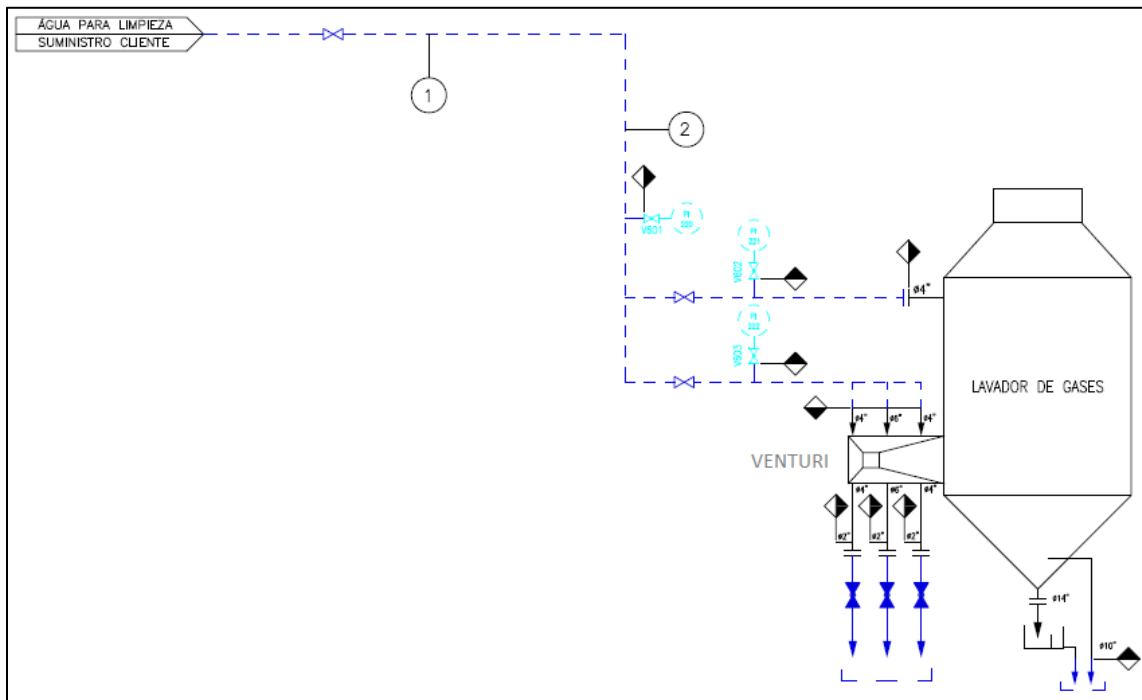


Ilustración 12. Diagrama de extracción de cenizas

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

## Sistema de arena

El sistema de arena es constituido por los siguientes equipos:

### Válvulas de descarga del lecho fluidizado

La tecnología de lecho fluidizado es un fenómeno físico que ocurre cuando una cantidad de arena se coloca en condiciones apropiadas para hacer que la mezcla sólida se comporte como un fluido. Esto generalmente se logra mediante la introducción de aire presurizado a través de la arena por medio de los “bubble caps” como se muestra en la ilustración 13. Esto da como resultado que el medio tenga muchas propiedades y características de los fluidos normales, como la capacidad de fluir libremente por gravedad. El fenómeno resultante se llama fluidización. Los lechos fluidizados se utilizan para la combustión de bagazo. Esta técnica también se está volviendo más común en los ingenios para la producción de vapor.

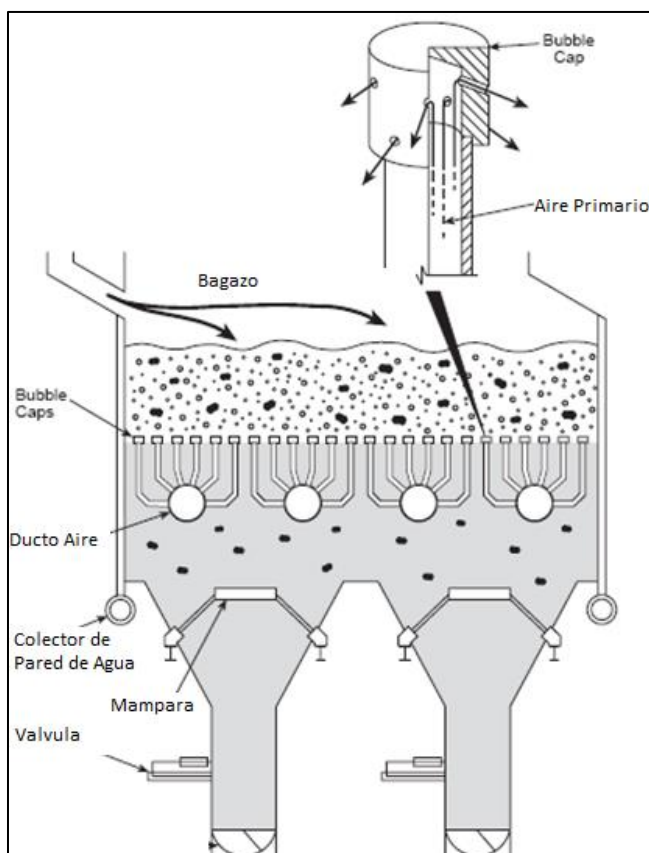


Ilustración 13. Diagrama de extracción de cenizas

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

Las válvulas de descarga del lecho son 24 Ilustración 14, siendo 12 de accionamiento manual por reductor y 12 de accionamiento automático, y son instaladas en cada tolva de descarga del lecho fluidizado.

El comando de las válvulas automáticas se hace por el panel de control en función de las necesidades de descargar arena del lecho en cada región.

Para permitir el mantenimiento estas válvulas automáticas, son instaladas válvulas manuales de bloqueo individualmente para cada una de las tolvas (conforme las 12 arriba mencionadas).



*Ilustración 14. Válvulas de descarga de lecho fluidizado*

#### Transportadores vibratorios de arena con cenizas

Son instalados 4 transportadores vibratorios de arena con cenizas, siendo 3 inmediatamente abajo de las válvulas de descarga del lecho y 1 para el transporte hasta el clasificador. Abajo del lecho, es instalado un transportador para cada grupo de 4 tolvas de descarga.



*Ilustración 15. Transportador vibratorio de arena*



#### Clasificador vibratorio de arena con cenizas

La arena con cenizas descargadas por las válvulas es transportada por vibración por los 4 transportadores vibratorios hasta un transportador vibratorio común, que contiene un tamiz clasificatorio en la extremidad de salida. La arena más delgada que pasa por los agujeros del tamiz y es descargada en un elevador de cangilones para volver a la caldera y la arena aglomerada, con granulometría mayor, que no pasa por los agujeros del tamiz, es descargada en el transportador vibratorio de rechazos del lecho fluidizado.

#### Transportadores vibratorios de rechazos del lecho fluidizado

Son 2 transportadores que reciben los rechazos que no pasaron por el tamiz clasificatorio y los descarga en un elevador de cangilones de rechazos.

#### Elevador de cangilones para arena

El elevador de cangilones recibe la arena clasificada y a través del movimiento de elevación, descarga la arena en la boquilla de entrada del hogar, permitiendo que esta arena vuelva para el lecho fluidizado.

#### Válvula rotativa para elevador de cangilones para arena

Entre el elevador de cangilones y la boquilla de entrada de arena en el hogar, es instalada una válvula rotativa de velocidad constante, para restringir el pasaje de los gases de combustión para el elevador de cangilones. También es instalada una válvula manual de bloqueo para permitir el mantenimiento de la válvula rotativa.

#### Silo de arena

El silo de arena es de formato rectangular con fondo cónico y almacena la arena utilizada para reposición de volumen del lecho fluidizado. La alimentación del silo es hecha a través de "Jumbos" de arena, que son elevados hasta las boquillas de entrada del silo y descargados por un operador. La descarga de la arena es por gravedad a través del fondo cónico del silo.

#### Válvula rotativa para silo de arena

Entre el silo y las tolvas donde arena es descargada en el hogar, son instaladas 2 válvulas rotativas de velocidad constante, para restringir el pasaje de los gases de combustión para el silo.

También son instaladas 2 válvulas manuales de bloqueo para permitir el mantenimiento de las válvulas rotativas y 2 válvulas manuales para operación de by-pass de las tuberías de alimentación de arena.

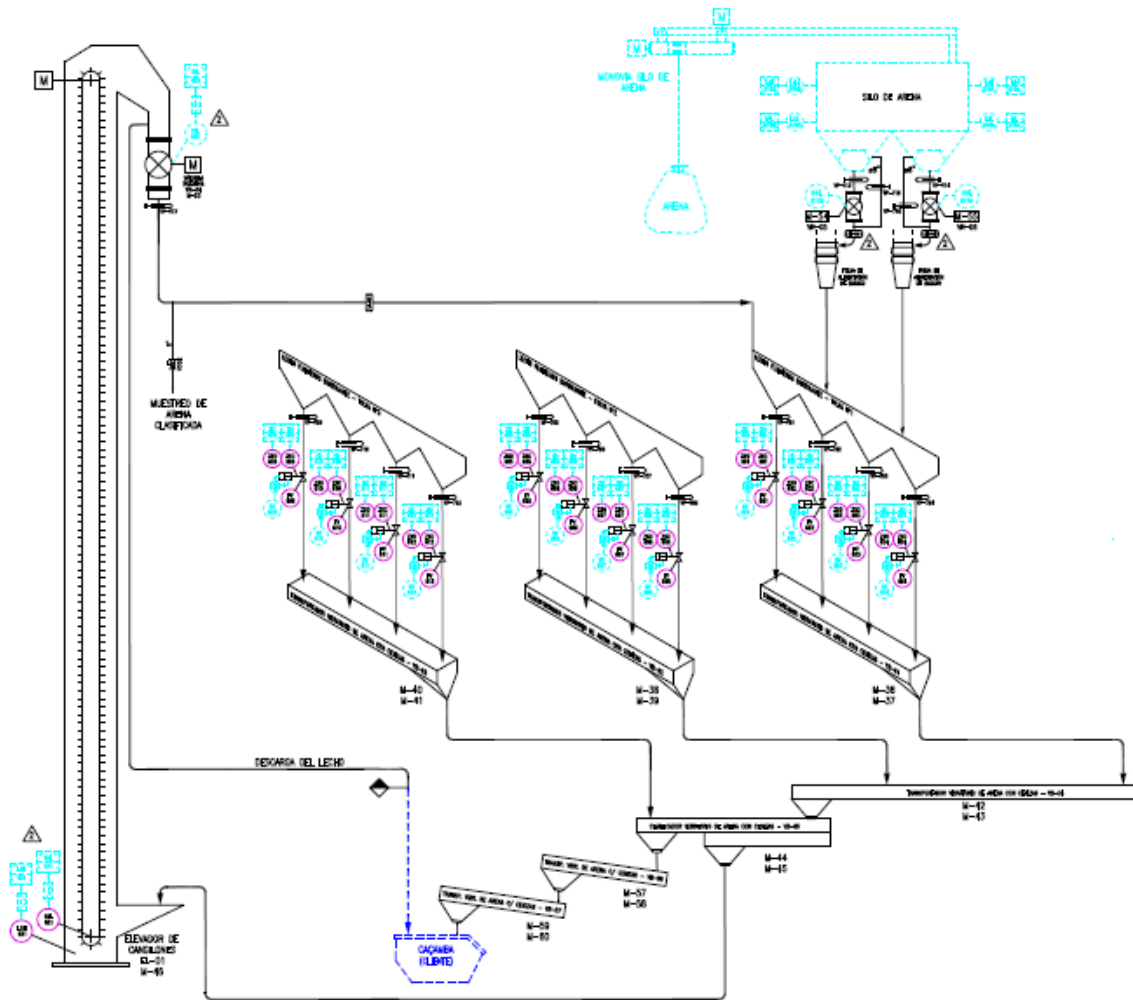


Ilustración 16. Diagrama de arena

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

#### 7.4. Descripción de problemas y oportunidades de mejora

Debido al contexto actual que se vive, en el cual la globalización posee la capacidad de mejorar algunos aspectos como la conectividad que afecta tanto a las personas como a las organizaciones, también se hace más fuerte la competencia entre las distintas industrias en todos los rubros a nivel mundial, por lo que las industrias se ven en la obligación de innovar en sus productos y procesos, buscar nuevos mercados y fortalecer los actuales, ser más competitivos y generar diferenciación. Por lo mismo, las empresas que ofrecen productos y servicios deben ser más eficientes y velar porque sus pedidos lleguen a tiempo al consumidor con la calidad comprometida y la cantidad solicitada por el cliente, de forma de fidelizarlos y lograr mantenerse vigentes en los mercados.

En el mismo entorno global, India y Brasil, una de las potencias más grandes a nivel mundial en cuanto los mercados y otros países, han logrado penetrar mercados en la mayoría de los mercados mundiales. Uno de esos mercados es la producción de azúcar, por lo tanto, Los ingenios en nuestro país se han visto en la obligación de gestionar sus costos operacionales, de mantenimiento y otros con la finalidad de ser competitivo a nivel local y mundial como una de las empresas con los precios más competitivos del azúcar y con la mejor calidad del mercado. Justamente por la gran competencia exterior, El Ingenio ha debido reorientar sus procesos y negocios, con lo que se ha debido diversificar con algunos productos, para dar mayor énfasis a otros potencialmente mejores para mantener la competitividad de la compañía con los escenarios indicados. Por consiguiente, es requerido implementar todas las herramientas a disposición de la organización y que lleven a cumplir los objetivos de los directores y gerentes.

La producción actual del Ingenio se centra en la producción de azúcar y generación de energía eléctrica, con lo cual la Caldera Bagacera, objeto del desarrollo del RCM, posee una alta criticidad dentro de la producción de azúcar y generación de energía eléctrica de la planta, ya que más del 85% de la fabricación total depende de este activo., Por lo mismo, aumentar su disponibilidad de operación es indispensable para dar cumplimiento a las distintas demandas del ingenio, disminuir los costos de mantenimiento por paradas no programadas y generar Estrategias de Mantenimiento acorde con los requerimientos operativos.

Al aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se consigue identificar y puntualizar las distintas fallas funcionales en componentes y subcomponentes del equipo y sus respectivos y más característicos modos de falla, con lo que se logra generar los Planes de Mantenimiento más idóneos para el activo físico en estudio y así alcanzar a aumentar la disponibilidad y confiabilidad esperada. RCM también puede orientar al equipo encargado del análisis a reconocer qué fallas son las que se originan, por qué se producen, cómo atacarlas, usando todo tipo de información disponible como por ejemplo a través del fabricante, distribuidores técnicos autorizados, operadores y mantenedores. Todos los actores indicados pueden aportar con sus experiencias y conocimientos a enriquecer la dinámica con la que se debe trabajar y enfocar este procedimiento.

La oportunidad de mejora presentada a través del RCM es utilizar este método y realizar el desarrollo en la Caldera Bagacera con un equipo multidisciplinario, quienes aporten con su experiencia y conocimientos a la toma de decisiones de la Gerencia del área a fin de implementar los Programas de Mantenimiento definidos a lo largo del análisis.

## 7.5. Limitaciones y alcances del proyecto

Los alcances del proyecto incluyen el diseño e implementación de la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el cual participa un grupo multidisciplinario del Ingenio y se llevan a cabo reuniones semanales, se revisan avances de compromisos acordados, se generan matrices de criticidad de cada componente y se proponen las Estrategias de Mantenimiento más convenientes para los equipos de mayor criticidad de la Caldera Bagacera.

Hacia el final del proyecto se debe evaluar la implementación del RCM para el equipo, el cual debe ser estudiado y estimado por la Superintendencia, por lo que este trabajo, si bien sigue todos los pasos del método RCM, para su puesta en marcha depende de aprobaciones y asignaciones de recursos, según el cronograma de implementación en el activo físico al cual es aplicado.

## 7.6. Normativa y leyes asociadas al proyecto

Existen diferentes formas de abarcar el método de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, en el cual no hay límites bien especificados de cuál debe ser el nivel de detalle a analizar y esto puede presentar un problema a la larga en el sentido de la cantidad de horas que dedique el equipo RCM a hacer los análisis de fallas funcionales y modos de falla en los distintos componentes del activo físico al que se desea abordar, por el contrario un nivel de detalle demasiado genérico puede otorgar una visión errónea del estudio llevado a cabo, lo que puede desembocar en definir una Estrategia de Mantenimiento que no sea la mejor.

Por otro lado, se debe tener un procedimiento en el cual enmarcar si verdaderamente se está aplicando el RCM o no, ya que se han implementado algunos otros procedimientos de trabajo similares, pero que no necesariamente puedan ser catalogados como un RCM. Para cumplir con estos márgenes es que se creó la Norma SAE JA 1011, la cual a través de algunos parámetros de pasos a realizar valida si la metodología RCM se estaría o no adaptando al equipo examinado. El RCM, según indica la norma SAE, debe responder a 7 preguntas y en el orden que se demuestra de la siguiente forma:

1. ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?
2. ¿De qué manera puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de la falla)?
5. ¿De qué manera afecta cada falla (consecuencia de la falla)?
6. ¿Qué se debe hacer para prevenir o predecir cada falla (tareas proactivas o intervalos de tareas)?
7. ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible (acciones predeterminadas)?

La serie de preguntas realizadas en secuencia debe ser respondida por el equipo RCM, el cual debe investigar con las distintas fuentes de información disponibles (fabricante, operadores,

mantenedores y máquinas de similares características en entornos operacionales comparables) con el fin de tomar las decisiones correctas en los futuros Programas de Mantenimiento a realizar y también aplicar la disciplina de la manera apropiada.

La Norma SAE JA 1011 fue emitida en agosto del año 1999, después fue profundizada más aún en su versión SAE JA 1012 emitida en enero del año 2002. En esta nueva versión se incorporaron algunos conceptos, definiciones y se logra de mejor forma el objetivo de estandarizar los procedimientos que se requieren para que un equipo de trabajo pueda definir su proceso como un real proceso RCM.

## 7.7 Identificación de problemas y oportunidades de mejora

Para llegar a la identificación de los problemas a resolver en este estudio, primero se dará a conocer el contexto general que juegan parte importante, como es la descripción del mantenimiento, RCM, la operación en el Ingenio y el activo físico la Caldera Bagacera objeto de análisis.

## 7.8 El mantenimiento y su historia en el Ingenio

El mantenimiento en el Ingenio ha ido en constante cambio conforme va avanzando el tiempo. Los cambios se deben a la gran variedad de nuevos y complejos activos físicos en el Ingenio, dichos transformaciones en el mantenimiento obligó a la organización a designar recursos para aumentar su confiabilidad y disponibilidad. Si se pudieran encontrar los argumentos para explicar por qué el mantenimiento del Ingenio es ahora más indispensable que hasta hace unos 30 o 40 años atrás, se podría decir que básicamente las expectativas de productos por parte de los consumidores, así como las expectativas de maquinarias con mayor disponibilidad por parte de los operadores han aumentado, lo que quiere decir que en la actualidad los usuarios de los activos físicos o maquinarias tienen mayores expectativas del tiempo en que deban las máquinas mantenerse operando sin fallar y la organización también posee más perspectivas del poder del mantenimiento del buen uso de recursos asignados para su gestión año a año.

En la actualidad las expectativas no sólo se enfocan a que las maquinarias funcionen, sean confiables y estén disponibles para la operación. También hay un importante foco antes no visualizado, el cual es tan o más importante que el anterior y es que si una máquina o proceso pudiera causar un problema de una cierta gravedad en su interacción con la seguridad y el medio ambiente, debe esto ser incluido en la gestión del mantenimiento y ser parte de las estrategias del corto, mediano y largo plazo.

Los cambios en los que se ha visto envuelto el mantenimiento, van en orden cronológico desde la Primera Generación, el cual se enmarca hasta los años de la Segunda Guerra Mundial y su contexto indica que no había demasiada industria mecanizada, por lo que el mantenimiento no era muy necesario, en consecuencia no había gestión alguna; En la Segunda Generación, durante la Segunda Guerra Mundial, empiezan los cambios debido al aumento de la demanda por bienes y servicios

para la guerra lo que llevó a un aumento en el uso de mecanización de algunas operaciones y consecuencia de aquello se inicia el uso en alguna medida de Mantenimiento Preventivo (aumento del costo de mantenimiento), en esta etapa se inicia una especie de dependencia de las máquinas y su disponibilidad asoma como un factor de importancia; La Tercera Generación, que abarca desde la década de los 70 hasta la actualidad, impulsa más aún las expectativas de mantenimiento y de la mano con las nuevas tecnologías promueven el uso de conceptos como Mantenimiento Predictivo, la preocupación constante por la seguridad y el medio ambiente y la importancia de gestionar de manera adecuada los recursos de mantenimiento en las organizaciones. Dentro de algunas de las formas de gestión del mantenimiento se encuentra el uso de la metodología llamada Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

### 7.9. El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

La industria de la aviación civil internacional fue la pionera en el uso de la metodología RCM aplicándolo en sus equipos, con lo que logró dar mayor confiabilidad a sus vuelos y conseguir una baja tasa de accidentabilidad, lo que desemboca en un incremento de sus márgenes debido a que los pasajeros fueron con mayor certidumbre a tomar sus viajes. En la década de los 80 el RCM empezó a extender su horizonte de aplicación y es así como se tomó a la industria como nuevo foco, en el cual las maquinarias requerían de un sistema que aplicado a ellos pudiera dar mayor capacidad operativa y disminuir la cantidad de fallas.

El Mantenimiento puede definirse como la forma de asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan. Con alguna diferencia el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad puede definirse como un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual. De la definición se puede desprender que el RCM va un poco más allá de la definición clásica del mantenimiento, ya que incluye conceptos propios que son la base de la metodología.

El RCM dentro de su proceso utiliza 7 preguntas básicas que se indican a continuación:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla al satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Las anteriores preguntas llevan a conocer las claves del procedimiento de RCM y que dan respuestas a los conceptos que se abordan para el análisis como son las Funciones y Parámetros de Funcionamiento, Fallas Funcionales, Modos de Falla, Efectos de Falla y Consecuencias de Falla.

Funciones: Las funciones de un activo físico son aquellas que el elemento posee y por el cual el Ingenio adquirió dicho activo, en el caso de la Caldera Bagacera, fue adquirida para la producción

de vapor. También se incluyen en este concepto los Parámetros de Funcionamiento, que son los que debe cumplir la maquinaria y que son los que los usuarios quieren que cumpla.

**Fallas Funcionales:** Una vez definida la función y su parámetro de funcionamiento, la falla funcional se define como la incapacidad del activo físico de cumplir la función para la cual se adquirió o realiza la función, pero debajo del nivel mínimo operacional esperado.

**Modos de Falla:** Es cualquier evento que cause una falla funcional, es decir, una pérdida de función del activo. Estos se deben describir de la mejor forma posible, pero también se debe tener cuidado en el grado de profundidad de la indagación de datos generada, de tal modo de no gestar información sin valor.

**Efectos de Falla:** Los efectos de falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla. Los analistas deben describir en qué forma se evidencia la falla para que los resultados de la metodología ataquen directamente y de manera más eficaz los efectos de falla.

**Consecuencias de Falla:** Las consecuencias de falla son aquellas que miden el nivel de importancia de los efectos de las fallas. Las consecuencias pueden ser perjudiciales para la seguridad (personas), el medio ambiente, la producción, calidad del producto, servicio al cliente, entre otras.

Los pasos seguidos en forma secuencial en la aplicación del RCM, lleva finalmente a conocer en qué forma puede fallar el activo físico y cuáles serían las consecuencias separadas por prioridades y nivel de gravedad. De esa forma se pueden asignar los medios económicos, los que irán dirigidos a sacar el mayor provecho posible, evitando los despilfarros y haciendo más eficiente el uso de recurso humano, insumos de mantenimiento, planificación, entre otros.

Las decisiones que se pueden tomar en cuanto a las estrategias de mantenimiento están dadas por las consecuencias de las fallas y los recursos asignados. Algunas de las estrategias que puede tomar la organización en la práctica pueden ser:

**Reacondicionamiento Cíclico:** El que consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independientemente de su condición en ese momento.

**Sustitución Cíclica:** El que consiste en descartar un elemento o componente antes o en el límite de edad definida, independientemente de su condición en ese momento.

**Tareas a condición:** Las que consisten en chequear si hay fallas potenciales a través del mantenimiento predictivo, para que se pueda actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional.

**Acciones a Falta de:** Las acciones a falta de, son las que se toman cuando en los casos de fallas de seguridad o medio ambiente no hay tareas proactivas que reduzcan en forma considerable y aceptable sus consecuencias, en este caso el rediseño es una acción a falta de.

Es sumamente relevante durante el proceso de ejecución RCM poder separar las fallas evidentes de las fallas ocultas. Las fallas evidentes son aquellas cuya falla eventual e inevitablemente se harán evidentes por sí solas a los operarios en circunstancias normales y esto ocurre a través de alarmas sonoras, consumo extra de energía, mala calidad del producto, humo, olores extraños, etc. Por otro

lado, también existen las fallas ocultas, las cuales no se hacen evidentes por sí solas a los operarios en circunstancias normales. En este último caso, se debe tener especial cuidado, ya que varias de las fallas en muchos activos físicos están relacionadas con fallas ocultas. Las fallas ocultas pueden también desembocar en consecuencias de seguridad, medioambientales, operacionales y no operacionales.

Conociendo las consecuencias de las fallas, se puede determinar según su clasificación si merece la pena realizar alguna tarea proactiva o de rediseño. Para el caso de los modos de falla con consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, solamente merece la pena realizar una tarea proactiva (reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica o tareas a condición) si esta reduce la probabilidad de falla a un nivel tolerablemente bajo, si no se da dicha condición es obligatorio aplicar la acción de rediseño. Por otro lado, si los modos de falla analizados tienen consecuencias operacionales (falla de producción, falla en la calidad del producto, falla en la entrega o servicio al cliente), solamente merece la pena realizar una tarea proactiva si a lo largo de un período de tiempo, cuesta menos que el costo de las consecuencias operacionales más el costo de reparar la falla que pretende evitar. Por último, para fallas no operacionales, solamente merece la pena realizar una tarea proactiva si en un período de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que pretende prevenir.

Para llegar a designar los recursos de mantenimiento a un proceso o activo físico determinado, primero se debe jerarquizar qué consecuencias de fallas tienen mayor prioridad en cuanto a su criticidad específica. Lo anterior se lleva a cabo después del análisis por parte del equipo de trabajo experto (operadores, mantenedores y facilitador), quienes con su experiencia, información proveniente de fabricante y otras fuentes de interés pueden definir cuáles consecuencias tendrían mayor preponderancia en el ámbito de seguridad, medio ambiental y operativo, finalmente dentro del proceso del RCM se completan las Hojas de Decisión, las cuales resumen las de Información ya generadas y otorgan las tareas a seguir con su valorización respectiva. A lo largo del desarrollo tanto de las Hojas de Información de fallas, fallas funcionales, modos de falla, criticidad y acciones, así como también en las Hojas de Decisión, el primer argumento a tomar en cuenta es el de la seguridad a las personas, seguido de los posibles daños al medioambiente o normativas medioambientales y finaliza el análisis con los problemas o contingencias operativas y no operativas con las que podría afectar un determinado tipo de falla en el activo objeto de estudio.

A continuación, se presenta el árbol lógico de decisión para las tareas de estrategias de mantenimiento del RCM, el cual presenta la gama de alternativas que se pueden tomar al aplicar la metodología al activo físico.

Tomando como base el modelo integral de gestión de mantenimiento y confiabilidad, alineado con la UNE 16646 (mantenimiento en la gestión de activos físicos), se pretende evaluar y analizar la actual gestión de mantenimiento del Ingenio a través de la auditoría AMORMS, la cual permitirá realizar la evaluación desde la perspectiva del modelo integral para conocer los puntos fuertes y débiles de la actual gestión de mantenimiento.

Luego de obtener y analizar los resultados, se pretende realizar un análisis de modo y efecto de fallos para aquellos equipos de la Caldera Bagacera que se definan como altamente críticos en la matriz de criticidad; también se aplicará un ACR a un evento de fallo a los equipos, con el fin de aplicar la metodología.



## 7.10 Auditoria AMORMS (Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey)

La optimización de la gestión de las técnicas a los procesos relacionados con el mantenimiento y la gestión de activos puede ser evaluada y medida mediante el análisis exhaustivo de factores. Estos factores en su conjunto constituyen la aportación de técnicas al sistema de producción. El procedimiento de evaluación es denominado como auditoría, puede definirse como una "revisión sistemática de una actividad". Es importante señalar, que no hay fórmulas simples para "medir" los diversos procesos de gestión, ni tampoco reglas fijas para todos los casos. Los resultados de las técnicas de auditorías aplicadas al diagnóstico de la eficacia del mantenimiento y de la gestión de activos, deben ayudar a mejorar la rentabilidad del sistema de producción y a disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones del propio proceso de gestión. Con los procesos de auditoría en las áreas de mantenimiento y gestión de activos, apoyados con la herramienta AMORMS (Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey) nos permitirá identificar las debilidades para poder enfocar esfuerzos y recursos en nuestro análisis de RCM.

## Capítulo 8 Metodología

A continuación, la ilustración 17. presenta la metodología propuesta para la implementación del RCM. Siguiendo el siguiente esquema:



Ilustración 17. Esquema para la implementación del RCM  
Fuente: Carlos Parra, *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*

El primer paso consiste en la Conformación del Equipo de Trabajo para la implementación del RCM correspondiente a la Fase 1 donde se definen responsabilidades alrededor de la caldera bagacera, el cual deberá estar conformado por un conjunto de personas de diferentes funciones de la organización que trabajan juntas en un período de tiempo determinado de la implementación, para analizar problemas que se puedan dar dentro de la caldera en los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.

Una vez que se ha seleccionado el Equipo de Trabajo y delimitado el área de los equipos que incluye la caldera bagacera y se conoce de forma general la importancia de cada uno de los equipos de la caldera, es necesario que los grupos de trabajo RCM definan el nivel de detalle que se requiere para realizar el análisis de los modos y efectos de fallos del área seleccionada. Al referirnos al nivel de detalle se plantean los siguientes niveles: Parte, Equipo, Sistema y Planta.

El siguiente paso será identificar todos los sistemas existentes con sus componentes en el área de la caldera bagacera y jerarquizar de acuerdo con la importancia y criticidad, cada uno de estos sistemas con sus partes respectivas.

Luego de definir las partes críticas de la caldera, procederemos con FMECA (Failure Mode Analysis and Effects), el cual constituye la herramienta principal del RCM, para la optimización de la gestión de mantenimiento en la caldera. El FMECA es un método sistemático que permite identificar los problemas antes que estos ocurran y puedan afectar o impactar en la operación de la caldera, bajo un contexto operacional.

Para poder cumplir con este objetivo, el Equipo de Trabajo RCM debe realizar el FMECA siguiendo la siguiente secuencia:

- Definir las funciones de las partes de la caldera y sus respectivos estándares de ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos o las consecuencias asociadas a cada modo de fallo.

Luego debemos conocer e identificar los estándares de ejecución asociados a las funciones de las partes de la caldera. El parámetro que permite especificar, cuantificar y evaluar de forma clara la misión de cada parte de la caldera con respecto a la función que según la confiabilidad de diseño o la capacidad de diseño es capaz el activo de cumplir.

Una vez realizado el FMECA, el Equipo de trabajo RCM, a partir del árbol lógico de decisión, deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo previamente identificado. Luego de seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la acción de mantenimiento a ejecutar asociada al tipo de actividad de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del RCM, es evitar o al menos reducir las posibles consecuencias a la seguridad humana, al ambiente y a las operaciones, que traerán consigo la aparición de los distintos modos de fallos.

Para finalizar nuestro trabajo de RCM, se diseñará el control de la gestión del mantenimiento el cual estará relacionado con tres indicadores básicos: disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

## Capítulo 9 Conformación del Equipo de Trabajo para la implementación del RCM alrededor de la caldera bagacera.

Formación del equipo natural de trabajo

Como primera fase es necesario la creación de un equipo natural de trabajo constituido por personas con distintas funciones dentro del ingenio que sean capaces de responder entre todos las preguntas generadas por el personal de operación para el funcionamiento deseado de la caldera bagacera en cuanto a las consecuencias y efectos de fallos.

Grupo Multidisciplinario:

- Superintendente de Ingenio (Visión global del proceso)
- Planeador de mantenimiento (Programador del sistema de mantenimiento)
- Operador de caldera bagacera (Experto en el manejo y la operación)
- Encargado de mantenimiento caldera bagacera (Experto en reparación y mantenimiento)
- Encargado de instrumentación (Especialista en programación e instrumentación)
- Encargado eléctrico (Especialista en potencia y área eléctrica)
- Facilitador (Asesor metodológico, experto en RCM)

El objetivo del grupo multidisciplinario es usar la metodología RCM para determinar las necesidades de mantenimiento de la caldera bagacera. Se debe garantizar la interacción y participación de todos para poder abordar todos los aspectos de toda la caldera, en una discusión relajada y sin jerarquías donde se escuche a todo el grupo y sin miedo a exponer todas las situaciones. Todas las medidas deben de ser aceptadas por el equipo multidisciplinario. El facilitador debe guiar y conducir el proceso de implementación del RCM de forma ordenada y efectiva.

Actividades del facilitador:

- Programación de las reuniones del equipo multidisciplinario.
- Guiar al equipo de trabajo en la realización del análisis de los modos y efectos de fallos.
- Identificar los activos que deben ser analizados bajo la metodología RCM.
- Realizar consenso en las decisiones.
- Recolectar toda la documentación durante el proceso de implementación del RCM y sea conducida correctamente.

## Capítulo 10 Resultado Auditoria AMORMS

La idea de aplicar la auditoria es evaluar el estado actual de la efectividad del mantenimiento desde la perspectiva del modelo integral de mantenimiento, segmentando las 8 fases para evaluarlas por separado. Considerando los resultados, y que la implementación de las fases es secuencial, se puede observar que los mejores resultados se encuentran en las primeras 3 etapas del modelo, lo cual significa que ya se tiene una buena base que permitirá la mejora de las fases restantes, de las cuales se debe prestar especial atención a la fase 5: “asignación de recursos, soporte informático y logístico” y la fase 7: proceso de Análisis del Costo del Ciclo de vida “LCC”.

Tras aplicar la auditoria AMORMS a 10 personas de diferentes áreas (Gerencia, mantenimiento, producción, operación, planificación y proyectos), se obtuvieron los siguientes resultados:

No	Fase	Puntuación
1	Gestión de Activos, KPI's y organización de soporte	3.2
2	Modelos de Jerarquización basados en Riesgo	3.3
3	Análisis de problemas (manejo de fallas)	3.8
4	Procesos de programación y planificación	2.8
5	Procesos de asignación de recursos, soporte informático y logístico	1.5
6	Procesos de control y análisis de indicadores técnicos RAM	2.6
7	Proceso de análisis de costos de ciclo de vida	1.6
8	Procesos de revisión y mejora continua	2.7

Tabla 1. Puntuación de fases evaluadas

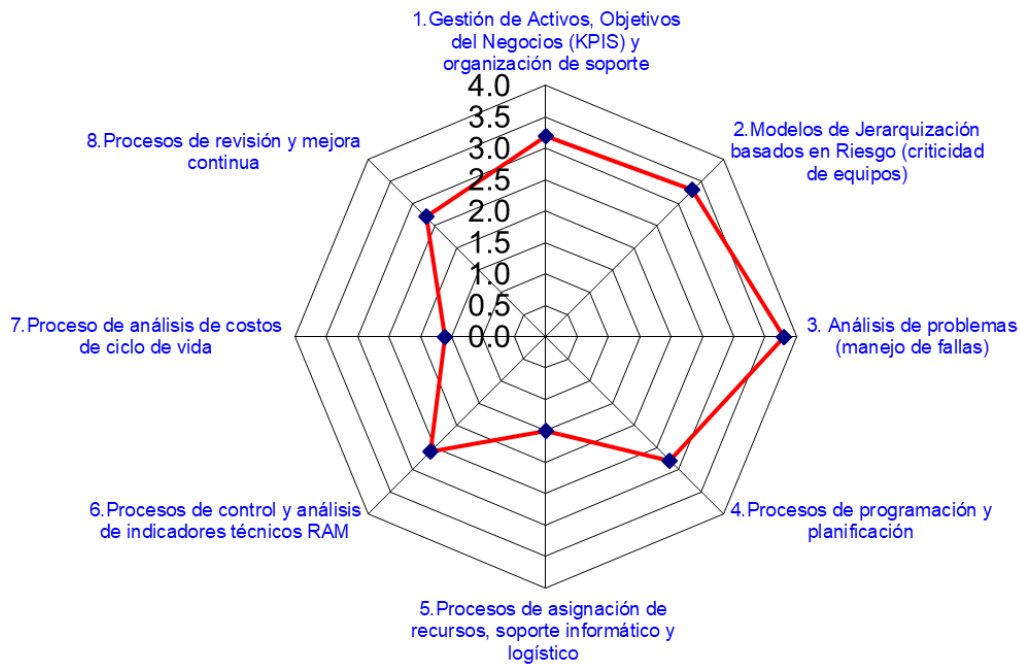


Ilustración 18. Diagrama radar de resultados de auditoria AMORMS

## Capítulo 11 Matriz de criticidad

Se tomará el total de equipos en la Caldera Bagacera para el análisis. A continuación, se presenta los criterios de evaluación, los cuales han sido alineados de acuerdo con los objetivos organizacionales, con los que se evaluará la matriz de criticidad para la Caldera Bagacera:

Descripción de criticidades:

VARIABLE		DESCRIPCIÓN	Grupo 1		Grupo 2	
EQUIPO	E1	Tipo máquina	Motores, Tableros, Intercambiadores de Calor, Filtros, Medidores	10	Ventiladores, Torres de Enfriamiento, Tableros, Transmisores, Tanques	15
EQUIPO	E2	Potencia (kW ó CV)	< 30 kW	5	30 < 100	15
EQUIPO	E3	RPM	< 100	30	100 < 1200	10
EQUIPO	E4	Temperatura (°C)	< Ambiente	25	Amb. < 90	5
EQUIPO	E5	Número de ejes	Ninguno	0	1 ó 2	15
EQUIPO	E6	Entorno	Normal	0	Sumergido	15
PROCESO	P1	Tipo proceso	Reacción	20	Serial	30
PROCESO	P2	Tipo producto	Líquido	20	Sólido	20
PROCESO	P3	Variable Técnica predominante	Presión	20	Temperatura	15
OPERATIVA	O1	Tipo producción	Continuo	35	Batch	15
OPERATIVA	O2	Funcionamiento	24/7	40	<3,500 horas/año	25
OPERATIVA	O3	Pérdida de Calidad	75 a 100%	40	50 a 75%	30
OPERATIVA	O4	Equipo de Respaldo	Ninguno	40	1	30
OPERATIVA	O5	Indisponibilidad (por fallas)	> 4/Zafra	40	3 a 4/Zafra	25
ECONÓMICO	C1	Precio equipo (k\$)	<5	0	5 < 10	10
ECONÓMICO	C2	Coste por relantización / día (k\$)	< 1	0	1 < 5	10
ECONÓMICO	C3	Coste indisponibilidad / día (k\$)	< 5	0	5 < 25	10
MANTENIBILIDAD	M1	Recambios	Baja intercambiabilidad	35	Alta intercambiabilidad	30
MANTENIBILIDAD	M2	Tipo mantenimiento	Proactivo	0	Predictivo	5
SOSTENIBILIDAD	S1	Impacto a la Inocuidad	Alto Impacto a los Puntos Críticos	40	Sensible, difícil de controlar	30
SOSTENIBILIDAD	S2	Impacto al Medio Ambiente	Alto	40	Sensible	30
SOSTENIBILIDAD	S3	Seguridad Industrial	Muerte	50	Lesión incapacitante	40

Tabla 2. Descripción de variables de matriz de criticidad

Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
Bombas, Centrifugas, Transformadores, Equipos Acarreo, Sistemas de Tratamiento de Líquidos	20	Reductores de Velocidad, Sistema Hidráulico, Neumático (compresores) o de gas, Subestaciones, DCS's	25	Turbogeneradores, Calderas, Preparadores de Caña, Molinos, Transportadores, Variadores de Frecuencia, Arrancadores y Protecciones	30
100 < 300	20	300 < 1000	25	> 1000	35
1200 < 2000	10	2000 < 4000	20	> 4000	30
90 < 200	10	200 < 600	20	> 600	40
3 ó 4	20	5	30	> 5	35
Altura	20	Explosivo	25	Tóxico	35

Paralelo	15	Transformación	20	Logístico	15
Gaseoso o Vapor	35	Tóxico o Corrosivo	15	Químico	15
Viscosidad	10	Pureza	25	Humedad	30

Bajo demanda	20	Contra stock	15	Otro	15
<2,500 horas/año	20	<1,500 horas/año	10	< 500 horas/año	5
25 a 50%	20	0 a 25%	10	Ninguna	0
2	20	3	10	>3	0
2 a 3/Zafra	20	1 a 2/Zafra	15	<1/Zafra	5

10 < 100	15	100 < 1000	25	> 1000	50
5 < 15	20	25 < 50	30	> 50	40
25 < 50	20	50 < 100	30	> 100	40

Plazo entrega largo	20	Corto plazo de entrega	10	Manejable con alternativas	5
Preventivo	20	Correctivo	30	Aflictivo	45

Controlable	20	Sin incumplimiento a normas	10	No genera ningún impacto	0
Afectación controlable	20	Sin repercusión sobre normativa legal	10	No genera ningún impacto	0
Daños menores a la integridad Física	30	Sin incumplimiento a LGPRLT y sus reglamentos	20	No genera ningún impacto	0

Tabla 3. Ponderación de variables

MÁQUINA POR FUNCION	Código del o los equipos agrupados por función	E1	E2	E3	E4	E5	E6	P1	P2	P3	O1	O2	O3	O4	O5	C1	C2	C3	M1	M2	S1	S2	S3	CRITICIDAD
		Tipo máquina Potencia (kW ó CV)	RPM	Temperatura (eC)	Número de ejes	Entorno	Tipo proceso	Tipo producto	Variable técnica predominante	Tipo producción	Funcionamiento	Pérdida de Calidad	Equipo de Respaldo	Indisponibilidad (por fallas)	Precio equipo (k\$)	Coste por ralentización / día	Coste indisponibilidad /	Recambios	Tipo mantenimiento impacto a la Inocuidad	Impacto al Medio Ambiente Seguridad Industrial				
<b>Caldera Bagacera de Lecho Fluidizado Burbujeante</b>	<b>(CDR-21005)</b>																							
Horno de Caldera		1	5	0	5	1	4	4	3	1	1	1	1	1	3	5	5	5	3	3	4	1	1	111.00
Tuberías de paredes de agua		1	5	0	5	1	4	4	3	1	1	1	1	1	3	5	5	5	3	3	4	1	1	111.00
Sobrecalentador		1	5	0	5	1	4	4	3	1	1	1	1	1	3	5	5	5	3	3	4	1	1	111.00
Haz Tubular		1	5	0	5	1	4	4	3	1	1	1	1	1	3	5	5	5	3	3	4	1	1	111.00
Lecho de arena																								
Toberas del lecho		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #1 (FV-601)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #2 (FV-602)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #3 (FV-603)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #4 (FV-604)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #5 (FV-605)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #6 (FV-606)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #7 (FV-607)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #8 (FV-608)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #9 (FV-609)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #10 (FV-610)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #11 (FV-611)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvula de descarga de arena del lecho #12 (FV-612)		3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	4	2	1	1	1	3	5	5	5	55.25
Válvulas de bloqueo bocales aire sobre fuego																								
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #1 (lado izquierdo) (FV-416)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #2 (lado izquierdo) (FV-417)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #3 (lado izquierdo) (FV-418)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #4 (lado izquierdo) (FV-419)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #5 (lado izquierdo) (FV-420)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #6 (lado izquierdo) (FV-421)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #7 (lado derecho) (FV-422)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #8 (lado derecho) (FV-423)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #9 (lado derecho) (FV-424)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #10 (lado derecho) (FV-425)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #12 (lado derecho) (FV-427)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Válvula bloqueo bocales aire sobre fuego #11 (lado derecho) (FV-426)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	5	5	5	56.75
Valvulas de linea de agua y vapor																								0.00
Válvula de control de agua alimentación (FCV-200)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula de nivel tanque de purga continua (LCV-240)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula control del nivel del condensado (LCV-190)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula de descarga de fondo (XV-250)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula de drenaje de los sopladores de hollín (TV-312)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula de control descarga continua caldera HPB (HV-200)		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Válvula principal de vapor		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Valvula bypass de principal de vapor		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Valvula de seguridad 1 de domo		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Valvula de seguridad 2 de domo		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Valvula de seguridad de sobrecalentador		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Valvulas de venteo		3	0	0	4	1	4	4	3	1	1	1	1	1	5	3	5	5	2	3	4	3	2	89.75
Lavador de gases de caldera	(LVG-21005)	5	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	4	3	5	5	1	3	4	4	2	93.50
Presión de los gases después de "wet scrubber" (PIT-505)		5	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	4	3	5	5	1	3	4	4	2	93.50



Pre calentador de aire de caldera 5 (PCA-21005)	1	1	1	3	1	1	2	3	2	1	1	1	1	4	3	3	3	1	3	4	4	2	81.50	
Presión de los gases después del pre calentador a gas (PIT-504)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión del aire forzado después pre aire a gas (PIT-403)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión del aire de sobre fuego después del pre aire a gas (PIT-413)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión aire forzado antes del pre calentador a vapor (PIT-400)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión aire sobre fuego antes del pre calentador a vapor (PIT-410)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión aire forzado después del pre calentador a vapor (PIT-401)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión aire sobre fuego después del pre calentador a vapor (PIT-411)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	77.00	
Presión del condensado de los pre calentadores de aire a vapor (PIT-190)	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	75.50	
Válvula de control temperatura del preaire a vapor #1 (TCV-402)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	4	2	3	3	1	3	5	5	3	75.00
Válvula de control temperatura del preaire a vapor #2 (TCV-412)	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	4	2	3	3	1	3	5	5	3	75.00
Transmisores de Presión y Flujo de la Caldera																							0.00	
Transmisor de presión de hogar #1 (PIT-500A)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	4	1	5	2	4	4	3	3	3	3	2	81.75	
Transmisor de presión de hogar #2 (PIT-500B)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	4	1	5	2	4	4	3	3	3	3	2	81.75	
Presión de los gases de salida de la caldera (PIT-501)	2	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	2	1	1	2	3	3	2	3	70.25	
Presión de vapor para los sopladores de hollín (PIT-310)	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	5	1	5	2	5	5	1	3	4	4	1	82.50	
Presión del domo de vapor (PIT-204)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	4	1	5	2	4	4	3	3	3	3	2	81.75	
Presión vapor en la salida de sobrecalentado secundario (PIT-300)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	4	1	5	2	2	1	3	3	3	2	2	73.75	
Presión de los gases recirculación la salida del ventilador (PIT-520)	2	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	4	1	4	2	1	1	2	3	3	2	3	70.25	
Presión de agua de alimentación de la caldera (PIT-200)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	5	2	5	5	2	3	4	4	1	91.25	
Presión estación reductora 1500 a 900 psi (PIT-192)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	3	1	5	2	5	5	1	3	4	4	1	88.00	
Transmisor de flujo - vapor sobrecalentado de la caldera (FIT-300)	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	5	1	4	4	3	3	4	4	2	79.75	
Temperatura de manifold de 1500 a 900 psi (TIT-192)	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	5	2	4	4	3	3	4	4	4	77.75	
Analizador de conductividad de purga continuada (CIT-250)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	4	1	2	4	3	5	5	2	2	3	3	3	79.50	
Transmisor caudal de aire fluidización del lecho a (FIT-404A)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	4	1	2	4	3	5	5	2	2	3	3	3	79.50	
Transmisor caudal de aire fluidización del lecho b (FIT-404B)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	4	1	2	4	2	2	2	2	2	3	3	3	66.50	
Transmisor de caudal de aire esparcidores neumáticos #1 (FIT-420A)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	4	1	2	4	2	2	2	2	2	3	3	3	66.50	
Transmisor de caudal de aire esparcidores neumáticos #2 (FIT-420B)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	1	1	1	5	1	2	2	4	3	4	4	3	65.75	
Flujo de aire combustión para quemador de partida #1 (FIT-416A)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	1	1	2	5	1	2	2	4	3	4	4	3	63.75	
Flujo de aire de combustión para quemador de partida #3 (FIT-416C)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	1	1	2	5	1	2	2	4	3	4	4	3	63.75	
Flujo de aire de combustión para quemador de partida #4 (FIT-416D)	2	1	1	3	1	1	2	1	2	1	1	5	1	1	2	1	2	1	3	3	3	4	70.75	
Transmisor de flujo - condensado para sobrecalentador (FIT-208)	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	5	1	4	4	3	3	4	4	2	79.75	
Transmisor flujo condensado para tanque descarga continua (FIT-250)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	2	5	1	4	4	3	3	4	4	2	79.25	
Transmisor de flujo de gas de recirculación #1 (FIT-521A)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	2	5	1	4	4	3	3	4	4	2	79.25	
Transmisor de flujo de gas de recirculación #2 (FIT-521B)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	1	5	1	4	4	3	3	4	4	2	81.25	
Flujo de condensado - calentadores de aire (cav-01 y cav-02) (FIT-190)	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	5	2	5	5	2	3	4	4	3	85.25	
Transmisor de flujo - agua alimentación de la caldera (FIT-200)	2	1	1	3	1	3	2	1	2	1	1	5	1	5	1	1	1	2	3	4	3	4	60.00	
Transmisor de nivel de vaso de descarga continua (LIT-240)	2	1	1	3	1	3	2	1	2	1	1	5	2	5	1	1	1	2	3	4	3	3	60.00	
Transmisor de nivel #1 - domo de vapor de la caldera (LIT-200A)	2	1	1	3	1	3	2	1	2	1	1	5	2	5	1	1	1	2	3	4	3	3	60.00	
Transmisor de nivel #2- domo de vapor de la caldera (LIT-200B)	2	1	1	1	1	3	2	3	2	1	1	5	1	5	1	1	1	2	3	4	4	4	61.75	
Nivel del tanque de condensado de los calentadores de aire (LIT-190)	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	5	1	5	2	5	5	2	3	2	2	3	85.25	
Presión diferencial #1 del lecho fluidizado (PDIT-405A)	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	5	1	5	2	5	5	2	3	4	4	4	71.75	
Presión diferencial #2 del lecho fluidizado (PDIT-405B)	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	5	1	5	2	5	5	2	3	4	4	4	71.75	
Presión diferencial #3 del lecho fluidizado (PDIT-405C)	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	5	1	5	2	5	5	2	3	4	4	4	71.75	
Presión diferencial #4 del lecho fluidizado (PDIT-405D)	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	5	1	5	2	5	5	2	3	4	4	4	71.75	

Desaireador caldera HPB (DRD-21003)		5	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	4	3	5	5	1	3	4	4	2	<b>93.50</b>
Presión del desaireador (PIT-100)		2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	4	2	3	3	1	3	5	5	3	<b>75.50</b>
Remota 5 desaireador caldera HPB (GCT-21013)		5		1	1	1	1	2	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	<b>69.00</b>
Bomba titular de condensado de radiador a desaireador a HPB (BMB-21060A)		3			2	2	1	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>64.50</b>
Arrancador motor de bomba titular de condensado de radiador a desaireador a HPB (ARC-21163)		5		1	1	1	1	2	2	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	2	4	4	2	<b>69.00</b>
Motor de bomba titular de condensado de radiador a desaireador a HPB (MTR-21204)		5			2	2	1	2	2	2	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>65.50</b>
Presión vapor extracción para desaireador de precalentadores (PIT-191)		2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	<b>77.50</b>	
Transmisor de flujo del vapor de extracción para desaireador (FIT-100)		2	1	1	3	1	3	2	3	1	1	3	1	3	2	3	3	2	3	2	2	3	<b>87.00</b>	
Medidor flujo del vapor extracción para desaireador / pre calentador (FIT-191)		2	1	1	3	1	3	2	3	1	1	3	1	3	2	3	3	2	3	2	2	3	<b>87.00</b>	
Transmisor de nivel #1 del desaireador (LIT-100A)		2	1	1	1	1	3	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	3	2	2	3	<b>83.75</b>	
Transmisor de nivel #2 del desaireador (LIT-100B)		2	1	1	1	1	3	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	3	2	2	3	<b>83.75</b>	
Válvula de agua desmineralizada para desaireador #1 (LCV-100A)		3	1	1	2	1	3	2	1	1	1	5	2	5	2	3	5	2	3	2	2	2	<b>82.50</b>	
Válvula de "over flow" del desaireador para estanque reposición (LCV-110)		3	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	5	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>71.00</b>	
Válvula de agua desmineralizada para desaireador #2 (LCV-100B)		3	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	5	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>71.00</b>	
Válvula de presión del desaireador caldera HPB (PCV-100)		3	1	1	2	1	1	2	3	1	1	5	5	5	3	5	5	1	3	2	2	1	<b>82.75</b>	
Bomba principal de condensado de radiador a desaireador a HPB (BMB-21060A)		3			2	2	1	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	<b>64.50</b>	
Arrancador motor de bomba respaldo 1 de condensado de radiador a desaireador a HPB (ARC-21205)		5		1	1	1	1	2	2	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	<b>69.00</b>	
Motor de bomba respaldo 1 de condensado de radiador a desaireador a HPB (MTR-21205)		5			2	2	1	2	2	2	1	4	2	4	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>65.50</b>	
Bomba respaldo 1 de condensado de radiador a desaireador a HPB (BMB-21060B)		3			2	2	1	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	3	4	4	2	<b>64.50</b>	
Arrancador motor de bomba respaldo 1 de condensado de radiador a desaireador a HPB (ARC-21205)		5		1	1	1	1	2	2	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	<b>69.00</b>	
Motor de bomba respaldo 1 de condensado de radiador a desaireador a HPB (MTR-21205)		5			2	2	1	2	2	2	1	4	2	4	2	2	2	2	2	3	4	4	<b>65.50</b>	
Ventilador de tiro forzado 1 caldera 5 (VTF-21007)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	1	2	4	4	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador de tiro forzado 1 caldera HPB (ARC-21163)		5	3	1	3	1	1	2	2	2	1	2	1	3	1	5	5	2	2	4	4	2	<b>86.25</b>	
Motor de ventilador de tiro forzado 1 caldera HPB (MTR-21163)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	2	1	3	3	5	5	2	2	4	4	2	<b>84.75</b>	
Presión del aire forzado para esparcidores neumáticos #1 (PIT-420A)		2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>73.25</b>	
Presión del aire forzado para fluidización del lecho #1 (PIT-404A)		2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>73.25</b>	
Presión del aire forzado para esparcidores neumáticos #2 (PIT-420B)		2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>73.25</b>	
Actuador de dámetro de aire forzado para fluidización del lecho #1 (FCV-404A)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>71.00</b>	
Actuador de dámetro del ventilador de aire forzado #1 (válvula) (PCV-403A)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>71.00</b>	
Ventilador de tiro forzado 2 caldera 5 (VTF-21008)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	1	2	4	4	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador de tiro forzado 2 caldera HPB (ARC-21164)		5	3	1	3	1	1	2	2	2	1	2	1	3	1	5	5	2	2	4	4	2	<b>86.25</b>	
Motor de ventilador de tiro forzado 2 caldera HPB (MTR-21164)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	2	1	3	3	5	5	2	2	4	4	2	<b>84.75</b>	
Presión del aire forzado para fluidización del lecho #2 (PIT-404B)		2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>73.25</b>	
Actuador de dámetro - aire forzado para fluidización del lecho #2 (FCV-404B)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>71.00</b>	
Actuador de dámetro del ventilador de aire forzado #2 (válvula) (PCV-403B)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>71.00</b>	
Ventilador tiro inducido 1 caldera HPB (VTI-21006)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	3	3	5	3	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador tiro inducido 1 caldera HPB (ARC-21160)		5	3	1	3	1	1	2	2	2	1	2	1	3	1	5	5	2	2	4	4	2	<b>86.25</b>	
Motor de ventilador tiro inducido 1 caldera HPB (MTR-21160)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	2	1	3	5	5	1	3	5	5	3	<b>85.75</b>		
Ventilador tiro inducido 2 caldera HPB (VTI-21007)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	3	3	5	3	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador tiro inducido 2 caldera HPB (ARC-21161)		5	3	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	1	2	5	5	2	3	5	5	3	<b>86.75</b>	
Motor de ventilador tiro inducido 2 caldera HPB (MTR-21161)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	4	1	1	3	5	5	1	3	5	5	3	<b>81.75</b>	
Ventilador fuel gas recirculación (VTI-21008)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	3	3	5	3	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador fuel gas recirculación (ARC-21166)		5	3	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	3	2	5	5	3	2	5	5	2	<b>81.00</b>	
Motor de ventilador fuel gas recirculación(FGR) (MTR-21166)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	4	1	3	3	2	2	3	2	5	5	2	<b>63.25</b>	
Actuador de dámetro del ventilador FGR (válvula) (PCV-520)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>67.00</b>	
Ventilador de sobre fuego 1 caldera HPB (VTS-21005)		2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	3	3	5	5	3	3	5	3	2	<b>89.00</b>	
Arrancador motor de ventilador de sobre fuego 1 caldera HPB (ARC-21165)		5	3	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	3	2	5	5	3	2	5	5	2	<b>81.00</b>	
Motor de ventilador de sobre fuego 1 caldera HPB (MTR-21165)		1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	4	1	3	3	2	2	3	2	5	5	2	<b>63.25</b>	
Transmisor caudal para los bocales de aire sobre fuego a (FIT-415A)		2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	4	1	2	2	2	2	3	3	5	5	3	<b>67.25</b>	
Presión del aire sobre fuego para bocas sobre fuego #1 (PIT-415A)		2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	4	1	2	2	2	2	3	3	5	5	3	<b>67.25</b>	
Actuador de dámetro #1 de bocales de aire de sobre fuego (FCV-415A)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>67.00</b>	
Actuador de dámetro del ventilador de aire sobre fuego #1 (válvula) (PCV-413A)		1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	4	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	<b>67.00</b>	

Ventilador de sobre fuego 2 caldera HPB (VTS-21006)	2	3	3	3	2	1	2	3	1	1	1	2	1	3	3	5	5	3	3	5	3	2	89.00
Arrancador motor de ventilador de sobre fuego 2 caldera HPB (ARC-21162)	5	3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	5	5	3	2	5	5	2	81.00
Motor de ventilador de sobre fuego 2 caldera HPB (MTR-21162)	1	3	3	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	3	2	2	3	2	5	5	2	63.25
Transmisor caudal para los bocales de aire sobre fuego b (FIT-415B)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	4	1	2	2	2	2	3	3	5	5	3	67.25
Presión del aire sobre fuego para bocas sobre fuego #2 (PIT-415B)	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	4	1	2	2	2	2	3	3	5	5	3	67.25
Actuador de dämper #2 - bocales de aire de sobre fuego (FCV-415B)	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	67.00
Actuador de dämper del ventilador de aire sobre fuego #2 (válvula) (PCV-413B)	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	3	2	2	2	3	4	4	4	67.00
Transportador vibratorio de arena con cenizas 1 (TPV-21001)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 1 A (ARC-21023)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 1 B (ARC-21024)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 1 A (MTR-21023)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 1 B (MTR-21024)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 2 (TPV-21002)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 2 A (ARC-21025)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de de transportador vibratorio del lecho fluidizado 2 B (ARC-21026)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 2 A (MTR-21025)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 2 B (MTR-21026)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 3 (TPV-21003)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 3 A (ARC-21027)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 3 B (ARC-21028)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 3 A (MTR-21027)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 3 B (MTR-21028)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 4 (TPV-21004)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 4 A (ARC-21029)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 4 B (ARC-21030)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 4 A (MTR-21029)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 4 B (MTR-21030)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 5 (TPV-21005)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 5 A (ARC-21031)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 5 B (ARC-21032)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 5 A (MTR-21031)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 5 B (MTR-21032)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 6 (TPV-21006)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 6 A (ARC-21033)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 6 B (ARC-21034)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 6 A (MTR-21033)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 6 B (MTR-21034)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Transportador vibratorio de arena con cenizas 7 (TPV-21007)	5	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	4	3	4	4	3	63.50
Arrancador motor 1 de transportador vibratorio de arena con cenizas 7 (ARC-21210)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Arrancador motor 2 de transportador vibratorio de arena con cenizas 7 (ARC-21211)	5	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	71.50
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 7 A (MTR-21210)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75
Motor de transportador vibratorio del lecho fluidizado 7 B (MTR-21211)	5	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	4	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	73.75

Sinfin 1 de precalentador (SFN-21001)	5	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	70.75
Válvula rotativa 1 de sin fin 1 de precalentador caldera 5 (VVR-21007)	3	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.00
Reductor de válvula rotativa 1 de caldera 5 (RDT-21061)	2	1	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	66.25
Arrancador motor de válvula rotativa 1 de caldera 5 (ARC-21130)	5	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	68.50
Motor de válvula rotativa 1 de caldera 5 (MTR-21130)	5	1	3	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.75
Reductor de sin fin 1 de precalentador (RDT-21053)	2	1	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	66.25
Arrancador motor de reductor de sin fin 1 de precalentador (ARC-21113)	5	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	68.50
Motor de reductor de sin fin 1 de precalentador (MTR-21113)	5	1	3	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.75
Sinfin 2 de precalentador (SFN-21002)	5	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	70.75
Válvula rotativa 2 de sin fin 2 de precalentador caldera 5 (VVR-21008)	3	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.00
Reductor de válvula rotativa 2 de caldera 5 (RDT-21062)	2	1	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	66.25
Arrancador motor de válvula rotativa 2 de caldera 5 (ARC-21131)	5	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	68.50
Motor de válvula rotativa 2 de caldera 5 (MTR-21131)	5	1	3	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.75
Reductor de sin fin 2 de precalentador (RDT-21054)	2	1	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	66.25
Arrancador motor de reductor de sin fin 2 de precalentador (ARC-21114)	5	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	68.50
Motor de reductor de sin fin 2 de precalentador (MTR-21114)	5	1	3	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.75
Sinfin de haz tubular (SFN-21003)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	1	1	3	1	4	1	2	2	4	3	4	4	3	68.25
Válvula rotativa 3 de sin fin haz tubular caldera 5 (VVR-21009)	3	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	1	2	2	4	3	4	4	3	67.50
Reductor de válvula rotativa 3 de caldera 5 (RDT-21063)	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	65.75
Arrancador motor de válvula rotativa 3 de caldera 5 (ARC-21132)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	71.00
Motor de válvula rotativa 3 de caldera 5 (MTR-21132)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	70.25
Reductor de sin fin de haz tubular caldera 5 (RDT-21084)	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	65.75
Arrancador motor de reductor de sin fin de haz tubular caldera 5 (ARC-21212)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	71.00
Motor de reductor de sin fin de haz tubular caldera 5 (MTR-21212)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	1	1	3	1	4	2	2	2	4	3	4	4	3	70.25
Soplador de hollín 1 de caldera 5 (SPH-21026)	4	1	1	4	2	2	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	62.50
Válvula reductora de presión para los sopladores de hollín (PVC-310)	3	1	1	3	1	1	2	1	2	1	1	1	1	4	3	5	5	2	3	4	3	2	90.75
Reductor de soplador de hollín 1 de caldera 5 (RDT-21088)	2	1	1	2	3	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	57.25
Arrancador motor de soplador de hollín 1 de caldera 5 (ARC-21118)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	59.50
Motor de soplador de hollín 1 de caldera 5 (MTR-21118)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	58.75
Soplador de hollín 2 de caldera 5 (SPH-21027)	4	1	1	4	2	2	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	62.50
Reductor de soplador de hollín 2 de caldera 5 (RDT-21089)	2	1	1	2	3	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	57.25
Arrancador motor de soplador de hollín 2 de caldera 5 (ARC-21119)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	59.50
Motor de soplador de hollín 2 de caldera 5 (MTR-21119)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	58.75
Soplador de hollín 3 de caldera 5 (SPH-21028)	4	1	1	4	2	2	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	62.50
Reductor de soplador de hollín 3 de caldera 5 (RDT-21090)	2	1	1	2	3	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	57.25
Arrancador motor de soplador de hollín 3 de caldera 5 (ARC-21120)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	59.50
Motor de soplador de hollín 3 de caldera 5 (MTR-21120)	5	1	3	1	2	1	2	2	1	3	2	4	2	4	3	1	1	3	3	4	4	3	58.75
Alimentadores de bagazo caldera 5 (ALM-21005)	5	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	72.25
Reductor 1 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21021)	2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00
Arrancador motor de reductor 1 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21073)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25
Motor de reductor 1 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21073)	5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50
Reductor 2 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21022)	2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00
Arrancador motor de reductor 2 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21074)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25
Motor de reductor 2 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21074)	5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50
Reductor 3 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21023)	2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00
Arrancador motor de reductor 3 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21075)	5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25
Motor de reductor 3 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21075)	5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50

Reductor 4 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21024)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 4 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21076)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 4 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21076)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 5 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21025)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 5 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21077)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 5 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21077)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 6 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21026)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 6 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21078)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 6 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21078)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 7 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21027)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 7 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21079)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 7 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21079)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 8 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21028)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 8 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21080)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 8 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21080)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 9 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21029)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 9 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21081)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 9 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21081)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 10 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21030)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 10 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21082)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 10 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21082)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 11 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21031)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 11 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21083)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 11 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21083)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Reductor 12 de alimentadores de bagazo caldera 5 (RDT-21032)		2	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	68.00	
Arrancador motor de reductor 12 alimentador de bagazo caldera 5 (ARC-21084)		5	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	3	67.25	
Motor de reductor 12 alimentador de bagazo caldera 5 (MTR-21084)		5	1	3	1	2	3	2	2	1	1	1	3	1	4	3	1	1	5	3	4	4	2	71.50	
Sistema de aspersión de bagazo																								0.00	
Chapaletas de caldera HPB lado MITRE		5	2	3	1	2	1	2	2	2	1	1	5	1	5	2	1	1	1	3	5	5	3	61.00	
Motor para chapaletas de caldera HPB lado MITRE		5	2	3	1	2	1	2	2	2	1	1	5	1	5	2	1	1	1	3	5	5	3	61.00	
Actuador de dämpfer - aire para esparcidores neumáticos #1 (FCV-420A)		4	1	1	1	1	1	1	3	2	1	2	5	1	5	3	2	2	1	3	5	5	5	56.00	
Chapaletas de caldera HPB lado casa de fuerza		5	2	3	1	2	1	2	2	2	1	1	5	1	5	2	1	1	1	3	5	5	3	61.00	
Motor para chapaletas de caldera HPB lado casa de fuerza		5	2	3	1	2	1	2	2	2	1	1	5	1	5	2	1	1	1	3	5	5	3	61.00	
Actuador de dämpfer - aire para esparcidores neumáticos #2 (FCV-420B)		4	1	1	1	1	1	1	3	2	1	2	5	1	5	3	2	2	1	3	5	5	5	56.00	
Bomba titular de sistema de alimentación de agua de caldera HPB (BMB-21004A)		3	4	4	2	2	1	2	1	1	1	1	3	4	3	5	5	2	2	2	4	4	3	84.00	
Arrancador motor de bomba titular de sistema de alimentación de agua de caldera (ARC-21007)		5	4	1	1	1	1	2	2	1	1	1	5	2	4	2	5	5	2	2	2	4	4	3	80.75
Motor de bomba titular de sistema de alimentación de agua de caldera (MTR-21007)		5	4	4	2	2	1	2	2	1	1	1	5	2	4	3	5	5	2	2	2	4	4	2	81.50
Temperatura del cojinete bomba #1 lado sin acoplamiento HPB		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Temperatura del cojinete bomba #1 lado con acoplamiento HPB		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Bomba respaldo 1 de sistema de alimentación de agua de caldera HPB (BMB-21004B)		3	4	4	2	2	1	2	1	1	1	1	3	4	3	5	5	2	2	2	4	4	3	84.00	
Arrancador motor de bomba respaldo 1 de sistema de alimentación de agua de caldera (ARC-21008)		5	4	1	1	1	1	2	2	1	1	1	5	2	4	2	5	5	2	2	2	4	4	3	80.75
Motor de bomba respaldo 1 de sistema de alimentación de agua de caldera (MTR-21008)		5	4	4	2	2	1	2	2	1	1	1	5	2	4	3	5	5	2	2	2	4	4	2	81.50
Temperatura del cojinete bomba #2 lado sin acoplamiento HPB (TIT-120B)		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Temperatura del cojinete bomba #2 lado con acoplamiento HPB		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Bomba respaldo 2 de sistema de alimentación de agua de caldera HPB (BMB-21004C)		3	4	4	2	2	1	2	1	1	1	1	3	4	3	5	5	2	2	2	4	4	3	84.00	
Arrancador motor de bomba respaldo 2 de sistema de alimentación de agua de caldera (ARC-21009)		5	4	1	1	1	1	2	2	1	1	1	5	2	4	2	5	5	2	2	2	4	4	3	80.75
Motor de bomba respaldo 2 de sistema de alimentación de agua de caldera (MTR-21009)		5	4	4	2	2	1	2	2	1	1	1	5	2	4	3	5	5	2	2	2	4	4	2	81.50
Temperatura del cojinete bomba #3 lado sin acoplamiento HPB (TIT-130B)		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Temperatura del cojinete bomba #3 lado con acoplamiento HPB (TIT-130A)		2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	

Bomba respaldo 3 de sistema de alimentación de agua de caldera HPB (BMB-21004D)	3	4	4	2	2	1	2	1	1	1	1	1	3	4	3	5	5	2	2	4	4	3	84.00
Arrancador motor de bomba respaldo 3 de sistema de alimentación de agua (ARC-21010)	5	4	1	1	1	1	2	2	1	1	1	5	2	4	2	5	5	2	2	4	4	3	80.75
Motor de bomba respaldo 3 de sistema de alimentación de agua de caldera (MTR-21010)	5	4	4	2	2	1	2	2	1	1	1	5	2	4	3	5	5	2	2	4	4	2	81.50
Temperatura del cojinete bomba #4 lado sin acoplamiento HPB (TIT-140B)	2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50
Temperatura del cojinete bomba #4 lado con acoplamiento HPB (TIT-140A)	2	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	5	5	5	60.50	
Tanque de purga 1 de caldera HPB (TNQ-21038)	2	1	1	3	1	1	2	1	2	1	1	5	1	1	2	1	2	1	3	3	3	4	70.75
Tanque de condensado de radiadores HPB (TNQ-21040)	2	1	1	3	1	1	2	1	2	1	1	5	1	1	2	1	2	1	3	3	3	4	70.75
Calentador calor LP de HPB	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	1	2	3	2	2	77.50
Presión del vapor extracción para intercambiador de calor LP de HPB (PIT-152)	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	77.50
Nivel trocador de calor LP de HPB (LIT-170)	2	1	1	4	1	3	2	3	2	1	1	5	1	5	1	2	2	2	3	4	4	4	65.00
Calentador calor MP de HPB	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	77.50
Presión del vapor extracción para intercambiador de calor MP de HPB (PIT-162)	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	77.50
Nivel trocador de calor MP de HPB (LIT-170)	2	1	1	4	1	3	2	3	2	1	1	5	1	5	1	2	2	2	3	4	4	4	65.00
Calentador calor HP de HPB	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	77.50
Presión del vapor extracción para intercambiador de calor HP de HPB (PIT-172)	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	2	3	2	2	2	77.50
Nivel trocador de calor HP de HPB (LIT-170)	2	1	1	4	1	3	2	3	2	1	1	5	1	5	1	2	2	2	3	4	4	4	65.00
Filtro de mangas caldera 5 (FTR-21002)	5	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	4	3	5	5	1	3	4	4	2	93.50	
Transmisor presión diferencial del "fabric filter" (PDIT-605)	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	5	2	5	5	1	3	4	3	1	94.00	
Válvula rotativa 4 de filtro de mangas caldera 5 (VVR-21010)	3	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.00
Reductor de válvula rotativa 4 de caldera 5 (RDT-21064)	2	1	1	2	3	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	66.25
Arrancador motor de válvula rotativa 4 de caldera 5 (ARC-21133)	5	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	68.50
Motor de válvula rotativa 4 de caldera 5 (MTR-21133)	5	1	3	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	5	2	2	2	4	3	4	4	3	67.75
Quemador 1 de caldera HPB (QMD-21001)	4	1	1	4	1	2	2	3	2	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	3	3	2	77.50
Quemador 2 de caldera HPB (QMD-21001)	4	1	1	4	1	2	2	3	2	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	3	3	2	77.50
Quemador 3 de caldera HPB (QMD-21001)	4	1	1	4	1	2	2	3	2	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	3	3	2	77.50
Quemador 4 de caldera HPB (QMD-21001)	4	1	1	4	1	2	2	3	2	1	1	4	1	4	3	1	1	1	3	3	3	2	77.50
Elevador de arena de rechazo (ELV-21002)	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	5	1	5	1	1	1	1	3	5	5	2	55.00
Remotas de Caldera HPB																							0.00
Remota #1 caldera HPB (GCT-21004)	5		1	1	1	1	2	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	69.00
Remota #2 caldera HPB (GCT-21005)	5		1	1	1	1	2	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	69.00
Remota #3 caldera HPB (GCT-21006)	5		1	1	1	1	2	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	69.00
Remota #4 caldera HPB (GCT-21012)	5		1	1	1	1	2	2	1	1	1	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	69.00
Casa de Fuerza Caldera HPB																							0.00
Variador 1 de arranque para motores a media tensión (VDF-21001)	5	3	1	2	1	1	2	2	2	1	1	5	2	5	3	5	5	1	2	4	4	2	78.25
Variador 2 de arranque para motores a media tensión (VDF-21002)	5	3	1	2	1	1	2	2	2	1	1	5	2	5	3	5	5	1	2	4	4	2	78.25

Tabla 4. Componentes de caldera

CRITICIDAD	RANGO		RECOMENDACIONES ALI & CM
BAJA	13	< 38	Supervisión según plan de mantenimiento de fabricante
MODERADA	38	< 63	Atender síntomas con experiencia y seguimiento periódico
MEDIA	63	< 88	Uso de alineación láser y CM offline, frecuencias trimestrales
ALTA	88	< 114	Plan de ALI & CM, frecuencias altas y online si procede
CRÍTICA	114	< 139	Plan de ALI & CM exhaustivo, online, métodos de fiabilidad

Variable	Peso	Cantidad
EQUIPO	15.0%	6
PROCESO	10.0%	3
OPERATIVA	20.0%	5
ECONÓMICO	20.0%	3
MANTENIBILIDAD	15.0%	2
SOSTENIBILIDAD	20.0%	3
	100.0%	22

132

Tabla 5. Niveles de criticidad

El tipo de variable EQUIPO, dispone de 6 variables donde se concentran las características técnicas más importantes que definen la máquina. Es sabido que puede haber muchas más características que son importantes, pero estas seis son las más importantes. Se determina en cada variable en su código 001 a 005 el que más se adecúa.

El tipo de variable PROCESO, dispone de 3 variables donde se definen conceptos de tipo de proceso donde está ubicado la máquina, tipo de producto con el que trabaja y un argumento técnico que caracteriza el proceso y producto, variables P3 TÉCNICA.

El tipo de variables OPERATIVA dispone de 5 variables y es usada para conocer la carga de trabajo de la máquina, así como se distribuye dicha carga. Es una variable que sirve aparte de conocer la usabilidad de la máquina, también se observa los espacios de disponibilidad de parada de la máquina para realizar mantenimiento preventivo y correctivo.

El tipo de variable ECONÓMICO dispone de 3 variables, siendo que el precio de la máquina con su coste de indisponibilidad conlleva estudios exhaustivos en todos los departamentos de las empresas que buscan, por supuesto, rentabilizar sus máquinas y actividad operativa.

El tipo de variable MANTENIBILIDAD, aglutina conceptos muy necesarios de disposición de recambios, capacidad mantener máquinas e historia del mantenimiento de cada una (gestión). La intercambiabilidad es muy necesaria, ya que reduce costes de stock y operativa.

El tipo de variable SOSTENIBILIDAD, intenta tomar en consideración el grado de afectación a las normas de inocuidad, medio ambiente y de la seguridad industrial, de una manera global, no detallada, pues el detalle se encuentra en los manuales particulares de cada sistema de gestión.

## Capítulo 12 Ingeniería del proyecto

En el momento en que se desea justificar la asignación de medios económicos para realizar una mejora en un proceso, también se debe acompañar con una debida demostración del por qué se asignan dichos recursos. En el caso del presente estudio, la aplicación de la metodología RCM para aumentar la confiabilidad de la Caldera Bagacera, se justifica por resultados de mayor puntuación en la matriz de criticidad. Lo anterior, hace que la gerencia tome las decisiones para buscar los mecanismos a su alcance para evitar que estos equipos de alta criticidad tengan fallas, de esa forma se designa un equipo en planta para tratar el problema y llegar a las posibles soluciones a través del uso de la herramienta RCM.

Posterior a ellos se muestra abajo la tabla de los equipos de mayor puntuación en la matriz de criticidad:

	Maquina por Función	Criticidad
1	Horno de Caldera	111.00
2	Lavador de gases de caldera	93.50
3	Desaireador caldera HPB (DRD-21003)	93.50
4	Presión de agua de alimentación de la caldera (PIT-200)	91.25
5	Valvula bypass de principal de vapor	90.75
6	Ventilador de tiro forzado 1 caldera 5 (VTF-21007)	89.00

*Tabla 6. Equipos de mayor criticidad*

Para realizar la tarea de aplicar la disciplina RCM al activo físico se designa internamente personal especialista en áreas de mecánica, electricidad e instrumentación.

Lo primero para ordenar los pasos a seguir fue designar en las reuniones la función del activo físico en su conjunto y después ir desglosándolo en sistemas y subsistemas con sus funciones correspondientes.

El activo físico del Ingenio, objeto del estudio es la Caldera Bagacera y su función es producción de vapor, para posteriormente distribuir a los clientes de la Caldera Bagacera según los requerimientos que estos presenten.

Posterior a determinar la función del activo físico, se procede a evaluar qué sistemas y subsistemas con sus funciones correspondientes se evaluarán en el estudio, esto para determinar plazos, amplitud y profundidad que abarcará la aplicación de la metodología.

Los sistemas seleccionados comprenden los más preponderantes de la Caldera Bagacera y abarcan también la máquina en su conjunto. Cada uno de ellos posee subsistemas con sus componentes respectivos, los cuales poseen funciones, fallas funcionales y modos de fallas específicos los cuales son parte del análisis a tratar.



La metodología RCM se inicia desglosando el activo en sistemas y subsistemas.

Posterior a ello, en las reuniones con los expertos se analizan los componentes de cada subsistema uno a uno y se anota en las Hojas de Información todo lo referente a cada componente (función, falla funcional, modo de falla, criticidad y acción) de manera tal de ir avanzando hacia los objetivos propuestos. Una vez que se ha reunido toda la información, se procede a completar las Hojas de Decisión RCM, las cuales resumen de mejor forma lo ya recopilado, se definen tareas con sus frecuencias correspondientes y unidad o responsable respectivo.

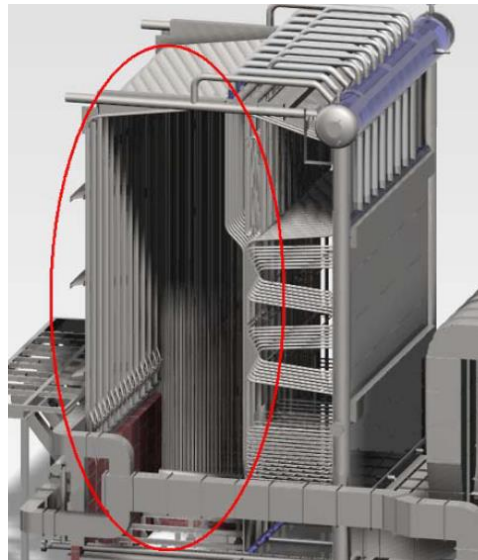
## Capítulo 13 Hojas de Información FMECA

En el inicio del análisis RCM, se deben llenar en las reuniones realizadas las tablas FMECA (Failure Mode Analysis and Effects), las cuales recopilarán la información necesaria para conocer los componentes de cada sistema y subsistema como se muestra en la tabla 4, donde se denotan en verde los sistemas y en blanco los subsistemas.

### 13.1. Análisis Horno de Caldera Bagacera

En primera instancia se analiza el horno de la caldera bagacera, el cual es de suma importancia en la operación ya que es donde se realiza la combustión y requieren constante abastecimiento de combustible durante la operación de la caldera bagacera.

El hogar sirve como una caja donde se produce la combustión, y debe tener un volumen adecuado y la altura para quemar completamente el combustible, y la superficie suficiente para enfriar los gases a la temperatura apropiada antes de pasar por el sobrecalentador.



*Ilustración 19. Horno de Caldera*

*Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera*

#### **Paredes de agua**

Tipo de tubos .....	Liso sin costura
Presión de Diseño .....	120.5 kgf/cm <sup>2</sup> .g
Temperatura de Diseño .....	349 °C
Diámetro Externo de los Tubos .....	76.2 mm
Espesor Mínima de la Pared de los Tubos .....	6.05 mm
Espesor requerido .....	4.05 mm
Material de los Tubos .....	ASTM A 210 Gr. A1
Cantidad de Tubos en cada Pared .....	31
Referencia normativa .....	PG-27; PG-99

## Cabezales de las paredes de agua

Presión de Diseño ..... 123.0 kgf/cm<sup>2</sup>.g  
 Temperatura de Diseño ..... 351 °C  
 Diámetro Externo ..... 273.0 mm  
 Espesor nominal ..... 28.6 mm  
 Espesor requerido ..... 23.57 mm  
 Material ..... ASTM A 106 Gr.B

#	Equipo	Síntomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
1	Horno de Caldera HPB	Deficiencia de temperatura	1	Falla de ignición de los quemadores	2	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): No homogeneidad en la temperatura del horno Acción correctiva:Revisión del actuador	1	200	5000	0	10400
			2	Deficiencia de aire para combustión	0.5	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Baja temperatura en hogar Acción correctiva: Revisión de abertura de dampers	2	200	5000	0	2700
		Fugas de agua	3	Espesor de tubería demasiado delgado	2	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Ruptura de tubos Acción correctiva:Reparación con soldadura	24	200	5000	0	19600
		Falla de sobrecalentador	4	Ruptura de tubería por desgaste abrasivo con los gases de	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Ruptura de tubos Acción	24	200	5000	0	9800
		Falla en lecho fluidizado	5	Arena a utilizar con mayor porcentaje de humedad	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): mayor consumo de aire para la combustión Acción correctiva: Adquisición de arena según estandar especificado	12	200	2000	0	4400
			6	Contaminación en la arena del lecho fluidizado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): mayor consumo de aire para la combustión Acción correctiva: Adquisición de arena según estandar especificado	12	200	2000	0	4400
			7	falla en la inyección de aire para generar la fluidización	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Disminución del nivel de fluidización Acción correctiva:Cambio de ventilador de reserva para inyección de aire.	6	200	500	0	1700

Tabla 7. Análisis FMECA de Horno de Caldera HPB

Podemos concluir que los costos más altos por falla en el horno son por ruptura o desgaste en los tubos de este. Por lo tanto, debemos concluir en concentrar los esfuerzos en un buen análisis de medición de espesores y fallas por soldaduras en tuberías.

## 13.2. Análisis Desaireador de caldera

La función del desaireador es la eliminación de los gases disueltos en el agua por medio del principio de calentar el agua hasta el punto de ebullición donde se reduce la solubilidad de los gases en el agua. El contacto directo del vapor con el agua ayuda de la difusión de moléculas de agua y burbujas de gas de la masa de agua. Termodinámicamente es un equipo que genera una etapa de equilibrio al poner en contacto una solución saturada de oxígeno y una corriente de vapor puro. El equilibrio químico desplaza oxígeno de la corriente líquida saturada a la corriente de vapor puro.

Características:

Presión de operación .....	3.2 kgf/cm <sup>2</sup> .g
Presión máxima de trabajo admisible (PMTA) .....	5.0 kgf/cm <sup>2</sup> .g
Temperatura de operación .....	145°C
Temperatura de diseño .....	250°C
Fluido .....	Vapor / Condensado
Volumen total .....	106 m <sup>3</sup>
Volumen útil .....	65 m <sup>3</sup>
Peso vacío .....	31,542 kg
Peso lleno de agua .....	137,542 kg



Ilustración 20. Desaireador

#	Equipo	Sintomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
2	Desaireador de caldera	Bajo nivel de agua	1	falla en bombas de inyección de agua	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Falta de flujo de agua Acción correctiva: revisión de ajustes de bomba e impulsor	2	100	5000	0	5200
			2	Falla en transmisor de nivel	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Medición de nivel incorrecta Acción correctiva: Calibración de transmisor	2	100	600	0	800
		Aumento de presión dentro del desaireador	3	Obstrucción de venteo de gases	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Aumento en la presión Acción correctiva:Limpieza de rejillas de venteo	5	200	100	0	1100
			4	Falla en válvula de presión del desaireador	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):No accionamiento de apertura o cierre de válvula Acción correctiva: revisión de circuito neumático o posible entrapamiento	4	200	0	0	800
		baja temperatura	5	Disminución de la temperatura del vapor entrando al desaireador	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Efectos de oxidación en tuberías Acción correctiva:Chequeo de temperatura de vapor de alimentación.	6	0	800	0	800
		Oxidación y corrosión de tuberías en caldera	6	mala separación de oxígeno y gases	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Oxidación o corrosión en banco de tubos Acción correctiva: Revisión de toberas de vapor para asegurar el flujo de vapor necesario	6	200	800	0	2000

Tabla 8. Análisis FMECA Desaireador de Caldera

Se puede concluir que una falla en la instrumentación de los niveles del desaireador puede conllevarnos a altos costos por hora, debido a la indisponibilidad de la caldera, ya que no existiría forma de alimentar agua.

### 13.3 Análisis Transmisor de presión de agua de alimentación de la caldera

La función del transmisor de presión es mantener una condición adecuada de alimentación de la caldera para su buena operación. Protege las partes de presión, así como la bomba de alimentación de agua.

Transmisor de presión manométrica

Rango: -14.7 psi a 4,000 psi

Salida: 4 – 20 mA

Carcaza de Aluminio

Comunicación: Protocolo HART



Ilustración 21. Transmisor de presión de agua de alimentación

#	Equipo	Síntomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
3	Transmisor de presión de agua de alimentación de la caldera	Mala medición de presión	1	Mala calibración de transmisor	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Medición errónea Acción correctiva: Calibrar transmisor	1	200	1000		1200
			2	Obstrucción de la línea de conexión al proceso	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Ausencia de medición Acción correctiva: Limpieza de tubería de conexión	1	200	0		200
			3	Daños a la placa electrónica	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Medición errónea Acción correctiva: Cambio de tarjeta	2	200	1000		1400
			4	fallas por mal estado del cable de la señal de salida	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Medición errónea o falta de medición Acción correctiva: Cambio de cables de conexión	2	200	100		500
			5	Transmisor inadecuado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): falta de medición por avería de transmisor o incapacidad de medición Acción correctiva: cambio de transmisor.	2	200	1500		1900
			6	Daños al transmisor por el entorno	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Falta de medición por transmisor averiado Acción correctiva: cambio de transmisor	2	200	1500		1900

Tabla 9. Análisis FMECA de Transmisor de Presión de Agua de Alimentación

Se puede observar que se tienen 3 condiciones que pueden tener los costos más altos de fallas, que son las fallas de los entornos, por la mala calidad y daños en la electrónica del mismo transmisor por una mala alimentación de energía. Es en dichas áreas donde se deben proponer los recursos y esfuerzos para evitar estos modos de fallo.

### 13.4 Análisis Válvula bypass de principal de vapor

La válvula de by-pass se utiliza para poder equilibrar las presiones aguas abajo y aguas arriba en la tubería de vapor principal. Asegura un incremento de temperatura gradual, limitando el valor máximo de la presión, temperatura y caudal. Por su tamaño la hace vulnerable a la falla, su importancia en la ubicación la convierte en uno de los equipos críticos.

Características:

Válvula Durblock "Y"

Tamaño: 1 ½"

Clase: 1500

Material cuerpo: ASTM A 182 GR F91

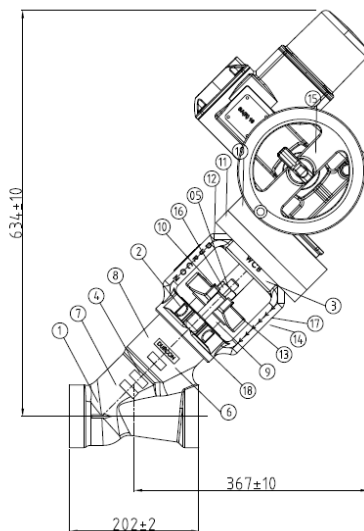


Ilustración 22. Esquema de válvula de bypass

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

Pos.2	C.ref.: VGL Ø1.1/2" 1500"#
Code:	SA10.2-F10-A-UN-19-3ph/440V/60Hz-S2-15min-KS-A0001-6-8-11.-21.2-24-22.05-10.1/10-99-1T-F (IEC 85)-N-40-70-IP68-AM01.1-3ph/440V/60Hz-N-40-70-IP68-KS-A0001-S0-105-A1-54.01-49.2000P-41. 00-51.01-52.08
Wiring diagram:	AM1
Valve attachment:	F10 " A-UN " 120 Nm " 19 min <sup>-1</sup>
Settings:	77 Nm [ 77 Nm ] " 0 U/Hub [ 10 turns/stroke ]
Comment:	TAG - V006
<b>Actuator design description:</b>	
SA10.2	multi-turn actuator
A-UN	output drive: output drive with stem nut (unbored) ø d8 max. 40mm ( 0 40 )
3ph/440V/60Hz	mains voltage: three-phase AC 440 V 60 Hz
KS	corrosion protection: KS is suitable for units occasionally or permanently exposed to aggressive chemical substances, total film thickness 140 µm
A0001	colour: finish painting with standard colour for corrosion protection KN/KS/KX (AUMA silver-grey similar RAL7037)
6	torque switching: single switch (1NC and 1NO) for each direction, switch contacts not galvanically isolated
8	limit switching: single switches (1NC and 1 NO) for each end position, switch contacts not galvanically isolated
10.1	reduction gearing with fixed reduction
11.	position indication: mechanical position indicator
21.2	remote position indication: position transmitter RWG 4-20 mA, 2 wire
24	blinker: blinker contact for running indication

Ilustración 23. Información según modelo de válvula de bypass  
Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

Ubicación de la válvula en el diagrama de flujo en la ilustración 24, donde se muestra la válvula V006 a la cual nos referimos ubicada en la línea de salida del cabezal del sobrecalentador secundario:

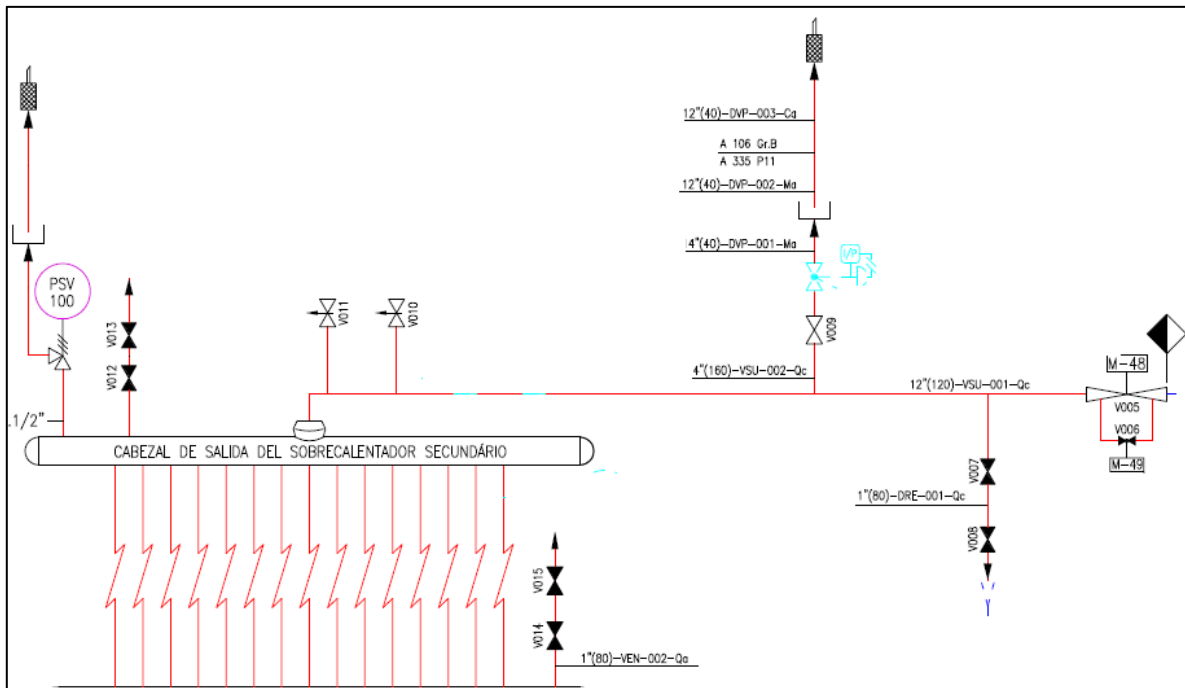


Ilustración 24. Diagrama de flujo  
Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera



Análisis de los modos de falla:

#	Equipo	Síntomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
4	Válvula bypass de principal de vapor	Bloqueo de válvula	1	Falla en circuito neumático del actuador	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Falla en el accionamiento de actuador Acción correctiva: revisión de mangueras de aire	2	200	900		1300
			2	Deformación de vastago	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Entrampamiento de compuerta Acción correctiva: cambio de válvula	4	200	2000		2800
		Paso de vapor con válvula cerrada	3	Válvula abierta por obstrucción de escoria	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Flujo de vapor con válvula en posición de cierre Acción correctiva: Desarme para limpieza	4	200	400		1200
		Fuga de vapor	4	Daño de sellos	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Fuga de vapor Acción correctiva: Desarme para cambio de empaques	4	200	500		1300
			5	Desgaste de asiento de compuerta	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Flujo de vapor con válvula en posición de cierre acción correctiva: cambio de válvula	4	200	2500		3300

Tabla 10. Análisis FMECA de válvula principal de bypass de vapor

La falla por los asientos o la falla de la compuerta son las que causarían más impacto económico, por alto costo de las partes y el tiempo que se mantendría indisponible toda la caldera mientras se realiza la reparación.

### 13.5 Análisis Ventilador de tiro forzado caldera bagacera

Los ventiladores de aire forzado son los encargados de inyectar el aire para la combustión, con capacidad para pasar por los calentadores de aire a vapor y precalentador a gas. Enseguida el aire es encaminado a través de los ductos a los colectores que contienen los bocales de distribución al horno.

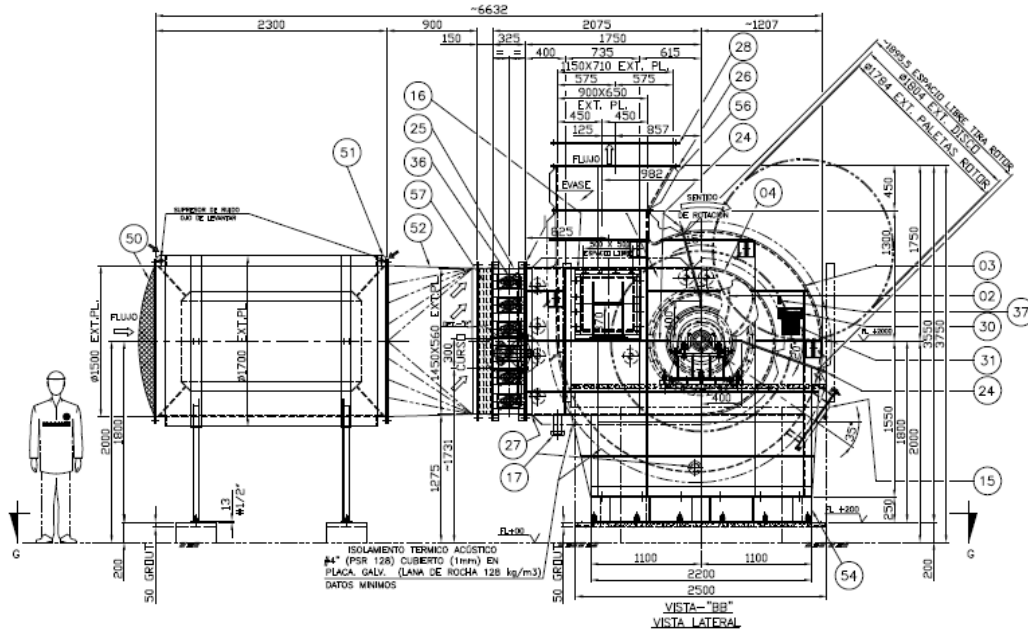


Ilustración 25. Diagrama de montaje de ventilador forzado 1

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

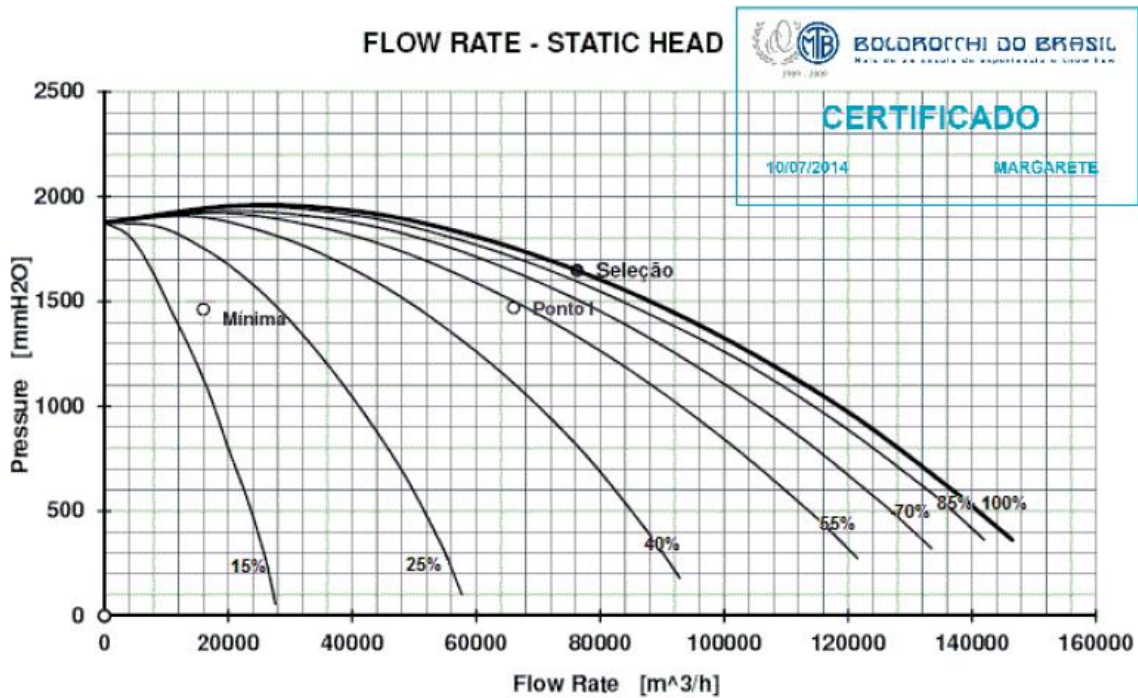
ET.SE-160/13.003  
PC: 019856-00  
REF.: TAG: VE-01 - VE-02



		DATOS DEL FORNECEDOR		
		BOLDROCCHI DO BRASIL		
		BR-14-014		
		CENTRIFUGO / 35L-180-900R-SWSI/7		
		PROYECTO	PUNTO I	MINIMA
Flujo en masa	N	80.818	73.471	18.368
Flujo efectivo	m <sup>3</sup> /h	76.284	66.257	16.565
Altitud	m	500	500	500
Temperatura de operación	°C	41	27	27
Temperatura de proyecto mecanico	°C	100	100	100
Presión estática en la entrada	mmCA	ATM	ATM	ATM
Presión estática em la salida	mmCA	1.647	1.545	1.545
Diferencial de presión estática	mmCA	1.647	1.545	1.545
Potencia de consumo	BHp	535,1	472,0	254,8
Rotación del rotor	rpm	1.790	1.790	1.790
Rendimiento estatico	%	85,3	79,2	36,7
Velocidad periférica	m/s	167,2	167,2	167,2
Dispositivo regulador abierto	%	100	54	19
GD2	kgf·m <sup>2</sup>		1,485	

Ilustración 26. Especificaciones técnicas de ventilador de tiro forzado 1

Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera



*Ilustración 27. Curva de flujo vs presión de ventilador de tiro forzado 1*  
Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera

#	Equipo	Síntomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
5	Ventilador de tiro forzado 1 caldera 5	Alta vibración	1	Desbalanceo de aspas	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): vibración excesiva acción correctiva: realizar balanceo estático y dinámico	10	200	3000		5000
			2	Falla de rodamientos	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): vibración o aumento de temperatura en rodamientos Acción correctiva: cambio de rodamientos	8	200	2500		4100
			3	Falta de lubricación de rodamiento	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Aumento de temperatura en rodamientos Acción correctiva: cambio de rodamientos	8	200	2500		4100
			4	Falla en alineamiento de eje	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): vibración excesiva, daño de acoples Acción correctiva: Realizar el alineamiento correcto.	4	200	0		800
			5	Ruptura o deformación de eje	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Vibración excesiva, daño de rodamientos acción correctiva: Fabricación y Cambio de eje	20	200	1500		5500
		Caída de presión	6	Falla en actuadores de dâmpner	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Perdida de vacío en el hogar acción correctiva: revisión de sistema accionador de actuador	4	200			800

*Tabla 11. Análisis FMECA de ventilador de tiro forzado 1*

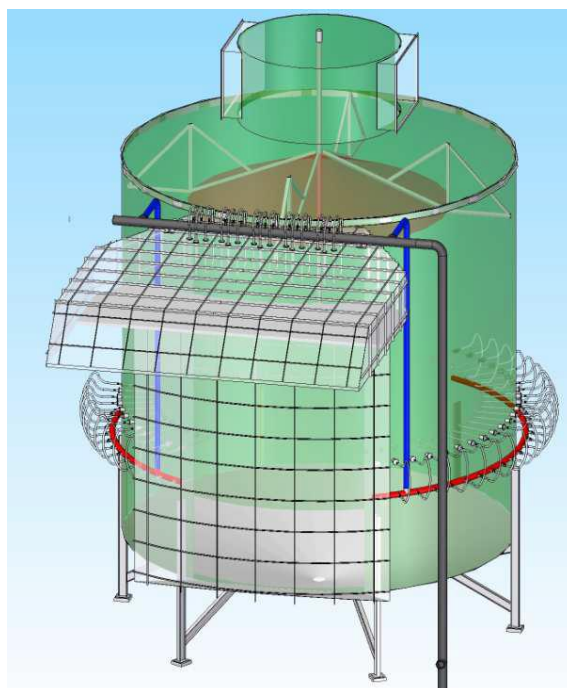
Con respecto al ventilador forzado es uno de los equipos con más probabilidades de fallas que el resto de los equipos críticos, de más alto costo. Fallas de ejes, daños en rodamientos, desbalance. Por lo tanto, será de los equipos donde se enfocarán más análisis para poder tener las mejoras y poder evitar el paro total de la caldera y por ende el ingenio.

### 13.6 Análisis Lavador de gases de caldera bagacera

El principio de funcionamiento consiste en la circulación de agua a través de boquillas por la que en contracorriente circula los gases a lavar y mediante absorción se retiran las partículas provenientes de la combustión del bagazo en el horno que lleva el gas.

Trata de una limpieza de gases vía húmeda, que utilizan tecnología de inyección de agua sin necesidad de equipos mecánicos. Estos no producen pérdidas de carga en las líneas, sino que crean una ganancia de presión.

Caudal de agua de limpieza .....	190 m <sup>3</sup> /h
Presión requerida del agua en la toma de entrada .....	2.0 kgf/cm <sup>2</sup> g
Caudal de agua arrastrada (reposición) .....	11,807 kg/h
Flujo de gases en la entrada .....	439,277 m <sup>3</sup> /h
Flujo de gases en la salida .....	451,084 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de los gases en la entrada.....	160 °C
Temperatura de los gases en la salida .....	110 °C



*Ilustración 28. Lavador de gases (Scrubber)*

*Fuente: Homero Freitas, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento de Caldera*

#	Equipo	Sintomas	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPP R horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
6	Lavador de gases de caldera	Alto nivel de contaminantes en los gases emanados	1	Disminución del flujo de líquido de lavado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Aumento de gases contaminantes en la descarga acción correctiva: bombeo de flujo adecuado de químicos para lavado de gases	2	200	500	1000	1900
			2	Daño del material de empaque permeable al gas emanado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Deficiencia del lavado de gases Acción correctiva: Reemplazo de material de empaque permeable	15	200	8000	1000	12000
			3	obstrucción de las toberas del liquido de lavado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas):Aumento de gases dañinos a la descarga Acción correctiva: Limpieza de toberas	6	200	200	1000	2400
			4	Mal balance de químicos aplicados para el lavado de gases	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Aumento de ppm de los gases nocivos al ambiente en la descarga Acción correctiva: corregir el flujo de químicos para lavado	1	0	300	1000	1300
		Fuga de gases	5	Espesor de lamina muy delgado	1	Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): fugas en la carcasa del scrubber Acción correctiva: cambio de sección de lamina	12	200	2500	1000	5900

Tabla 12. Análisis FMECA de Lavador de Gases de Caldera

A través del análisis de FMECA podemos observar que la falla por un desgaste en los espesores de lámina del cuerpo del lavador de gases sería donde debemos tener que enfocar los esfuerzos y recursos para evitar dicha falla.

## Capítulo 14 Hojas de Decisión RCM

Al tener ya recopilada toda la información referente a los sistemas y subsistemas con sus respectivas funciones, fallas funcionales, modos de falla, criticidad y acciones, el proceso continúa completando las Hojas de Decisión, las cuales toman y resumen cada uno de los modos de falla tratados en las Hojas de Información ya trabajadas donde se expresan los costos en US dolares.

Las Hojas de Decisión del RCM integran todo el trabajo realizado y ayudan a la toma de decisiones y estrategias a seguir en el mantenimiento, el cual dependiendo de la resolución que se tome podría ser predictivo (a condición), preventivo (sustitución o reacondicionamiento cíclico) y/o un rediseño.

### Horno de la caldera:

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
1	Horno de Caldera HPB	Deficiencia de temperatura	Revisión de los quemadores según diseño original	1	Supervisor de Area	1000	1000
			Mejorar plan de mantenimiento de ventiladores	1	Supervisor de Area	5000	5000
		Fugas de agua	Medición anual de espesor del banco de tubos y establecer periodos de cambio preventivos	1	Supervisor de Area	1000	1000
		Falla de sobrecalentador	Medición anual de espesor del banco de tubos y establecer periodos de cambio preventivos	0.5	Supervisor de Area	1000	500
		Falla en lecho fluidizado	Mejorar la manipulación de la arena para prevenir que se mezcle con contaminantes	1	Supervisor de Area	1500	1500
			Mejorar la manipulación de la arena para prevenir que se mezcle con contaminantes	1	Supervisor de Area	2000	2000
			Limpieza de toberas en lecho fluidizado	1	Supervisor de Area	800	800

Tabla 13. Propuestas de mejoras para Horno de Caldera

**Desaireador de la caldera:**

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
2	Desaireador de caldera	Bajo nivel de agua	Monitoreo de presión de descarga para anticipar falla de bombeo por desgaste	1	Supervisor de Área	2000	2000
			Limpieza y calibración de transmisor durante los paros programados	6	Supervisor de Área	30	180
		Aumento de presión dentro del desaireador	Limpieza durante los paros programados	6	Supervisor de Área	30	180
			Realizar pruebas de accionamiento en los momentos que la caldera este fuera de línea	3	Supervisor de Área	0	0
		baja temperatura	Instalación de sensor de temperatura en línea de entrada de vapor	1	Supervisor de Área	400	400
		Oxidación y corrosión de tuberías en caldera	Limpieza de toberas durante mantenimiento preventivo	1	Supervisor de Área	100	100

*Tabla 14. Propuesta de mejoras para desaireador*

**Transmisor de presión de agua de calderas:**

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
3	Transmisor de presión de agua de alimentación de la caldera	mala medición de presión	Calibración durante los paros programados	6	Supervisor de Area	30	180
			Instalar valvula de bloqueo para realizar limpieza de tubería de conexión al proceso en los paros programados	1	Supervisor de Area	100	100
			Tener repuesto de placa electronica para acortar tiempo de paro	1	Supervisor de Area	800	800
			Incorporar la inspeccion visual de los cables en las actividades de mantenimiento mensuales	5	Supervisor de Area	0	0
			Selección adecuada de transmisor	1	Supervisor de Area	1000	1000
			Proteger el transmisor de el agua por lluvia para evitar daños	1	Supervisor de Area	100	100

*Tabla 15. Propuesta de mejoras para Transmisor de presión de agua de alimentación*



**Válvula de bypass de vapor principal:**

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
4	Valvula bypass de principal de vapor	Bloqueo de vaulvula	revisión de racores de conexión en actuadores y estado de mangueras en actividades rutinarias	5	Supervisor de Area	80	400
			revisión de pandura de vastago en el desarme durante mantenimiento	1	Supervisor de Area	100	100
		Paso de vapor con valvula cerrada	Limpieza de valvula a mitad de zafra	1	Supervisor de Area	100	100
		fuga de vapor	Evaluar el estado de los empaques a mitad de zafra	1	Supervisor de Area	100	100
			Medir dimensiones de compuerta para asegurar ajuste con asiento en epoca de mantenimiento	1	Supervisor de Area	200	200

*Tabla 16. Propuesta de mejoras para válvula de bypass*

**Ventilador forzado de caldera:**

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
5	Ventilador de tiro forzado 1 caldera 5	Alta vibracion	Balanceo de aspas en epoca de mantenimiento	1	Supervisor de Area	1000	1000
			Realizar analisis de vibraciones rutinariamente	1	Supervisor de Area	500	500
			Inspeccion rutinaria de temperatura de chumaceras	1	Supervisor de Area	100	100
			realizar el alineamiento con el equipo de alineacion laser para equipos criticos	1	Supervisor de Area	0	0
			Inspeccion de eje con ultrasonido y analisis de particulas magneticas y revision con comparador para determinar perdura	1	Supervisor de Area	600	600
		Caida de presion			Supervisor de Area		0

*Tabla 17. Propuestas de mejora para ventilador forzado*

**Lavador de gases de caldera:**

#	Equipo	Síntomas	Acciones de mejora	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad propuesta	Costos de la actividad por año
6	Lavador de gases de caldera	Alto nivel de contaminantes en los gases emanados	Automatizar la dosificación de químicos	1	Supervisor de Area	750	750
			Revisión del estado del empaque permeable en época de mantenimiento para determinar anticipadamente su cambio	1	Supervisor de Area	8000	8000
			Limpieza de toberas en los momentos que la caldera este fuera de línea	1	Supervisor de Area	500	500
			Automatizar la dosificación de químicos	1	Supervisor de Area	750	750
		Fuga de gases	Realizar medición de espesores de lamina	1	Supervisor de Area	2500	2500

*Tabla 18. Propuestas de mejora para lavador de gases*

Las Hojas de Decisión expuestas en los puntos anteriores, que abarcan los seis sistemas que se tomaron para análisis en el RCM aplicado en la Caldera bagacera de un Ingenio Azucarero, arrojan en definitiva una serie de tareas propuestas como estrategias de mantenimiento, con sus períodos establecidos claramente, sus responsables a ejecutar por cada uno y el costo asociado por la tarea. En el siguiente cuadro se resume de forma general el costo total por año que son el resultado del estudio generado para el activo de planta:

<b>Resumen Costo Total RCM</b>	
<b>Sistema</b>	<b>Costo Anual</b>
Horno de la caldera	\$ 11,800.00
Desaireador de la caldera	\$ 2,860.00
Transmisor de presión de agua de calderas	\$ 2,180.00
Válvula de bypass de vapor principal	\$ 900.00
Ventilador forzado de caldera	\$ 2,200.00
Lavador de gases de caldera	\$ 12,500.00
<b>Total Anual</b>	<b>\$ 32,440.00</b>

*Tabla 19. Resumen de Costo Total de RCM*

En necesario poder reconocer el nivel de efectividad de los resultados desde la implementación de la metodología RCM en la Caldera bagacera, por lo cual conviene utilizar una herramienta que indique el nivel de no disponibilidad de la maquinaria en el tiempo. Para lo anterior se utilizará las modificaciones en el sistema de control de mantenimiento para llevar las siguientes variables de los equipos analizados: MTTR (mean time to repair o tiempo medio de reparación) y la frecuencia de eventos. De esa forma se podrá visualizar gráficamente la variación de no disponibilidad en los próximos años (años de implementación RCM).

En la zafra recién pasada se presenta el historial de indisponibilidad de la caldera bagacera:

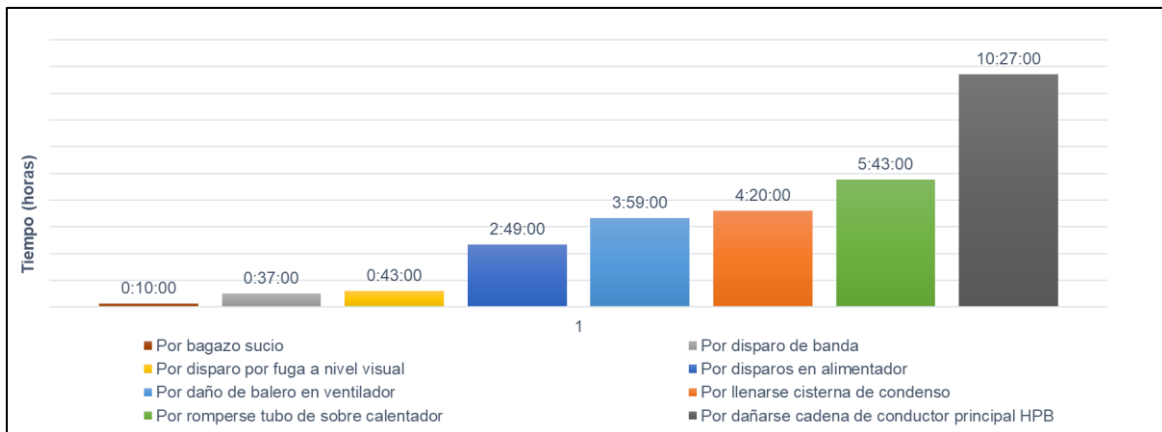


Ilustración 29. Cuadro de Indisponibilidad de la Caldera Bagacera

Por lo anterior se tuvieron pérdidas de producción de azúcar anuales que ascienden a \$ 114,000.00 y perdidas por energía no vendida de \$ 79,000.00 anuales, así también como los altos costos de reparación y tiempos de indisponibilidad promedios de 26 horas por zafra.

Se puede determinar que se tendría una mejora significativa en la disminución de cantidad de horas de no disponibilidad en una zafra aplicando la metodología basada en confiabilidad RCM. Es necesario mencionar que con la inversión total del RCM de la tabla 19 de \$ 32,440.00 podemos disminuir un porcentaje significativo de los \$ 193,000.00 de pérdidas anuales por indisponibilidad, ya que sólo se está aplicando la metodología a 6 sistemas que mas influyen en esa indisponibilidad de los que mas influyeron en ese tiempo.

Al tener los resultados reales en los años que se este implementando el RCM, se podrá analizar los indicadores financieros y de mantenimiento del ingenio, ya que de momento no se están llevando.

## Capítulo 15 Implementación

Actualmente en el ingenio se lleva el mantenimiento de forma preventiva en los meses de mayo a octubre, en los cuales se verifica el estado de toda la maquinaria que interviene en todos los procesos de producción y en época de zafra, meses de noviembre hasta abril se realizan los mantenimientos correctivos de algunos equipos y también se ha comenzado a llevar algunas técnicas predictivas tales como análisis de vibraciones, análisis de aceite, y termografía, como se explicó en capítulos anteriores.

La mejora del mantenimiento que se está implementando en los últimos 2 años en el ingenio tanto en época de no zafra y zafra consiste en llevar un sistema de control de mantenimiento de forma digital. Para este fin se creó un “software hecho en casa” basado en ejemplos de otros programas de mantenimiento que son reconocidos en el mercado. En dicho sistema de control de mantenimiento (SCM) se generan órdenes de trabajo por cada actividad a realizar en los planes de mantenimiento de los equipos, se generan avances de mantenimiento semanales para todos los equipos que tienen todas las áreas de producción como se observa en la Ilustración 30 e Ilustración 31.; también se pueden ver los costos de mantenimiento asociados a los equipos y diagramas de Gantt de seguimiento.

### Porcentaje de Avance - Sistema de Mantenimiento

Avance Obra (Ajust)		Porcentaje de avance en reparación 2021					
Avance Taller							
Cuadro Avance							
Recurso HH							
Supervision Crono.							
Avance Empleados							
Areas	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	
	24/05/21 30/05/21	31/05/21 06/06/21	07/06/21 13/06/21	14/06/21 20/06/21	21/06/21 27/06/21	28/06/21 04/07/21	
	% Esperado 4.50%	% Esperado 9.01%	% Esperado 14.33%	% Esperado 17.09%	% Esperado 21.60%	% Esperado 26.10%	
	% Real	% Real	% Real	% Real	% Real	% Real	
Alimentacion de Caña	4.40	8.79	14.59	18.18	21.67	26.13	
Molinos	4.43	9.98	14.90	17.60	22.32	25.51	
Calderas	3.39	9.64	15.78	18.00	22.18	27.39	
Turbo Generadores	2.67	9.26	14.54	17.16	21.78	26.17	
Fabrica	4.70	9.42	14.53	17.39	21.87	26.37	
Centrifugas de Fábrica	6.54	11.65	15.46	18.38	22.22	26.51	
Electrico Ingenio	3.30	8.32	15.16	17.53	22.65	27.88	
Instrumentacion Ingenio	5.05	9.30	14.38	16.26	20.73	28.22	
Bombas y Reductores de Ingenio	3.26	7.79	14.34	17.04	21.61	26.49	
Refineria	0.08	0.08	0.08	0.08	8.26	13.06	
Electrico Refineria	0.00	0.00	0.00	0.00	14.38	27.91	
Instrumentacion Refineria	0.00	4.95	4.95	4.95	13.24	23.03	
Bombas y Reductores de Refineria	0.00	0.00	0.00	0.00	4.13	11.09	
Centrifugas de Refineria	6.39	16.65	20.54	22.83	31.42	35.98	
<b>Promedio Semanal Ingenio</b>	4.06	9.28	14.92	17.53	21.96	26.75	
<b>Promedio Semanal Refineria</b>	0.77	2.31	2.76	3.02	11.18	17.82	
<b>% Esperado Refineria</b>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.43%	10.86%	

Ilustración 30. Cuadro de avance semanal

### Porcentaje de Avance - Sistema de Mantenimiento

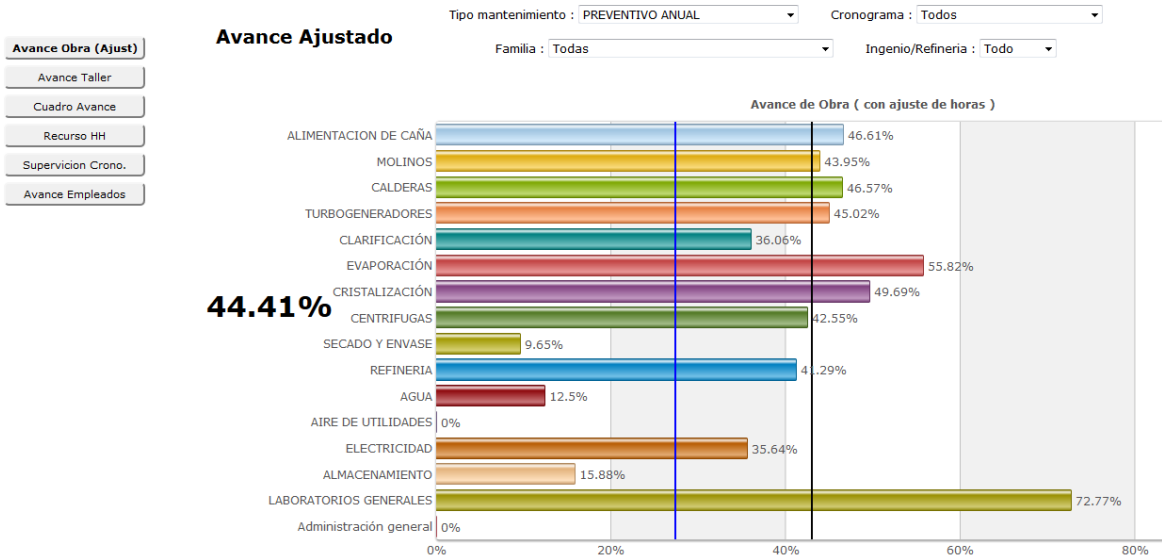


Ilustración 31 Porcentaje de avance por áreas

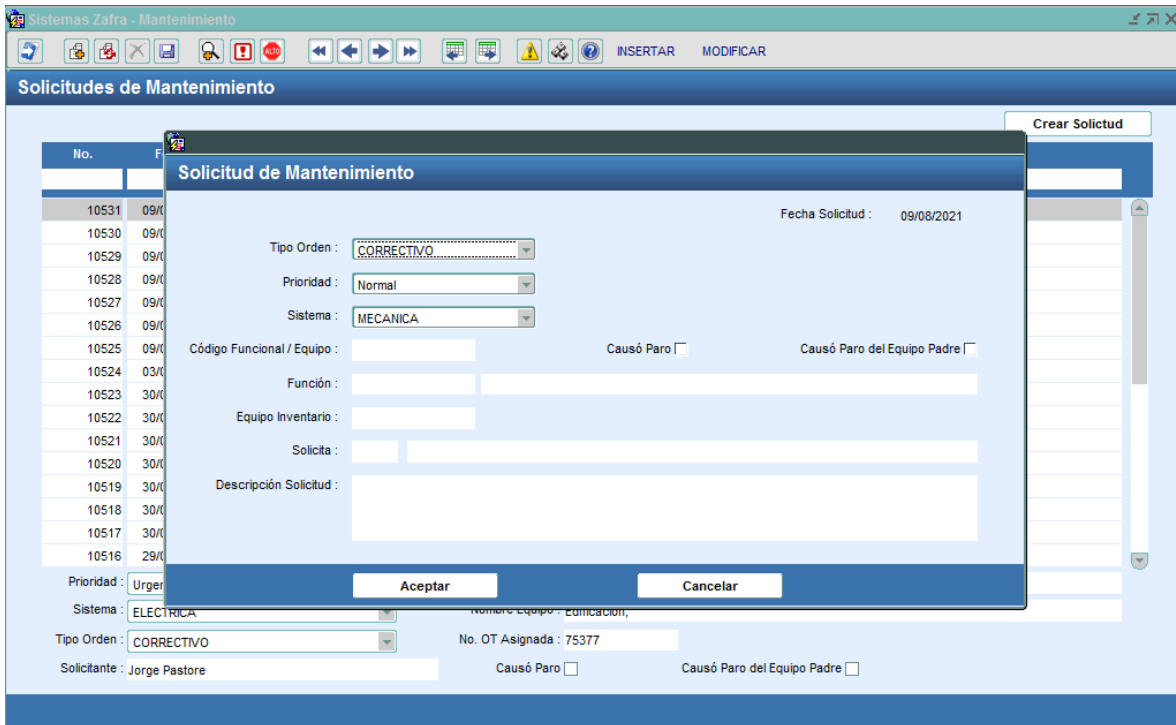


Ilustración 32. Pantalla de solicitud de mantenimiento

En la Ilustración 32. se muestra cómo se generan actualmente las solicitudes para generación de órdenes de trabajo para las actividades de mantenimiento. Actualmente todos los supervisores tienen acceso a estas pantallas para hacer dichas solicitudes y luego el planner de mantenimiento es quien se encarga de generar la orden de trabajo asignando recursos y tiempos de ejecución.

En la siguiente Ilustración se muestra la orden de trabajo generada para la actividad en específico con el nombre de las personas, tiempo asignado y supervisor que evaluará el avance, calidad y finalización de la actividad.

**Sistemas Zafra - Mantenimiento**

**Ordenes de Trabajo Interna** Zafra : 2021/2022 OT No : 71755 Empleado :

Imprimir Herramientas :   
 Imprimir Consumibles :   
 Imprimir OT Imprimir MO  
 Imprimir CheckList

Número 71755 Fecha 21/05/2021 11:19  
 Estado Emitida Prioridad : Tipo PREVENTIVO ANUAL  
 Fecha Programada 24/05/2021 07:00 Fecha Final 21/10/2021 07:27 Duración 3600.45

Codigo Funcional CDR-21005 Caldera 5  
 Proceso 1231 Generación de Vapor  
 Proyecto  
 Contratista  
 Supervisor 61 Yasser Chavez  
 Equipo CDR-00005 Caldera, HPB  
 Area  
 Solicita  
 Sistema 1 MECANICA  
 Descripción Inspeccionar la caldera, ductos, tuberías, cabezales, refractarios y aislantes - Limpiar domos y colectores con el método  
 Duración 337.000 Horas Hombre 674.000  
 Emp. Asignado 1 141 EDUARDO ANTONIO ACOSTA NERIO  
 Emp. Asignado 2 1637 JIMMY JONATHAN ABREGO RUANO  
 Emp. Asignado 3  
 Emp. Asignado 4

Causó Paro  Causó Paro del Equipo Padre   
 % Avance 41 Horas Exceso 0 Inicio Ejecución Fin Ejecución Tareas

Cerrar orden Generar Pre-Requisiciones Requisiciones Materiales Solicitud de Servicios

Ilustración 33. Generación de órdenes de trabajo



A continuación, se presenta el algoritmo utilizado para la generación de las ordenes de trabajo que se ejecutan actualmente.

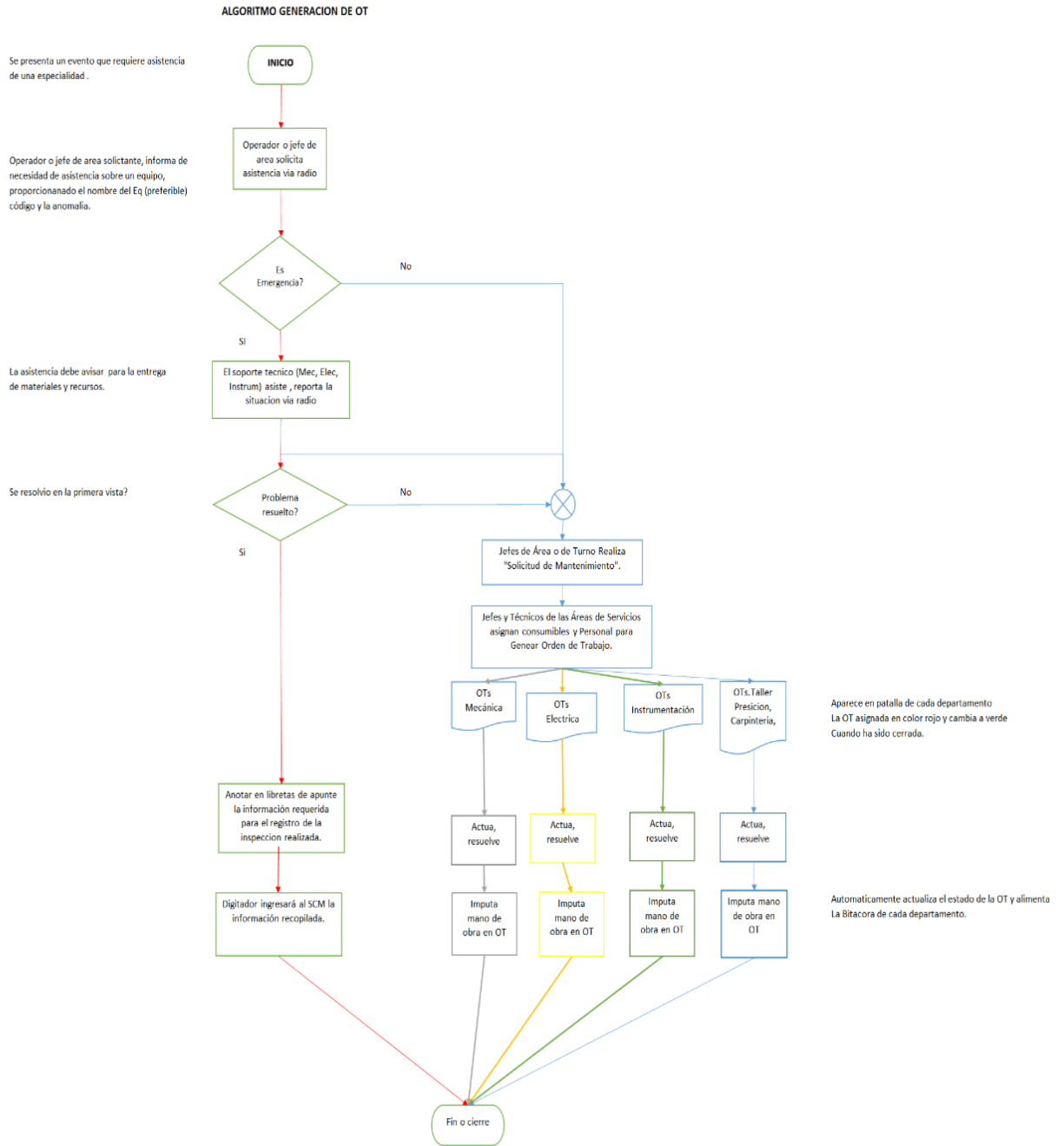


Ilustración 34. Algoritmo para la generación de OT

En la Ilustración 35, se pueden observar los diferentes costos de mantenimiento correctivos, preventivos, predictivos, etc., para los equipos en los meses de zafra y no zafra.

Para los cuales se generan las ordenes de trabajo como controles de mano de obra, contratos y trabajos en talleres, los cuales pueden ser internos o externos, y en los casos que sean necesarios servicios de asesorías.

Es importante para estos, que el ingreso sea lo más exacto y real para no tener resultados erróneos que puedan afectar la toma de decisiones importantes en cuanto a modificaciones, reemplazos o futuros proyectos para la ampliación o mejora en la producción afectando los costos en mantenimiento.

La mano de obra imputada dentro de los costos de mantenimiento en el sistema es la que se encuentra más comprometida, por quedar a criterio de cada encargado de la ejecución de las actividades.

Por tal motivo la supervisión del encargado del área junto con el planner debe ser obligatoria para corregir y tener el correcto avance del mantenimiento.

**Consulta de Intervenciones de Equipos**

Equipo	Nombre Equipo	Funcion
CAL-0300	AREA DE CALDERAS	CALDERAS (CAL-2100)
CDR-00001	Caldera, 300 psig, PEERLESS	Caldera 1 (CDR-21001)
CDR-00002	Caldera, 300 psig, DEDINI	Caldera 2 (CDR-21002)
CDR-00003	Caldera, 300 psig, DEDINI	Caldera 3 (CDR-21003)
CDR-00004	Caldera, 900 psig, MITRE, MPB - 100 H monodrum	Caldera 4 (CDR-21004)
CDR-00005	Caldera, HPB	Caldera 5 (CDR-21005)

Código Anterior : CAL-1601

Listado   Resumen   Consumibles   Servicios

Tipo Mantto.	Intervenciones	Horas Ejecutadas	Fecha Inicio	Costo MO	Costo Repuestos	Servicios	Total
PREVENTIVO RUTINARIO	13	352.33	24/03/2020	1,243.28	519.68		1,762.96
PREVENTIVO RUTINARIO ZAFRA	3	2.98	13/02/2019	13.12			13.12
FABRICACION DE COMPONENTES	8	307.75	02/10/2020	1,154.79	151.20		1,305.99
OPERATIVO	7	96.43	30/09/2019	335.11	7,217.63		7,552.74
PETICIÓN(SERVICIO)	1	5.00	24/01/2021	20.83			20.83
CORRECTIVO	157	3,148.10	06/07/2021	11,230.63	129,313.16		140,543.79
PREVENTIVO ANUAL	137	11,309.05	22/07/2021	42,686.66	84,718.94	15,900.00	143,305.60

Ilustración 35. Consulta de intervención de equipos

En las Ilustraciones 30 y 31 se muestra el avance semanal del mantenimiento de cada área involucrada en el mantenimiento y en el proceso de producción. Dicho cuadro de avance es utilizado para los análisis de avances de mantenimientos que se realizan un día por semana para establecer retrasos por falta de materiales, por incapacidades o por atrasos en talleres externo, etc. También es muy útil cuando una actividad tomó más tiempo de lo planificado y por eso se generó un retraso en el área, esto permite decidir tomar acciones que enruten el correcto avance del mantenimiento del área.

## Metodología.

En cuanto a la implementación de un sistema basado en confiabilidad para una caldera es imperativo aportar las herramientas informáticas que nos permitan llevar un mejor control del mantenimiento, nos permitan manejar altos volúmenes de información de las ordenes de trabajo de los mantenimientos requeridos y luego traducir toda esta información en indicadores que nos permitan tomar decisiones importantes para mejorar las utilidades de la empresa.

Como se mencionó anteriormente el sistema de control de mantenimiento que posee el ingenio no es del todo apto para apoyar a un enfoque de mantenimiento basado en confiabilidad ya que por el momento es demasiado básico y por lo tanto es necesario realizar ciertas modificaciones al sistema.

Después de haber definido la jerarquización de los equipos de la caldera con base a su criticidad, haber definido sus modos de falla y filosofía de mantenimiento en base al FMECA es importante crear una herramienta informática que nos permita manejar este alto volumen de información para tener una mejor cobertura de los problemas y tomar acciones sobre estos problemas que son de más alta frecuencia.

Vale la pena mencionar que el establecimiento del mantenimiento centrado en confiabilidad de una caldera bagacera es el primer paso para luego ser implementado en las demás áreas del ingenio. Es por eso que más adelante se tienen que dejar definidos algunos modos de falla que son comunes en equipos de la planta de producción de azúcar como también en la caldera, así como también los sistemas a analizar y los ítems mantenibles de cada equipo.

### Análisis de causa raíz.

En el análisis de causa raíz es imprescindible crear el equipo multidisciplinario que dará seguimiento a los análisis. Actualmente no se cuenta con este equipo o departamento que en muchas empresas prácticamente es una sección importante en el departamento de mantenimiento; encargados únicamente en los análisis de dichas causas que provocan más tiempos perdidos en los equipos o altas pérdidas de producción, ya sea por muchos reprocesos, productos defectuosos o en nuestro caso particular baja producción en la caldera que se traduce en reducción de la generación de energía dando como resultado pérdidas económicas que golpean fuertemente los estados de resultados de la empresa.

Como sabemos las causas raíz pueden ser de tipo físico, humano y latente. Por ello es necesario que en el equipo multidisciplinario se tome en cuenta también a los sistemas de gestión los cuales toman en cuenta el parte medio ambiental y humana. La recomendación de cómo debería estar compuesto el equipo para el análisis de causa raíz sería:

- Supervisor del área
- Supervisor mecánico
- Supervisor eléctrico
- Supervisor instrumentación
- Coordinador de seguridad industrial
- Coordinador de sistemas de gestión integrales.

Se recomienda esta configuración de equipo multidisciplinario para los análisis de causa raíz basado en que por el momento es lo que tiene el ingenio y no incurrir en costos de contratación de personal extra para cubrir dichos puestos. En otras empresas puede que se tenga personal contratado específicamente para estas funciones y dejando de lado a los supervisores o técnicos existentes con las funciones establecidas para los puestos contratados.

Se debe tomar en cuenta que este equipo solo estará en funciones prácticamente en periodo de zafra ya que es en donde se dan los correctivos en los equipos de generación de vapor y demás áreas de la planta.

#### Software de mantenimiento.

Es necesario generar modificaciones en nuestro sistema de control de mantenimiento (SCM) para que sea una herramienta que facilite terminar de establecer un mantenimiento basado en confiabilidad aportando información que nos permita aumentar la fiabilidad de la caldera y luego dejar el camino para ser homologado en otras áreas del ingenio.

Se deben definir algunos términos a utilizar en la implementación de pantallas para los análisis de confiabilidad las cuales aún no existen en nuestro sistema de control de mantenimiento.

**Ítem mantenible:** para nuestro caso de estudio definiremos como ítem mantenible como las partes de los equipos sobre las cuales es necesario realizar acciones de mantenimiento. En muchos casos por ejemplo el ítem mantenible puede ser el balero de un motor de 4,500 hp pero en otros el ítem mantenible puede ser todo el motor de ½ hp.

**Sistema:** para efectos de estudio definiremos sistema como la unidad a la cual correspondería dicho mantenimiento, por ejemplo, un diafragma de una bomba corresponde a la unidad mecánica, mientras que un diafragma de una electroválvula correspondería a una parte de un sistema de instrumentación.

**Modo de fallo:** corresponde a una o varias formas en que el sistema o equipo pueden fallar, si un equipo o sistema tiene muchas maneras posibles de fallar se dice que tiene múltiples modos de falla.

Para nuestro caso en estudio definiremos los siguientes modos de falla:

**Estático.** En este modo de falla entrarían componentes o ítems mantenibles como por ejemplo volutas de bombas, ductos, domos de la caldera, sopladores de hollín, etc. que no poseen movimientos rotatorios o traslacionales.

**Rotativo.** Para este modo de fallo se toman en cuenta partes tales como rotores de ventiladores, rodamientos, tamices de arena, etc.

**Transmisión.** En esta parte se contempla ítems tales como sprockets, cadenas, fajas y poleas de ventiladores, etc.

**Intercambio de calor.** Los equipos o ítems mantenibles que tienen que ver con intercambio de energía térmica, tales como coolers, horno, tuberías de enfriamiento, etc.

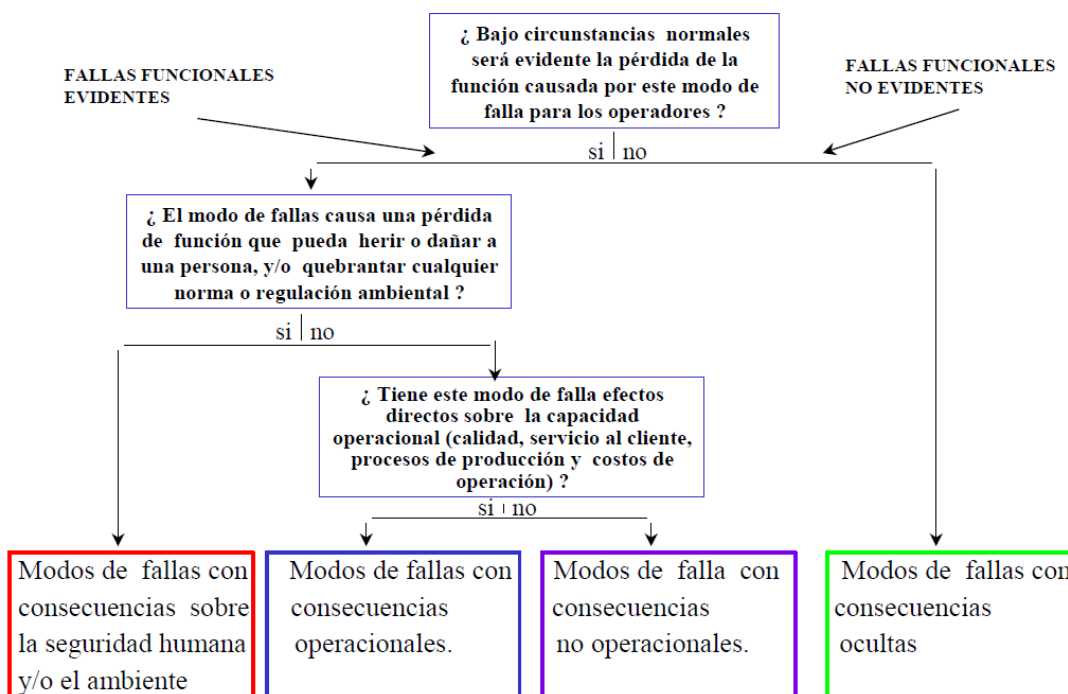
**Elementos de sellado.** Para este modo de falla se contemplan empaquetaduras de bombas, válvulas, retenedores de cajas reductoras, sellos de placa de intercambiadores, etc.

**Elementos de desplazamiento.** Para este modo de falla se encuentran equipos tales como dampers de ventiladores, pistones, conductores de tablillas, etc.

**Estructural.** Aquí se consideran equipos tales como mirillas, compuertas, tolvas de sistema de cenizas, estructuras de soporte de ductos y tuberías.

Luego de definir los modos de fallo en el contexto operacional es importante también identificar las consecuencias de cada modo de fallo. Pero antes se debe definir el concepto de falla funcional de un equipo, llamaremos en pocas palabras falla funcional al no cumplimiento de una determinada función que realiza un activo en su contexto operacional. En nuestro caso de la caldera un fallo funcional que se da frecuentemente es la pérdida de temperatura en el horno lo que permite que la caldera siga operando, pero de forma no satisfactoria.

A continuación, se presenta un esquema que permite identificar fácilmente las consecuencias de los modos de fallo.



*Ilustración 36 Esquema de Identificación de modos de fallo  
Fuente: Carlos Parra, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*

### Órdenes de trabajo.

Como se observó actualmente las ordenes de trabajo no poseen mayor información más que solo para indicar los recursos humanos requeridos para las actividades y los tiempos asignados para realizar los mantenimientos, por el momento no ayudan a que se pueda ir acumulando información

relevante que nos ayude a generar indicadores, análisis de causa raíz de los problemas que se dan en los equipos de la caldera, cuáles son los modos de falla más repetitivos o cuales son los sistemas que más han intervenidos en mantenimientos correctivos, preventivos, etc. Todo esto ayudaría a la implementación de un RCM para la caldera en menos tiempo. A partir de este punto se propone la modificación en las solicitudes para ordenes de trabajo que se muestra en la Ilustración 37.

The screenshot shows a web form titled "Solicitud de Mantenimiento" with the date "09/03/2020". The form includes several dropdown menus and checkboxes:

- Tipo Orden:** A dropdown menu currently set to "CORRECTIVO". A callout box lists options: "-Correctivo", "-Preventivo", "-Predictivo", and "-Maquinado".
- Prioridad:** A dropdown menu set to "Normal".
- Sistema:** A dropdown menu set to "MECANICA". A callout box lists options: "-Mecánica", "-Taller de Presición", "-Eléctrica", and "-Instrumentación".
- Código Funcional / Equipo:** A text input field.
- Función:** A text input field.
- Equipo Inventario:** A text input field.
- Solicita:** A text input field.
- Descripción Solicitud:** A large text area.
- Checkboxes:** "Causó Paro" and "Causó Paro del Equipo Padre".
- Buttons:** "Aceptar" and "Cancelar" at the bottom.
- Modo de fallo:** A callout box lists options: "-Estatico", "-Rotativo", "-Transmisión", and "-Intercambio de calor".

Ilustración 37 Pantalla modificada de solicitudes de mantenimiento

En este paso de la solicitud de orden de trabajo ya se definió previamente por el supervisor que requiere el mantenimiento qué tipo de orden será, orden correctiva, preventiva, predictiva, etc. También se ha definido previamente desde este paso qué sistema se requiere para la ejecución, si es mecánico, eléctrico, instrumentación, etc. Y lo más importante que también se asigna preliminarmente un modo de fallo, aunque no sea el definitivo, pero sí ya se adelanta con esta información que servirá para adelantar en el mantenimiento y ya va quedando la información almacenada en el sistema. Luego se deberá realizar una revisión final antes de cerrar la orden de trabajo tanto por el planner de mantenimiento como por el supervisor de mantenimiento ya sea mecánico, eléctrico o instrumentación para dictaminar cuál fue en realidad el modo de falla que se intervino en ese mantenimiento.

Vale la pena destacar que para los supervisores que requieran los servicios y tengan acceso para el llenado de la solicitud de orden de trabajo previamente deben recibir la capacitación de RCM para poder identificar modos de falla y tipo de sistema para que desde el llenado de la solicitud de orden de trabajo esto vaya quedando almacenado con la información correcta.

La nueva cultura del mantenimiento está presente desde este momento en el cual se realicen las solicitudes para ordenes de trabajo y nuevamente se debe tener el apoyo de la alta gerencia, superintendencia, mandos medios (supervisores de mantenimiento), técnicos ejecutores para que todo esto marche como se debe y pueda dar los frutos esperados en corto plazo.

A continuación, se muestra en la Ilustración 38 la pantalla que se recomienda para la implementación del RCM de la caldera en la cual ya se visualiza más información de la que se tenía en la orden de trabajo que se mencionó anteriormente.

Ilustración 38 Modificación de pantalla de órdenes de trabajo

Como se observa en la figura anterior luego de llenar la información básica del equipo como lo es código funcional, proceso al cual pertenece el equipo, supervisor que estará a cargo de la reparación ya sea mecánico, eléctrico o instrumentación, etc.; también se tiene ya identificado qué item mantenible es el que se va a intervenir por parte del sistema, modo de falla el cual se selecciona en la siguiente casilla y por último fecha de inicio y finalización. En este punto ya se tiene información muy importante ya que por cada item mantenible intervenido con su modo de falla respectivo se tiene el tiempo de reparación o el tiempo fuera de servicio el cual nos servirá más adelante para generar indicadores que nos ayudarán a determinar la disponibilidad del equipo, así como también la fiabilidad de este.

El objetivo primordial del RCM es incrementar la fiabilidad de los equipos a los cuales es aplicada esta filosofía de mantenimiento. Con base en la información que quedará registrada en las ordenes de trabajo que se vayan cerrando diariamente ya se podría ir obteniendo cierta información que nos ayudará a ir reduciendo los tiempos perdidos o tiempos muertos de los equipos.

Se aprovecha además que el nuevo formato de orden de trabajo nos lleve a conocer los costos asociados en cada orden cerrada, los costos de los repuestos o consumibles que se utilizaron, la cantidad de horas y las personas involucradas nos darán como resultado el costo de mano de obra por el mantenimiento, también sí requirió un mecanizado de una pieza del equipo en taller externo o interno también quedaría registrado, si al final se tuvo que contratar un servicio externo como por ejemplo de balanceo o alineado también quedaría registrado. Para dar el costo total de la orden de trabajo con los item mantenibles que se intervinieron y los modos de falla asociados.

### Bitácoras de mantenimiento.

En época de zafra las jornadas laborales se dividen en 3 turnos de 8 horas cada uno, cada turno tiene un supervisor de mantenimiento y un supervisor de producción asignados. Normalmente el supervisor de mantenimiento se encarga de la supervisión de los mantenimientos que se realizan en toda la planta, mantenimientos mecánicos, eléctricos o de instrumentación. Sumado a esto el supervisor de mantenimiento también está encargado de velar por los cumplimientos de parámetros operacionales de las áreas de calderas y molinos. Hay jefes asignados en cada área que le reportan a dicho supervisor si hay algún problema con equipos, personal o materia prima por los cuales no se llegan a los cumplimientos de los parámetros operacionales. También reportan problemas en maquinaria los cuales se deben asistir para que el ingenio no pare o el área que tiene el problema baje capacidad y afecte las demás áreas asociadas.

Todo lo que sucede en el turno debe quedar registrado. Hace 3 años toda esta información que pasaba en los turnos se anotaba manualmente en bitácoras las cuales eran consultadas por los supervisores de otros turnos, el jefe del área en cuestión y superintendente de planta, actualmente ya se llevan en forma digital, pero con un formato básico que vino a reemplazar nada más un requerimiento de la ISO 9001.

Por el momento se manejan bitácoras de mantenimiento digitales las cuales no ayudan más que para dar seguimiento a lo que quedó pendiente de un turno anterior en determinado mantenimiento de un equipo, es por eso que se sugiere un nuevo formato de bitácoras para que sirvan de base también en la implementación del RCM de la caldera.

Como paso preliminar se debe capacitar al personal de mantenimiento que interviene en cada turno de zafra, tanto supervisores mecánicos, eléctricos e instrumentistas deberán ser capacitados en RCM para poder realizar el correcto llenado y seguimiento de la bitácora.

A continuación, se presenta en la Ilustración 39 el ejemplo de la nueva bitácora que se sugiere aparezca en el sistema de control de mantenimiento.



Zafra : 2019/2020    Equipo :    Supervisor :    Actividad :

Día zafra	Fecha	Turno	Responsable	Sistema
641	05/12/2019	De 06:00 am a 02:00 pm	5 Daniel Gonzalez	Mantenimiento
640	05/12/2019	De 10:00 pm a 06:00 am	151 Luis Ernesto Diaz	Producción
639	05/12/2019	De 10:00 pm a 06:00 am	83 Johana Flores	FABRICA

Archivos    Cargar    Mostrar

No.	Tipo	Nombre
	IMAGEN	

**Actividades realizadas en el turno**

Sup.	Cod. Funcional	Área	Modo de Fallo	Fecha y hora de Inicio	Fecha y hora Fin
5	BMB-21004	CALDERAS	▼ RODAMIENTOS	02/12/2019 10:30	05/12/2019 09:00
			▼ VOLUTA		
151	CTF-36001	REFINERIA	▼ CANASTA	25/11/2019 08:00	27/11/2019 10:00

**Función**

Causa Raíz:    Descripción de conceptos:  
 (F): Físicas  
 (H): Humanas  
 (L): Latentes

Descripción

Condición Final:

**Ordenes de trabajo**

OT	Equipo

Fecha apertura :    **Mostrar detalle**

Ilustración 39 Modificación de pantalla de bitácora en zafra

Como se observó en la figura anterior parte de la información que tiene el nuevo formato de bitácora que se sugiere para la implementación del RCM de la caldera ya ha sido llenado desde la creación y cierre de la orden de trabajo para el mantenimiento requerido en determinado equipo.

Es por eso que se requiere que para cada mantenimiento que se solicite dentro del turno se genere una orden de trabajo, la cual ayudará al final del turno a cada supervisor de mantenimiento en un llenado más rápido de las bitácoras.

Lo nuevo que se muestra en dicha bitácora y que nos ayudará a la implementación del RCM de la caldera es los espacios que tienen que ver con la causa raíz de cada intervención de mantenimiento las cuales preliminarmente se han clasificado en causas físicas, humanas y causas latentes. Esto con el fin de ir almacenando información que luego nos ayudará en los análisis que realizará el equipo multidisciplinario previamente establecido.

También es importante que para las ordenes de trabajo que se asignan a los mantenimientos se defina la condición final en la bitácora para que el supervisor de mantenimiento del turno entrante pueda darle seguimiento si la orden de trabajo sigue en proceso o darle el cierre respectivo si ya están finalizados los trabajos de mantenimiento.

## Índices para la gestión del mantenimiento.

### Disponibilidad

Se puede decir que la disponibilidad se puede ver, como la proporción de tiempo que un equipo se encuentra apto para cumplir su misión, dentro de su contexto operacional, respecto al tiempo que debió haber cumplido su función y no lo hizo. Este período de tiempo antes mencionado se le denomina indisponibilidad.

La disponibilidad relaciona básicamente los tiempos de reparación de los fallos (MTTR - mantenibilidad) y los tiempos operativos entre fallos (TMI, depende de la tasa de fallos - confiabilidad).

### Mantenibilidad

Se puede decir que la mantenibilidad es la probabilidad de que un equipo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir su misión después de tiempo determinado, luego de la aparición de un fallo, utilizando procedimientos de mantenimiento preestablecidos.

La mantenibilidad se relaciona básicamente con el diseño y la complejidad del equipo, con el personal calificado que realice el mantenimiento, con las herramientas disponibles y con los procedimientos de mantenimiento.

El parámetro fundamental para calcular la mantenibilidad lo constituye el tiempo medio de reparación de los fallos (MTTR). Cuando el MTTR de un determinado equipo es alto, se dice que el equipo tiene una baja mantenibilidad (mientras más tiempo duren las reparaciones de las fallas asociadas a un equipo, su mantenibilidad irá disminuyendo). En el caso contrario, de que el tiempo medio de reparación de los fallos de un determinado equipo sea bajo, se dice que el equipo tiene una alta mantenibilidad.

### Confiabilidad

La confiabilidad puede definirse como:

La probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período determinado.

La confiabilidad se relaciona básicamente con la tasa de fallos (cantidad de fallos) y con el tiempo medio operativo (TMO - tiempo medio operativo). Mientras el número de fallos de un determinado equipo vaya en aumento o mientras el TMO de un equipo disminuya, la confiabilidad de este será menor.

## Cálculo de la disponibilidad

De los tres conceptos mencionados anteriormente, la disponibilidad constituye el parámetro cuya información es la más representativa y útil para la gestión del mantenimiento.

El calcular la disponibilidad es más sencillo, en comparación con el cálculo de los otros dos parámetros y relaciona a su vez, a la confiabilidad y a la mantenibilidad.

A continuación, se presenta la forma de calcular la disponibilidad:

Disponibilidad operacional: la disponibilidad operacional es similar a la inherente, solo que esta toma en cuenta el tiempo no operativo del equipo de forma general (desde que el equipo sale de servicio hasta que es otra vez puesto en operación), es decir, que incluye el retraso (más no lo estima ni cuantifica) que trae consigo la logística de las actividades de mantenimiento (compra de repuestos, transportación, tiempo de ocio no determinados, etc.). La ecuación para calcular la disponibilidad operacional (Do) es:

$$Do = \left( \frac{TMO}{TMO+TMI} \right) \times 100\%$$

Dónde:

TMI = MTTR + MTO

TMO: tiempo medio operativo

TMI: tiempo medio de indisponibilidad entre fallos

MTTR: tiempo medio para reparar

MTO: tiempo medio fuera de operación

Do, considera el diseño del equipo, la disponibilidad del personal de mantenimiento, las políticas y procedimientos de mantenimiento y los factores no tomados en cuenta en el diseño de los equipos. La ecuación anterior es utilizada, cuando la gestión de mantenimiento no tiene bien definidos ni los tiempos de reparación (TTR), ni los tiempos relacionados con la logística del mantenimiento (TO).

Para la implementación del RCM en nuestra caldera se sugiere implementar una pantalla en la cual se mida la disponibilidad de los equipos críticos de nuestra caldera y así obtener una mejor idea de cómo mejorar la mantenibilidad y por ende la confiabilidad de los equipos en la Ilustración 40.

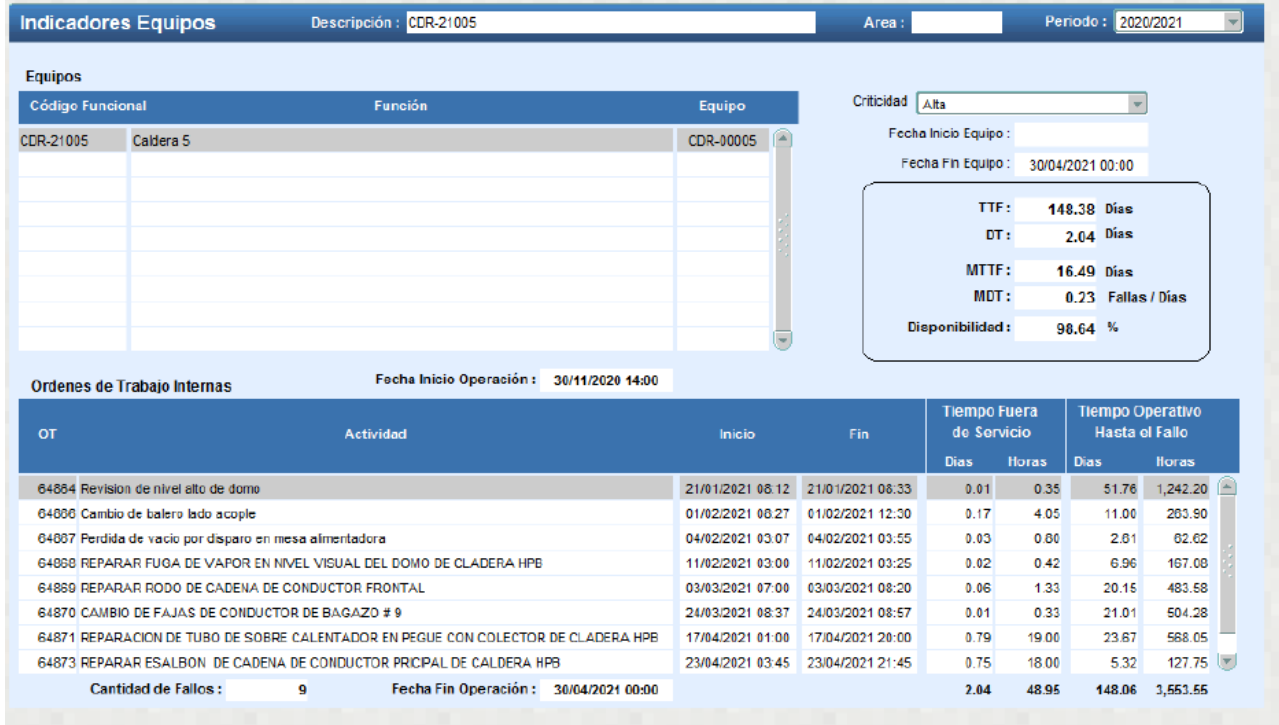


Ilustración 40 Pantalla de disponibilidad de caldera

Actualmente como se muestra en la Ilustración anterior, se lleva como prueba en esta pantalla la disponibilidad del equipo macro de la caldera como tal según los tiempos registrados en la bitácora. Se deberá afinar más este dato para ser más precisos en este cálculo cuando se tenga la modificación tanto en las pantallas de órdenes de trabajo (ilustración 38) y bitácoras de mantenimiento (ilustración 39).

Actualmente en este cálculo se tiene:

TTF: tiempo operativo hasta el fallo.

DT: tiempos fuera de servicio.

MTTF: tiempo promedio operativo hasta la falla

MDT: tiempo promedio fuera de servicio

Hasta este punto se puede observar que nuestro sistema de control del mantenimiento (SCM) actual se puede mejorar en gran cuantía realizando las mejoras que parten de las herramientas que brinda un mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Teniendo todo lo anterior bien establecido para el área de calderas, después se puede reproducir fácilmente a las demás áreas del ingenio, obteniendo así reducciones en los costos de

mantenimiento, reducción en tiempos perdidos, incrementos en la producción y por ende mejor rentabilidad en la planta.

Para la implementación de todos estos puntos podemos asegurar que no se tendrá que realizar una inversión que incremente los costos del mantenimiento de la caldera arriba de un 20% del valor actual y que con la implementación del RCM en la caldera estaríamos incrementando las utilidades de la empresa, afectando los estados de resultados del ingenio de forma positiva.

En la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad para la caldera también se agrega valor al recurso humano quién ganará conocimientos y experiencias que elevarán notablemente su productividad laboral. Esto también ayudará a que los técnicos y también a los ingenieros que se vean comprometidos con este fin, que puedan ir avanzado dentro de la empresa dándose a conocer en nuevos roles o asignaciones.

Aún con lo desarrollado en el sistema de control de mantenimiento para la planta junto con la implementación del RCM de la caldera, consideramos que los resultados de estos, no se podrán ver hasta dentro de unos tres años aproximadamente, esto debido a que nuestros procesos no tienen una ejecución continua y solo contamos con los meses de noviembre a abril para afinar los detalles que surjan durante el proceso, y no como otras empresas las cuales en dieciocho meses podrán ver resultados ya que tienen la ventaja de un proceso de producción continuo de doce meses.

A continuación, se propone un cronograma para las principales etapas en la implementación.

1. Reunión para presentación del proyecto con superintendencia ingenio para su aprobación.
2. Selección del equipo para implementar el RCM de la caldera.
3. Capacitación RCM (equipo RCM).
4. Capacitación RCM (Personal de mantenimiento de caldera).
5. Reunión de seguimiento equipo RCM.
6. Creación de módulos para el sistema de control de mantenimiento (SCM) (equipo RCM e IT).
7. Prueba piloto de módulos RCM en área de calderas.
8. Retroalimentación y modificaciones en módulos en los cuales se encuentren problemas o que se descubran incompatibilidades con los módulos preestablecidos.
9. Seguimiento en modificaciones de módulos RCM.

Actividad	Duración	Fecha Inicio	Fecha Fin	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
Reunion para presentación del proyecto con superintendencia ingenio para su aprobación	14días	17-ene	31-ene																																																																
Selección del equipo para implementar el RCM de la caldera	27días	01-feb	28-feb																																																																
Capacitación RCM (equipo RCM)	12días	01-mar	13-mar																																																																
Capacitación RCM (Personal de mantenimiento de caldera)	17días	14-mar	31-mar																																																																
Reunion de seguimiento equipo RCM	364días	01-abr	31-mar																																																																
Creación de modulos para el sistema de control de mantenimiento(SCM) (equipo RCM e IT)	183días	01-may	31-oct																																																																
Prueba piloto de modulos RCM en area de calderas	91días	01-nov	31-ene																																																																
Retroalimentación y modificaciones en modulos en los cuales se encuentren problemas o que se descubran incompatibilidades con los modulos preestablecidos	42días	01-feb	15-mar																																																																
Seguimiento en modificaciones de modulos RCM	23días	16-mar	08-abr																																																																
Cierre	6días	09-abr	15-abr																																																																

Ilustración 41. Cronograma de implementación de RCM

## Capítulo 16 Recomendaciones

- En el presente trabajo se ha analizado el mantenimiento de la caldera de alta presión de lecho fluidizado. Ya que es una de las 2 calderas con las que cuenta el ingenio las cuales generan el mayor ingreso económico por medio de la venta de energía eléctrica. Es por esta razón que se vuelve crítico que dicha caldera tenga una alta disponibilidad y por ende tenga la mayor confiabilidad posible.
- Se recomienda hacer la revisión de los módulos del sistema de control de mantenimiento actual ya que de no ser aprobado el proyecto de implementación del RCM para la caldera, existen puntos de mejora en los cuales se puede ganar terreno mientras llega el momento de invertir en dicho proyecto.
- El mantenimiento centrado en confiabilidad de la caldera afectará directamente en los costos totales del mantenimiento de manera positiva reduciendo costos e incrementando la disponibilidad. Por lo tanto, se recomienda implementar esta metodología de mantenimiento lo antes posible brindando a los accionistas y gerencias el beneficio de este tipo de mantenimiento.
- Realizar una revisión de los planes de mantenimiento de los componentes principales de dicha caldera los cuales al tener muchos modos de falla afectan en gran manera al funcionamiento y confiabilidad del equipo. Incluso sin tener aun el RCM implementado a un 100% esto garantizará una mejora en los indicadores principales de gestión del mantenimiento.

## Capítulo 17 Conclusiones

- La matriz de criticidad permite enfocar los recursos a los equipos que más impactan en el proceso de la caldera bagacera, y realizar métodos como ACR y RCM que nos permitan alcanzar un nivel de confiabilidad requeridos por la organización.
- Gracias a la auditoria de mantenimiento, podemos concluir que tenemos 3 pilares los cuales se deben mejorar, que son los procesos de asignación de recursos, análisis de costos de ciclo de vida y planes de mejora continua, donde se tiene una buena oportunidad de mejora.
- También podemos concluir que, en cuanto a la organización de mantenimiento, es fundamental enfocarse indiscutiblemente en los indicadores de desempeño de mantenimiento; para ello primero debemos analizar la utilidad de los indicadores actuales y determinar si estos están alineados con los objetivos y estrategias de mantenimiento y la alta dirección.
- Debido a las amenazas latentes, es importante la implementación de los análisis de confiabilidad para poder reducir costos y aumentar la disponibilidad de equipos críticos.
- De los resultados obtenidos del FMECA para los equipos críticos se concluye que no se están tomando las mejores decisiones en cuanto a las acciones de mejora, basados únicamente en el aspecto técnico y no cuantificando la parte económica la cual nos da una mejor idea del impacto de los modos de fallas asociados.
- Para la implementación es importante mencionar que se debe generar una cultura distinta del mantenimiento que viene en cascada desde la alta gerencia hasta los puestos operativos, quienes son los que ejecutan; así como también la capacitación previa a los puestos involucrados y la creación de los equipos de trabajo quienes darán el seguimiento a las etapas para el establecimiento del RCM de la caldera y luego hacer el símil para las demás áreas del Ingenio.



## Capítulo 18 Referencias

- Carlos Alberto Parra Márquez, Adolfo Crespo Márquez. (2012). Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad Aplicada a la Gestión de Activos. Sevilla, España: Ingeman.
- Carlos Alberto Parra Marquez. (2009). Mantenimiento Centrado En La Confiabilidad (MCC). Sevilla, España: Igeman
- Adolfo Crespo Márquez, Pedro Moreu De León. (2004). Ingeniería de Mantenimiento, Tecnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos. España: Aenor.
- Santiago Garcia Garrido. (2003). Organización y Gestión Integral de Mantenimiento. Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos SA.
- Pérez, J. (2012). El Camino Hacia el RCM. Obtenido de <http://confiabilidad.net/articulos/el-camino-hacia-el-rcm/>
- Poveda, G. (2011). Aplicación de la Metodología Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el Desarrollo de Planes de Mantenimiento. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20586/1/Articulo%20CIC%20YT%20APOVEDA%20RCM.pdf>
- Troffé, M. (2011). Análisis ISO 14224/Oreda. Relación con RCM-FMEA. Obtenido de <https://pdfcookie.com/documents/norma-iso-14224-wrvr64yxd7vo>
- Montilla, M., Arroyave, J.F., & Silva, M.C.E. (diciembre de 2007). Caso de Aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, Previa Existencia Mantenimiento Preventivo.
- Moubrai, J. (2004). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. RCM II. Madrid: Biddles Ltd, Guildford and King's Lynn.