

FORMULACIÓN DE UN PLAN ESTRATÉGICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN CALENTADORES DE HIDROCARBURO EN ESTACION DE RECOLECCIÓN, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO PROACTIVO “ANÁLISIS CAUSA RAÍZ” (RCA) Y PREVENTIVA “INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO” (RBI).

VICENTE ALEXANDER CHAPARRO RINCON

YIMER ALEXANDER OVALLE BAYER



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ASEDUIS BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

BUCARAMANGA

2017

FORMULACIÓN DE UN PLAN ESTRATÉGICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN CALENTADORES DE HIDROCARBURO EN ESTACION DE RECOLECCIÓN, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO PROACTIVO “ANÁLISIS CAUSA RAÍZ” (RCA) Y PREVENTIVA “INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO” (RBI).

VICENTE ALEXANDER CHAPARRO RINCON

YIMER ALEXANDER OVALLE BAYER

**Monografía de grado para optar al título de
Especialistas en Gerencia de Mantenimiento**

Director del Proyecto:

WILSON YESID RODRÍGUEZ PEDRAZA

Ingeniero Electrónico.

Especialista en Procesos Productivos, Electrónica e Hidrocarburos.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ASEDUIS BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A Dios, a la Virgen María y al niño Jesús por ser mis maestros primordiales para alcanzar esta meta que culmina.

A mi esposa Andrea por ser un apoyo constante, por ser un pilar que esta con sus contantes soportes en el área familiar, amistoso y laborar; todo el valor que ha tenido para poder criar a nuestro más grande tesoro que es nuestro hijo Juan José, a él doy muchas gracias porque ha sido mi más grande impulso y lo seguirá siendo.

A mis padres Carmen y Pablo quienes gracias a su entrega incondicional, a su apoyo constante, su dedicación, su sacrificio, y sobre lo más apreciado el amor maternal y paternal que ha sido constante, puedo decir que gracias a sus concejos he aprendido a valorar lo que me rodea.

A mis amigos también porque con ellos hemos tropezado y del mismo modo hemos logrado muchas metas.

Yimer Alexander Ovalle Bayer

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Wilson Yesid Rodríguez Pedraza por el apoyo y la experiencia brindada para desarrollar este trabajo. A los profesores de la Universidad Industrial de Santander, quienes con su gran experiencia y conocimiento nos brindaron la posibilidad de abrir nuestras puertas de espíritu investigador con el propósito de brindarnos bases para los conocimientos necesarios de desarrollar esta monografía.

Por último y no menos importante nuestro grupo de compañeros del cohorte XXVII de la sede de Bogotá, de quienes compartimos y aprendimos muchas cosas de las experiencias vividas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN LOS CALENTADORES DE LA ESTACIÓN.....	22
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	22
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	24
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.4 JUSTIFICACIÓN	26
2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA) – ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.....	27
2.1.1 PASOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO RCA.	27
2.1.2 EL USO Y EL BENEFICIO DEL RCA.	29
2.2 RISK BASED INSPECTION (RBI) – INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO	29
2.2.1 OBJETIVOS FUNDAMENTALES DEL RBI.....	31
2.2.2 FORMA DE MEDIR EL RIESGO Y LA FRECUENCIA DE FALLA.	31
2.2.3 METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA RBI.	34
2.3 HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE MANTENIBILIDAD DE EQUIPO ESTÁTICO	35
2.3.1 HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA).....	35
2.3.2 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LOS CALENTADORES.	35
3. DESARROLLO DE TRABAJO.....	36
3.1 “ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ” RCA. MÉTODO CUALITATIVO.....	37
3.1.1 FASE 1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA EN LOS CALENTADORES DE LA ESTACIÓN.....	39
3.1.1.1 FASE I. PASO 1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	39
3.1.1.2 FASE I. PASO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	41
3.1.2 FASE II. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ EN LOS CALENTADORES DE LA ESTACIÓN.....	42
3.1.2.1 FASE II. PASO 3. ANÁLISIS DE CAUSAS POSIBLES “LLUVIA DE IDEAS”. 42	

3.1.2.2 FASE II. PASO 4. ANÁLISIS DE CAUSAS PROBABLES “DIAGRAMA CAUSA EFECTO”	43
3.1.3 FASE III. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	44
3.1.3.1 FASE III. PASO 5, VERIFICACIÓN DE CAUSA RAÍZ.....	44
3.1.3.2 FASE III. PASO 6. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES Y ENTREGABLES. 45	
4. ANÁLISIS DE RIESGO BASADO EN INSPECCIÓN RBI.....	49
4.1 VALORACIÓN DE RIESGO.....	50
4.1.1 ANÁLISIS DE CONSECUENCIA DE FALLAS COF.....	51
4.1.2 ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE FALLA POF.....	55
4.1.3 RESULTADOS DE RBI.....	56
4.2 PLAN DE INSPECCIÓN	59
5. RESULTADOS	61
6. CONCLUSIONES	66
7. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Calentador típico de Estación.....	22
Fotografía 2. Sistema de combustión y chimeneas.....	23
Fotografía 3. Deformación de tubos de fuego en los calentadores	40
Fotografía 4. Deformación de tubos de fugo en calentadores	40

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagramas de Calentadores de fuego directo de la estación	23
Ilustración 2. Matriz de criticidad para la aplicación de RBI	32
Ilustración 3. Configuración típica de un calentador de fuego directo de crudo.....	50

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Pasos para determinar la Frecuencia de Falla	33
Diagrama 2. Bloques de desarrollo de trabajo.....	36
Diagrama 3. Árbol lógico para desarrollo del RCA de los calentadores de fuego directo... 	38
Diagrama 4. Bloques para desarrollar la RBI de calentadores	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formulario Reporte de incidente. Fase I. Paso 1	39
Tabla 2. Formulario de Descripción del Problema.....	41
Tabla 3. Formulario de lluvia de Ideas	42
Tabla 4. DIAGRAMA CAUSA-EFECTO: Análisis de causas posibles y Validación de hechos y datos (Causas probables)	43
Tabla 5. Paso 5. Formulario de Verificación de causa raíz.....	46
Tabla 6. Paso 6. Formulario de planteamiento de soluciones al problema	48
Tabla 7. Segmentación del calentador	51
Tabla 8. Matriz de consecuencias de falla de un calentador de crudo.....	54
Tabla 9. Consolidado de Consecuencias de los segmentos del calentador.....	55
Tabla 10. Frecuencias de falla establecidas para los calentadores	55
Tabla 11. Frecuencia de falla de calentadores.....	56
Tabla 12. Matriz de valoración de Riesgo	58
Tabla 13. Resultados de Riesgo de Calentador de fuego directo	59
Tabla 14. Mecanismos de Falla susceptibles en calentadores	60
Tabla 15. Resultado de Riesgo de cada componente del calentador	63
Tabla 16. Plan de inspección.....	64

ANEXOS

ANEXO A. Matriz de Desarrollo del RCA en CALENTADORES	73
ANEXO B. PLANTILLA RBI CALENTADORES.....	82

GLOSARIO

Causas de Falla: Factor que originó una falla o avería.

Deshidratación de Crudos: proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre.

Disponibilidad: Indicador de mantenimiento, que corresponde al porcentaje del tiempo que un equipo o ubicación técnica está disponible para la operación.

Equipo: Medio físico utilizado para prestar un servicio a la materia prima y/o un requerimiento.

Inspección: Examinar, verificar y/o establecer condiciones y estados de un equipo.

Panorama de Riesgos: Proceso para reconocer la existencia de un peligro y definir sus características.

Procedimiento: Una manera especificada de efectuar una actividad.

Proceso: Un conjunto de recursos y actividades interrelacionados que transforma entradas en salidas.

RBI: Risk Based Inspection; estrategia de gestión tecnológica que identifica, evalúa y realiza un tamizaje de los riesgos industriales partiendo del estudio de la integridad de los equipo.

RCA: Root Cause Analysis; herramienta utilizada para identificar causa de falla, de manera de evitar sus consecuencias.

Riesgo: Combinación de la probabilidad y la(s) consecuencia(s) de que ocurra un evento peligroso específico.

RESUMEN

TITULO: FORMULACIÓN DE UN PLAN ESTRATÉGICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN CALENTADORES DE HIDROCARBURO EN ESTACION DE RECOLECCIÓN, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO PROACTIVO “ANÁLISIS CAUSA RAÍZ” (RCA) Y PREVENTIVA “INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO” (RBI).¹

AUTORES: VICENTE ALEXANDER CHAPARRO RINCON
YIMER ALEXANDER OVALLE BAYER²

PALABRAS CLAVES: RCA, RBI, (BS&W), Deshidratadores de Crudo, Plan estratégico de Mantenimiento.

CONTENIDO:

En la estación de recolección de hidrocarburos de los llanos orientales se procesa crudo extra pesado el cual posee alta viscosidad, altos porcentajes de contenido de agua (BS&W) y densidades altas debido a las características naturales del yacimiento explotado³. Para el tratamiento este crudo extra pesado, la estación cuenta con facilidades de deshidratación conformado por sistemas de dilución con nafta (inyección) y calentamiento por transferencia de calor (calentadores de fuego directo) con el fin de suministrar propiedades adecuadas al crudo

¹ Monografía de Grado.

² Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

³ Manual de Operación Estación Chichimene. SCC-5205306-12202-ST-PRO-MT-201-0. Ecopetrol S.A.

que permitan una apropiada separación (Agua-Aceite-Gas), lo cual contribuye a la agilidad en el proceso, transporte y optimización de la calidad del crudo (grado API⁴).

Actualmente, la estación de producción de los llanos orientales cuenta con 6 calentadores operando continuamente, los cuales dentro de su vida útil de servicio han presentado fallas recurrentes, interrumpiendo parcialmente el volumen de producción de la estación, generando diferidas e incrementando los costos asociados a reparaciones por emergencias (mantenimiento reactivo) y costos por mantenimiento programado, lo cual incide en la rentabilidad del negocio.

Teniendo en cuenta lo anterior y pretendiendo obtener una mejor disponibilidad de estos equipos (calentadores), se ha formulado un plan estratégico de inspección para el mejoramiento de la gestión de mantenimiento de los calentadores de la estación de recolección, apoyado en la herramienta de confiabilidad como Análisis de Causa Raíz “RCA” e Inspección Basada en Riesgo “RBI” las cuales permitirán establecer las causas recurrentes de las fallas e instaurar rutinas de mantenimiento preventivo que reducen fallas y reaparición del mal factor, optimizando los rubros destinados a su mantenibilidad del equipo y los tiempos de Stand by, de esta manera aumentar la confiabilidad de los equipos.

⁴ American Petroleum Institute.

ABSTRACT

TITLE: FORMULATION OF A STRATEGIC PLAN FOR THE IMPROVEMENT OF MAINTENANCE MANAGEMENT IN HYDROCARBON HEATERS IN COLLECTION STATION, BY COMBINATION OF PROACTIVE MAINTENANCE METHODOLOGIES "CAUSE ROOT ANALYSIS" (RCA) AND PREVENTIVE "RISK-BASED INSPECTION" (RBI).⁵

AUTHORS: VICENTE ALEXANDER CHAPARRO RINCON
YIMER ALEXANDER OVALLE BAYER⁶

KEYWORDS: RCA, RBI, Crude Dehydrators, Strategic Maintenance Plan.

CONTENT:

Extra heavy crude is processed at the hydrocarbon collection station of the eastern plains, which has high viscosity, high water content (BS & W) and high density due to the natural characteristics of the exploited reservoir. For the treatment of this extra heavy crude, the station has dehydration facilities made up of naphtha (injection) dilution systems and heat transfer heating (direct fire heaters) in order to provide adequate oil properties that allow an adequate (Water-Oil-Gas), which contributes to the agility in the process, transport and optimization of crude oil quality (API grade).

⁵ Monography.

⁶ School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization.

Currently, the East Plains production station has six continually operating heaters, which within its service life have experienced recurrent faults, partially interrupting the production volume of the station, generating deferrals and increasing costs associated with repairs for emergencies (reactive maintenance) and costs for scheduled maintenance, which affects the profitability of the business.

In view of the above and in order to obtain a better availability of these equipment (heaters), a strategic plan has been formulated for the improvement of the maintenance management of the heaters of the collection station, supported by the reliability tool such as "RCA" Root Cause Analysis and Risk Based Inspection "RBI", which will establish the inherent causes of the failures and establish preventive maintenance routines that reduce faults and reappear the bad factor, optimizing the items destined to the maintenance of the equipment and The times of inoperative, in this way increase the reliability of the equipment.

INTRODUCCIÓN

Las estrategias y tácticas en el mantenimiento industrial están cada vez dirigidas a la optimización y ajuste de los rublos destinados a la mantenibilidad de los activos, este es el caso de las industrias productoras de petróleo las cuales se han visto afectadas por la sobreproducción de crudo en los mercados internacionales⁷ (disminución del valor del barril) y han establecido metas afanosas en reducción de gastos de mantenimiento y la optimización los procesos de producción, con el fin de recuperar ingresos y/o reducir pérdidas debido a la baja del precio del barril de crudo el año inmediatamente anterior⁸.

En el caso particular, la estación de los llanos orientales posee un sistema de producción de aproximadamente 75.000 barriles diarios de crudo (Bpd), de los cuales, 6 calentadores de fuego directo se encargan de procesar 12.000 barriles diarios cada uno, estos equipos cumple la función principal de transferir energía en forma de calor para la adecuación del producto en la liberación de agua en los pasos subsiguientes del proceso de la planta. Durante la vida útil, estos equipos han presentado fallas recurrentes, lo cual conlleva una disminución en los compromisos volumétricos de producto (diferidas), disminución de rentabilidad del negocio y la desviación de la filosofía global de reducción de costos de mantenimiento en el actual período de crisis que afronta la industria del petróleo.

Estos calentadores han sido identificados como equipos críticos debido a la importancia de producción y la recurrencia de las fallas, por lo cual se pretende realizar formulación de un plan

⁷ http://www.opec.org/opec_web/en/

⁸ <http://www.portafolio.co/economia/gobierno/precios-petroleo-afectan-colombia-155044>

estratégico para el mejoramiento de la gestión de mantenimiento de los equipos utilizando dos herramientas del mantenimiento (RCA y RBI) que permitan analizar, deducir e identificar los malos factores, igualmente clasificar los elementos que presenten altos riesgo de operación y sobre los cuales enfocar los esfuerzos y recursos de las actividades de inspección y mantenimiento, permitiendo así la reducción de la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados y corrigiendo las causas raíz que evitaría la reaparición del defecto o problema en todos los calentadores, este plan de inspección permitirá conocer el comportamiento de los mecanismos de degradación que afectan el equipo y que puede conducir, si no están plenamente identificados y caracterizados, a una falla catastrófica del equipo.

La presente monografía mostrará la combinación de dos herramientas de mantenimiento proactivo y preventivo las cuales tiene como fin la búsqueda de soluciones del problema, evitar reaparición del mal factor y gestionar un plan inspección estratégico para el mejoramiento de la confiabilidad de los calentadores de la estación de hidrocarburos con el propósito de tener un proceso más efectivo y eficiente.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN LOS CALENTADORES DE LA ESTACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La filosofía de operación de los calentadores de fuego directo consiste en operar los 6 calentadores con carga repartida del total de crudo que ingresa a tratamiento en la estación. Por la demanda de producción, no se tiene equipo de respaldo en caso de falla de un equipo. La función de estos calentadores es aumentar la temperatura del crudo desde 120°F hasta 170°F que permite ajustar la viscosidad. Tres de los seis calentadores son duales es decir pueden operar con gas o crudo como fluido combustible y los otros tienen la facilidad única de gas combustible, llegado el caso de presentarse un evento donde no haya disponibilidad de gas, se direcciona a los otros calentadores y se trabaja con combustible líquido. En la fotografía 1 y 2 se presenta la configuración típica de un calentador de la estación.

Fotografía 1. Calentador típico de Estación

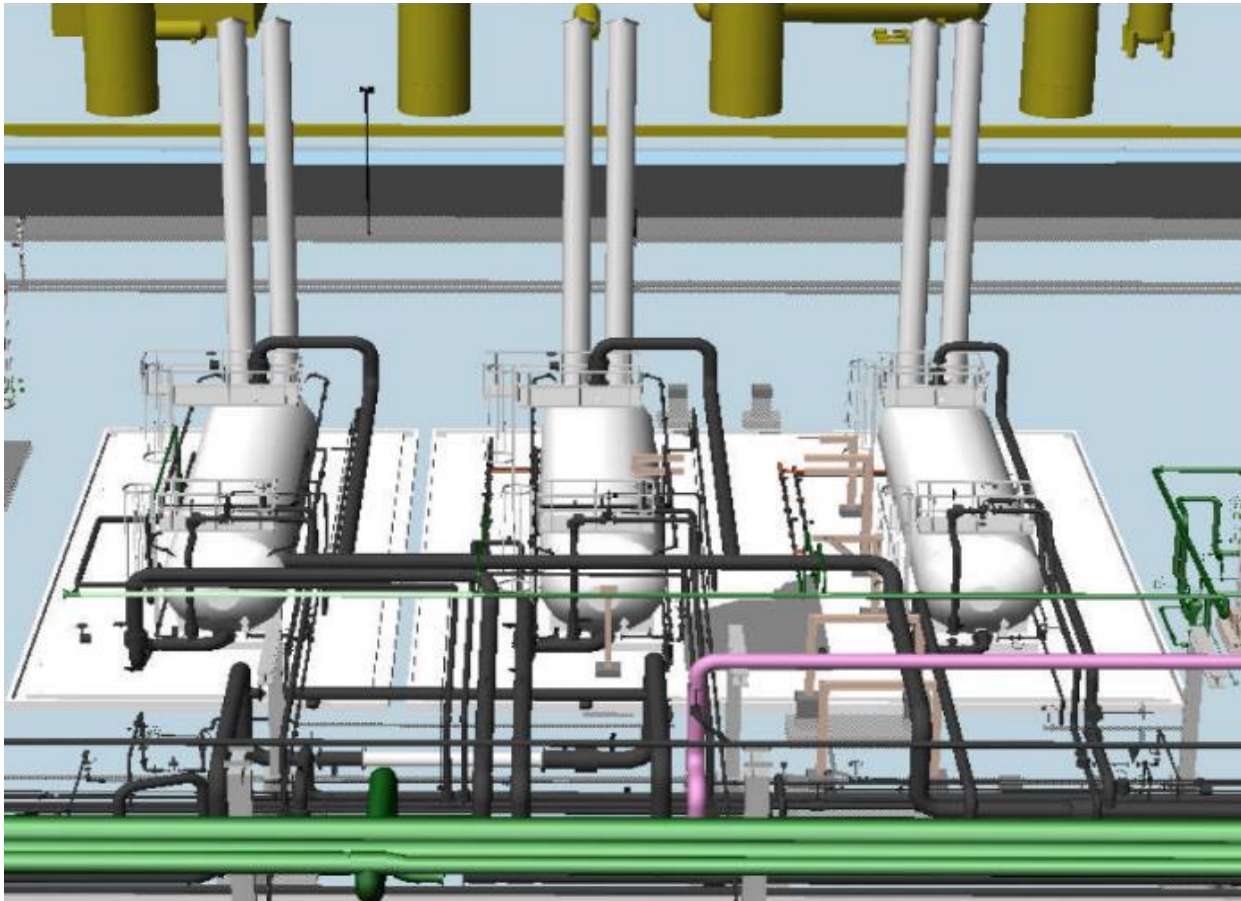


Fotografía 2. Sistema de combustión y chimeneas.



Fuente: Manual de Operación Estación Chichimene. SCC-5205306-12202-ST-PRO-MT-201-0.

Ilustración 1. Diagramas de Calentadores de fuego directo de la estación



En la ilustración 1 se presenta el esquema y distribución de los calentadores de fuego directo; estos calentadores cuentan con cierre de válvulas y parada de suministro de combustible, por señal de alta – alta presión y baja – baja presión en el suministro de gas y/o crudo y adicional por bajo nivel en el tanque de compensación. Para dar la distribución del flujo de alimentación a cada uno de los seis calentadores se utilizan lazos de control compuestos por medidores de flujo ultrasónicos que envían la señal al controlador y éste a su vez actúa sobre las válvulas de control, las cuales regulan el caudal que entra a cada calentador.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La estación de recolección de hidrocarburo de los llanos orientales cuentan con sistemas de producción para la deshidratación del crudo extra pesado, conformado por equipos de disolución y calentamiento, los cuales permiten obtener propiedades del crudo (densidad y viscosidad) para agilidad en el proceso, en el transporte y optimización del crudo (grado API).

Para poder llevar a cabo lo anterior, el hidrocarburo debe pasar por un proceso de transferencia de calor por conducción, a través de un equipo denominado calentador de fuego directo (Hot-Oil) cuyo uso es indispensable en la fase de deshidratación y disponibilidad continua. La función de estos calentadores es aumentar la temperatura del crudo desde 120°F hasta 170°F que permite ajustar la viscosidad.

La estación de los llanos orientales cuenta con 6 calentadores operando continuamente, los cuales en su vida de servicio han presentado fallas recurrentes, interrumpiendo parcialmente el volumen de producción de la estación, generando diferidas e incrementando los costos asociados

a reparaciones por emergencias (mantenimiento reactivo) que costos por mantenimiento programado, lo cual incide en la rentabilidad del negocio.

El programa de mantenimiento que se usa actualmente no es aplicado estrictamente ya que se presentan demandas elevadas de producción (compromisos volumétricos) por encima de la capacidad de operación de los 6 calentadores, sin permitir el retiro de operación para su intervención y al desconocer cualquier equipo tiene un mayor riesgo de falla por acumulación de horas de operación, elevando así la probabilidad por fatiga y mala operación.

Con lo anterior, se desea formular un plan estratégico para el mejoramiento de la gestión de mantenimiento de los calentadores de la estación de recolección de hidrocarburos, apoyado en la herramienta de confiabilidad de Inspección Basada en Riesgo (RBI), la cual permite establecer rutinas de mantenimiento preventivo que reduzca las fallas catastróficas, priorizar su intervención según su riesgo y optimiza los rubros destinados a su mantenibilidad, de esta manera aumentar la confiabilidad de estos equipos.

1.3 OBJETIVOS

➤ **Objetivo General:**

Formular un plan mantenimiento predictivo para los calentadores de la estación de recolección de hidrocarburos, apoyado en la herramienta de confiabilidad de Análisis Causa Raíz (RCA) e Inspección Basada en Riesgo (RBI).

- **Objetivos Específicos:**
 - ✓ Realizar análisis casusa raíz (RCA) a fallas de calentadores de la estación.
 - ✓ Establecer la probabilidad de falla de los calentadores.
 - ✓ Hacer un análisis cualitativo del nivel de riesgo de los Calentadores.
 - ✓ Hacer una matriz de riesgo y análisis de consecuencias.
 - ✓ Formular un plan de inspección.
 - ✓ Proponer soluciones que eviten la apreciación del mal factor determinado en el RCA.
 - ✓ Identificar los aspectos a mejorar en las áreas claves en la gestión de mantenimiento y operación de los calentadores.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La rentabilidad de una planta de producción de hidrocarburos depende de la disponibilidad de los equipos que lo conforma y su óptima operación. Esta disponibilidad obedece al buen mantenimiento que se aplique y que su gestión sea apalancada desde la organización de la empresa como una filosofía de integridad mecánica.

La finalidad de este trabajo se encamina a proponer una estrategia de mantenimiento basado en herramientas de confiabilidad operacional que eleve la disponibilidad de los calentadores y reduzca los costos por emergencias y por ende aumente las rentabilidad del negocio. Logrando aumentar así la vida útil de estos equipos y cumpliendo con una de las tareas más significativas de la gerencia de mantenimiento.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA) – ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

Cuando existe una falla, ésta se percibe con diferentes manifestaciones o síntomas en el equipo, no así sobre la causa de la falla; esto conlleva en varias oportunidades a interactuar sobre las consecuencias y no sobre la raíz del problema, haciendo que la falla vuelva a repetirse varias veces; identificar la causa raíz es fundamental pero por si sola no resuelve nada, por ello hay que estudiar varias acciones para corregir, la cual utiliza la lógica sistemática y el árbol de causa raíz de fallas, usando la deducción y la verificación de los hechos que conducen a las raíces originales. El RCA es una herramienta que identifica la causa de la falla, de manera que evita las consecuencias. El RCA es una técnica que combinada con métodos de medición de fallas cuantitativo, se convierte en una herramienta para la eliminación de malos actores, buscando de forma rápida y eficaz la solución de problemas cotidianos y evitar la repetición de eventos. Con la eliminación de estos defectos “malos actores” se obtiene una mayor confiabilidad en el proceso de producción por la disminución en el número de fallas.

2.1.1 Pasos para la aplicación del método RCA.

Para realizar el RCA se debe contemplar más allá de los componentes físicos, se debe analizar las acciones humanas que conllevan a la cadena causa – efecto que llevó al daño físico, lo cual implica analizar por qué sucedió la falla, si sucedió a procedimientos incorrectos, a equivocaciones o falta de capacitación.

- ❖ Describir el evento de la falla: Analizar las fallas para encontrar procesos críticos, lo cual es una aplicación reactiva.
- ❖ Describir los modos de falla: Analizar las fallas recurrentes de equipos o procesos críticos, lo cual es una aplicación proactiva.
- ❖ Listar las causas potenciales de falla y verificar: Analizar los modos de falla y sus efectos, el cual es también utilizado en el RCM.
- ❖ Determinar y verificar las Causas Raíces físicas.
- ❖ Determinar y verificar las Causas Raíces Humanas: Analizar los errores humanos, en el proceso de diseño y aplicación de procedimientos.
- ❖ Determinar y verificar las Causas Raíces del Sistema: Analizar los accidentes e incidentes, en sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional.⁹

El análisis de Causa Raíz es un proceso de deducciones lógicas que permite graficar las relaciones causa-efecto que nos conducen a descubrir el evento indeseable o causa raíz, preguntándonos:

- ✓ ¿Cómo? es la forma que puede ocurrir una falla.
- ✓ ¿Por qué? o cuales son las causas de la misma.

⁹ El Análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la Confiabilidad. <<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/causaraizaltmann.pdf>>.

2.1.2 El uso y el beneficio del RCA.

Los hechos deben respaldarse mediante observación directa, documentación y deducciones científicas. Se utilizan gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema y datos disponibles:

- ✓ Análisis causa-efecto.
- ✓ Árbol de fallo.
- ✓ Diagrama de espina de pescado.
- ✓ Software de RCA que ayudan a la construcción del árbol de fallos y a la documentación del proceso.

Los beneficios de la aplicación de ésta herramienta son:

- ✓ Reducción del número de incidentes o fallas.
- ✓ Aumento de la Confiabilidad y Seguridad.
- ✓ Disminución de los costos de Mantenimiento.
- ✓ Aumento de la Eficiencia y la Productividad.

2.2 RISK BASED INSPECTION (RBI) – INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO

La metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI) es una estrategia tecnológica que identifica, evalúa y realiza un tamizaje del nivel de riesgo de cada componente estático de una instalación, con referencia en el presente trabajo se profundizará en lo relacionado a los 6

calentadores de la estación de los llanos orientales. El nivel de riesgo es evaluado a través del cálculo de la frecuencia de falla de cada calentador como una función directa de los mecanismos de daño que puedan atacar a cada equipo y del cálculo de las consecuencias económicas en términos de los daños al personal, la instalación, medio ambiente y pérdidas de producción de la estación. El valor del riesgo obtenido para cada calentador es utilizado para realizar una jerarquización e identificar las áreas de mejora y de oportunidad para el diseño y aplicación de una estrategia de inspección. Uno de los indicadores utilizados es el riesgo financiero ya que este es el que más pesa en el balance económico de una empresa.

Esta metodología a utilizar tiene como fundamento lo establecido en el documento del Instituto Americano del Petróleo **API RP-580**¹⁰ “Risk Based Inspection”, el cual define los pasos para desarrollar una evaluación de riesgo, cuyo fin principal es el de obtener un Plan de Inspección, enfocado a los calentadores que representen un mayor nivel de riesgo para la seguridad de una estación.

La metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI) se define como un proceso de evaluación y administración del riesgo enfocado en los modos de falla o mecanismos de daño específico¹¹, aplicable a los calentadores de la planta, en este caso se acompañara este punto con la aplicación de un análisis causa raíz (RCA) con el fin de determinar los malos factores que intervienen en las fallas de estos equipos.

¹⁰ API RP 580. Risk based Inspection. Third Edition 2016.

¹¹ API RP 573. Inspection of Fired Boilers and Heaters Second Edition 2003.

2.2.1 Objetivos Fundamentales del RBI.

- ❖ Mejora la relación costo beneficio en las actividades de inspección y mantenimiento.
- ❖ Permite cuantificar la reducción del riesgo como consecuencia de las buenas prácticas de inspección.
- ❖ Reducir el riesgo debido a las fallas de alta consecuencia.
- ❖ Proporciona una metodología sistemática para identificar los factores críticos que contribuyen a la ocurrencia del riesgo.
- ❖ Proporciona una base administrativa para la transferencia de recursos de equipos de menor riesgo a equipos de riesgo mayor.
- ❖ Permite establecer niveles de “riesgo aceptable”.
- ❖ Permite evaluar el efecto de los cambios en operaciones y procesos que afectan la integridad de los equipos.

2.2.2 Forma de Medir el Riesgo y la Frecuencia de Falla.

El riesgo es la combinación de Frecuencia de Falla y Consecuencia. Una manera cualitativa de clasificar el nivel de riesgo de un activo es por medio de la matriz de criticidad del riesgo que se presenta en la ilustración 2. En esta matriz se han establecido varios niveles de criticidad, para identificar los niveles se utilizó las siguientes letras: (E) Extremo, (A) Alto, (MA) Medianamente Alto, (M) Medio, (B) Bajo y (D) Despreciable.

Ilustración 2. Matriz de criticidad para la aplicación de RBI

		CRITICIDAD					
PROBABILIDAD	E	MA	MA	A	E	E	
	A	M	MA	MA	A	E	
	M	M	M	M	MA	A	
	B	B	B	M	MA	MA	
	D	D	B	M	M	MA	
FRECUENCIA	D	B	M	A	E		

Fuente. Pablo Hernández Arango, Octubre/2012, INSPECCION BASADA EN RIESGO: GENERALIDADES Y UN CASO PRÁCTICO, No. 111; <http://www.indisa.com/indisaonline/antiores/Indisa%20On%20line%20111-%20%20INSPECCION%20BASADA%20EN%20RIESGO%20GENERALIDADES%20Y%20UN%20CASO%20PR%C3%81CTICO.pdf>.

El nivel de riesgo es determinado de acuerdo con la ecuación:

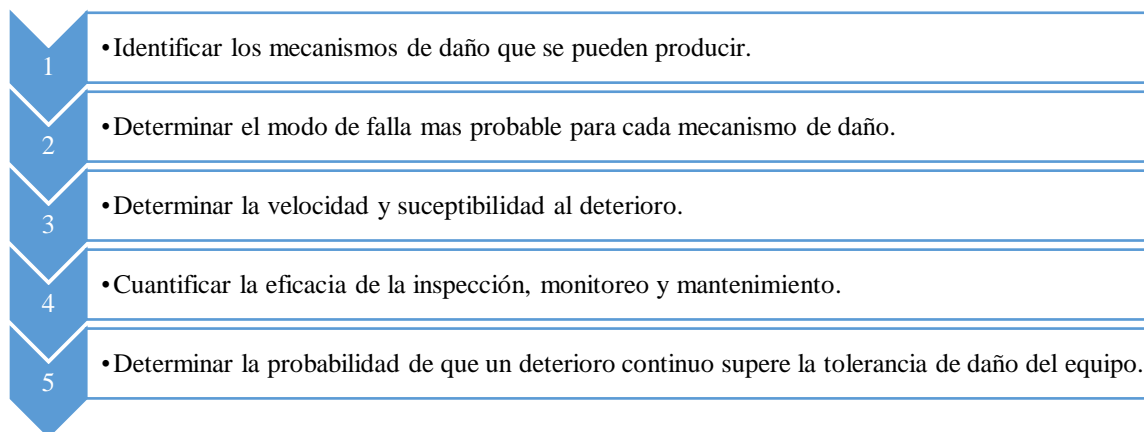
$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia de Falla} \times \text{Consecuencia}$$

El riesgo se expresará en \$/año y es determinado con la finalidad de realizar una jerarquización (Matriz), la cual nos permite identificar las áreas de oportunidad donde el plan de inspección tenga un mayor impacto en el nivel de riesgo; así mismo, la estrategia de dicho plan es seleccionada sobre la base del mecanismo de daño identificado en el RCA, seleccionando la técnica de inspección más adecuada para monitorear y controlar la frecuencia de falla de calentador de la estación.

Para cada caso, se espera que con la gestión y aplicación de las acciones de inspección propuestas, se obtenga, en términos de la relación costo-riesgo-beneficio, disminución de costos de emergencia y aumento de confiabilidad operacional de los calentadores analizados. Además de los efectos directos en la optimización de las tareas de inspección logrando una mejor administración de los recursos económicos, materiales y de mano de obra.

La Frecuencia de Falla o Probabilidad de Falla “POF” se refiere al grado en que es posible que ocurra uno o varios eventos, como efecto de pérdidas, estas pérdidas son dadas debido a un mecanismo dañado y todo ello en un intervalo de tiempo, para determinar la frecuencia de falla se debe seguir los pasos del diagrama 1. Los análisis de frecuencia de falla deben abordar todos los mecanismos de daño al equipo en estudio; es importante recalcar que los mecanismos de daño no son las únicas causas de pérdida en el equipo, pueden presentarse otros factores como actividades sísmicas, errores de diseño, errores de operación, sabotaje, entre otros.

Diagrama 1. Pasos para determinar la Frecuencia de Falla



2.2.3 Metodología para la Aplicación de la RBI.

Esta metodología se fundamenta en las normas API RP-580 y API PUB-581 que caracterizan el riesgo asociado a los componentes estáticos de un sistema de producción, con base en el análisis del comportamiento histórico de fallas, modos de degradación o deterioro, características de diseño, condiciones de operación, mantenimiento, inspección y políticas gerenciales tomando en cuenta al mismo tiempo la calidad y efectividad de la inspección, así como las consecuencias asociadas a las potenciales fallas.

La metodología tiene los siguientes pasos:

- ❖ Recolección de datos e información.
- ❖ Análisis del riesgo.
- ❖ Evaluación de consecuencias.
- ❖ Evaluación de la probabilidad de falla (veces/año).
- ❖ Evaluación del riesgo (mediante matriz de riesgos).
- ❖ Clasificación de los riesgos.
- ❖ Revisión del plan de inspección.
- ❖ Revaluación del plan de inspección.

2.3 HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE MANTENIBILIDAD DE EQUIPO ESTÁTICO

La utilización de las diferentes herramientas de gestión de activos es usada continuamente con el fin de proponer estrategias para el mejoramiento de la confiabilidad de los equipos. En muchas ocasiones, se usan o se combinan de acuerdo a la necesidad y al grado de profundización que se quiere llegar, en particular, con la aplicación de dos herramientas se puede obtener resultados más que satisfactorios y con pronta ejecución de sus planes de acción. El éxito de la implementación de estas herramientas radica en la ejecución completa de estos modelos de acuerdos con las necesidades particulares y el estado de mantenimiento de la empresa. Si se aplican correctamente se optimiza los planes de mantenimiento, minimizando las fallas imprevistas y reduciendo al máximo el remplazo de activos críticos.

2.3.1 Herramienta para el análisis de causa raíz (RCA).

EL **Análisis Causa Raíz** es un procedimiento sistemático que se aplica con el objetivo de precisar las causas que originan las fallas, sus impactos y sus frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas¹².

2.3.2 Herramienta de análisis de riesgo de los calentadores.

La **Inspección Basada en Riesgos (RBI)**, es la técnica que permite definir la probabilidad de falla de un sistema, y las consecuencias que las fallas pueden generar sobre la gente, el proceso y el entorno¹³.

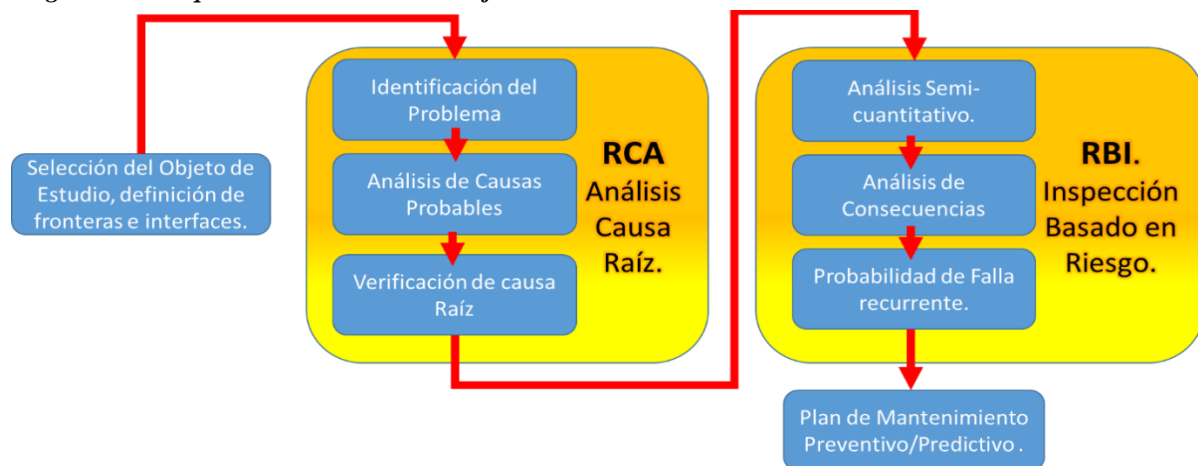
¹² Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad. < <http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>>

3. DESARROLLO DE TRABAJO

Dentro de la estructura del presente trabajo, se realiza inicialmente un análisis causa raíz “RCA” desarrollando tres fases de análisis que conducirán a la raíz del problema que presenta los equipos a analizar. A continuación, con información obtenida en el RCA, se realiza un análisis de Riesgo “RBI” determinando las consecuencias de falla y cálculos de probabilidad de falla basándonos en inspecciones directas, con el fin de determinar un nivel de riesgo asociado a cada componente del equipo y con ello proponer una estrategia o plan de mantenimiento preventivo o predictivo que mitigue los riesgos definidos, reduzca significativamente la aparición del mal factor y aumente la confiabilidad de los equipos analizados.

En el diagrama 2 se exhiben los dos escenarios del presente trabajo, RCA y RBI incluyendo algunos pasos importantes que se realizan en cada metodología, como herramienta de análisis contemplados por normas API 580 y practicas recomendadas de buena ingeniería de mantenimiento.

Diagrama 2. Bloques de desarrollo de trabajo



¹³ <<http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>>

3.1 “ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ” RCA. MÉTODO CUALITATIVO

El RCA cualitativo es ampliamente aplicado en la ingeniería de mantenimiento para determinar las causas que originan las fallas de los equipos o procesos, mediante técnicas de observación, entrevistas, lluvia de ideas, diagramas causa – efecto, los 5 por qué, árbol de falla entre otras. Estos métodos cualitativos son sistemáticos, lógicos y cada uno tiene un procedimiento claro a seguir para encontrar una causa raíz real. Igualmente el RCA permite identificar una posible solución para corregir la desviación identificada y realizar un seguimiento estructurado.¹⁴

De acuerdo al árbol lógico planteado para el RCA del presente trabajo (ver diagrama 3), se desarrollaran tres fases, las cuales, cada una contiene procedimientos específicos (plantillas en Excel anexas), con los que se podrá desarrollar el RCA con un óptimo detalle, orden y precisión. Estas fases son:

➤ Fase I. Análisis del Problema:

Dentro de esta fase se desarrolla la identificación del problema y descripción precisa del mismo mediante el diligenciamiento de plantillas Excel (Anexo 1) donde se introducirá la información como la descripción de la falla, el que, cuando, el donde y el cómo y las diferentes consecuencias derivadas de la falla que presento el equipo.

¹⁴ VERA, Muñoz Hernando. Aplicación de metodología análisis causa raíz para eliminar mal actor en equipos críticos.

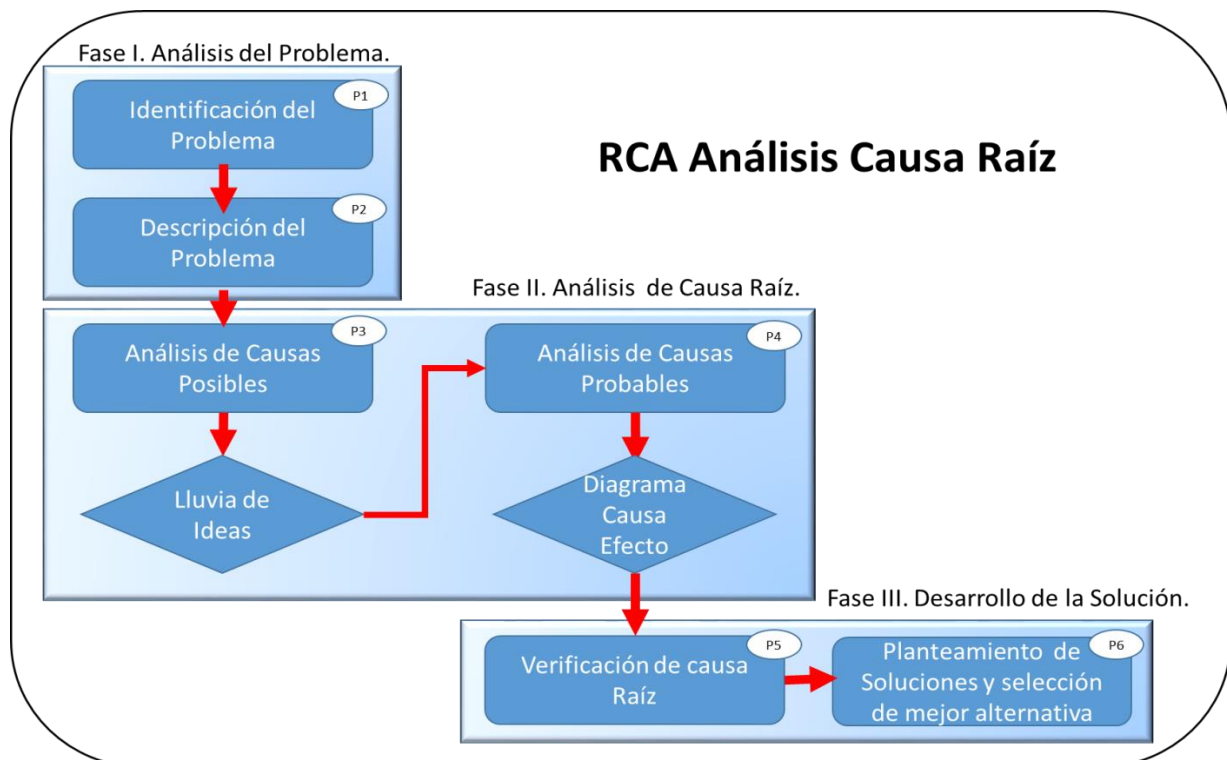
➤ Fase II. Análisis Causa Raíz:

A continuación se desarrolla la fase II, realizando un análisis de causas posibles mediante una lluvia de ideas y un análisis de causas probables mediante un diagrama causa efecto.

➤ Fase III. Desarrollo de la Solución:

Para finalizar y completar la metodología lógica y estructurada del RCA, se realiza la verificación de la causa raíz y el planteamiento de soluciones y mejores alternativas para eliminar el mal actor.

Diagrama 3. Árbol lógico para desarrollo del RCA de los calentadores de fuego directo



3.1.1 Fase 1. Análisis Del Problema En Los Calentadores De La Estación.

3.1.1.1 Fase I. Paso 1. Identificación del Problema.

En esta fase I se desarrolla la identificación del problema por medio de formulario estructurado que se presenta en la tabla 1, llamado reporte de incidente. En este formato se plasma la descripción del evento, que proceso fue afectado, cuando, como y donde paso e igualmente los impactos que genero esta falla, con lo cual se busca una identificación precisa y una magnitud del problema.

Tabla 1. Formulario Reporte de incidente. Fase I. Paso 1

FASE I. ANÁLISIS DEL PROBLEMA PASO 1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	
REPORTE DEL INCIDENTE	
DESCRIPCIÓN CORTA. ¿QUE SUCEDIÓ?	Pérdida de operatividad de calentadores por daño interno de tubo de fuego.
¿QUE / CUAL SISTEMA, PROCESO, OBJETO FUE AFECTADO?	Sistema de tratamiento de crudo (Hot Oil).
¿CUANDO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	Las fallas se han presentado durante un año de operación continua de los calentadores.
¿DONDE SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	En la estructura interna (tubos de fuego) de los calentadores de la estación de tratamiento.
¿COMO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	Durante la operación continua de los calentadores, el tubo de fuego deja de cumplir su función de contener fluido y trasferir calor al crudo por ruptura, fisura o grietas en lomo interno del tubo de fuego.
¿CONSECUENCIA REAL DE LO SUCEDIDO?	Diferidas de producción.
¿IMPACTO EN PERSONAS?	Ninguna lesión**
¿IMPACTO AMBIENTAL?	Leve**
¿IMPACTO ECONÓMICO?	Grave \$1M a \$10M*
¿IMPACTO IMAGEN?	Interna**
¿IMPACTO CLIENTES?	Incumplir especificaciones**

***Datos obtenidos mediante valoración Matriz RAM institucional de la empresa (Anexos)*

En la fotografía 3 y 4 se aprecia unas de las fallas que han presentado los calentadores, específicamente los tubos de fuego los cuales han presentado deformación plástica o grietas en el material creando pérdida de contención de los fluidos dentro del calentador y sacándolo de servicio.

Fotografía 3. Deformación de tubos de fuego en los calentadores



Fotografía 4. Deformación de tubos de fuego en calentadores



3.1.1.2 Fase I. Paso 2. Descripción del problema.

A continuación se realiza el paso 2 de la fase I, en la cual se ejecuta una descripción detallada del objetivo que debe cumplir el equipo en el proceso de la estación, el defecto que se presenta y el impacto del defecto (cuantificable), con estos tres ítems se consolida un enunciado completo y objetivo del problema. Ver tabla 2, formulario de descripción del problema.

Tabla 2. Formulario de Descripción del Problema

FASE I. ANÁLISIS DEL PROBLEMA PASO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
OBJETO	El "calentador de crudo" debe transferir de manera eficiente energía en forma de entalpía (aumento de temperatura) al crudo dentro del recipiente, con el fin de reducir su viscosidad y facilitar la separación del agua, gas y aceite en los siguientes procesos de la planta
DEFECTO	Se presenta ruptura del tubo de fuego, filtrándose crudo dentro de la recámara de combustión del calentador, originado un riesgo de incendio o explosión.
IMPACTO	Pérdida de operatividad del calentador, se tiene que reducir la carga del proceso al no tener un equipo de respaldo. Diferida de 16.000 Bpd equivalente a U\$800.000 dólares por día de parada.
ENUNCIADO DEL PROBLEMA	El "calentador de crudo" debe transferir de manera eficiente energía en forma de entalpía (aumento de temperatura) al crudo dentro del recipiente, con el fin de reducir su viscosidad y facilitar la separación del agua, gas y aceite en los siguientes procesos de la planta. Se presenta ruptura del tubo de fuego, filtrándose crudo dentro de la recámara de combustión del calentador, originado un riesgo de incendio o explosión. Pérdida de operatividad del calentador, se tiene que reducir la carga del proceso al no tener un equipo de respaldo. Diferida de 16.000 Bpd equivalente a U\$800.000 dólares por día de parada.

3.1.2 Fase II. Análisis De Causa Raíz En Los Calentadores De La Estación.

3.1.2.1 Fase II. Paso 3. Análisis de causas Posibles “Lluvia de ideas”.

En esta etapa, se realiza un análisis de las causas más posibles mediante una búsqueda metódica de las orígenes del problema, para ello se realiza una lluvia de ideas donde se contemple todas las posibles alternativas o mecanismos de daño del equipo, probables o no probables a los que se ve sometido un calentador de fuego directo de crudo. No es necesario una precisión del porque o del cómo, solo se requiere un número de ideas para asentar a discusión en el siguiente paso de identificación de causas probables. Ver tabla 3, Formulario de lluvia de ideas.

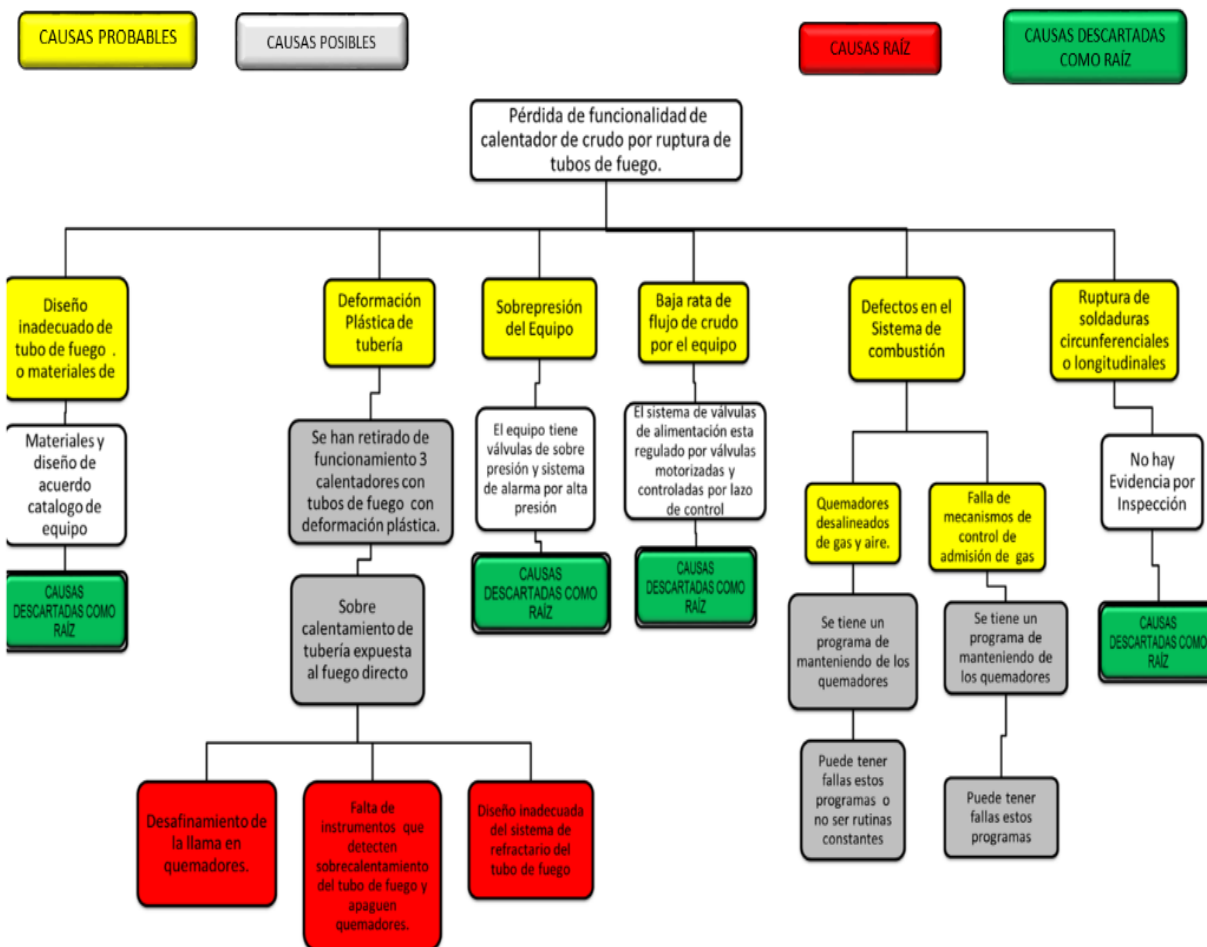
Tabla 3. Formulario de lluvia de Ideas

FASE II. ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ PASO 3. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS POSIBLES LLUVIA DE IDEAS		
Ítem	Problema	Ideas - Causas posibles
1	No se monitorea la temperatura directa del tubo de fuego.	No tiene instrumentación adecuada que determine la temperatura del tubo directamente.
2	Las rutinas operativas no informan el estado de operación del equipo	No está contemplado dentro de las rutinas operativas mirar los visores de la llama de los calentadores para determinar su buen funcionamiento.
3	Gases corrosivos	Corrosión general o localizada dentro del tubo de fuego. Adelgazamiento.
4	Fatiga del material	La fluctuación de temperaturas y constante operación pueden llegar a fatigar el material del tubo de fuego.
5	Obstrucción de salida de gases de combustión.	Taponamiento de chimeneas y se incrementa la temperatura del tubo.
6	Intervalos de rutinas de inspección muy grandes	Presupuesto bajo o mal diseñado plan de inspección.
7	Defectos en fabricación de tubos de fuego	Grietas o poros en soldaduras circunferenciales o longitudinales.
8	Operación inadecuada del calentador	Baja rata de flujo al ingresar al equipo
9	Operación inadecuada del calentador	Sobre alimentación de gas de combustión a turbinas de quema.
10	Operación inadecuada del calentador	Alta rata de flujo al ingresar al equipo
11	Operación inadecuada del calentador	Cierre de válvula a la salida del equipo
12	Operación inadecuada del calentador	Desajuste de quemadores (direccionamiento de llama)

3.1.2.2 Fase II. Paso 4. Análisis de Causas Probables “Diagrama Causa Efecto”.

En esta fase, se realiza el análisis de causas posibles y se validan con hechos y datos (causas probables) utilizando un diagrama de bloques llamado diagrama causa- efecto. En este diagrama, se reúne de la lluvia de ideas (causas posibles) los enunciados más relevantes que se plantearon y se ingresan al diagrama de bloques con su respectiva validación o justificación, con lo cual se puede ponderar si las causas enunciadas son valederas como causas raíz o se descartan. Para ello se utiliza en el diagrama de bloques los colores que se observan en la tabla 4.

Tabla 4. DIAGRAMA CAUSA-EFECTO: Análisis de causas posibles y Validación de hechos y datos (Causas probables)



3.1.3 Fase III. Desarrollo De La Solución Del Problema.

3.1.3.1 Fase III. Paso 5, Verificación de Causa Raíz.

En esta fase se realiza la verificación de la causa raíz por medio del formulario de la tabla 5, el cual incorpora una descripción detallada del sistema que se está estudiando, el efecto primario del problema investigado y las causas más probables que se obtuvieron de la fase anterior (diagrama causa-efecto). Con lo anterior, se realiza el dimensionamiento del problema contestando 4 interrogantes bases: ¿El qué?, donde se describe el que del problema analizado, ¿El cuándo? Donde se escribe el cuándo del problema analizado, ¿El dónde? se describir el donde del problema analizado y ¿El cuánto? Se describe el impacto mayor causado por el daño de los calentadores o tubos de fuego.

Posterior a estas preguntas, se realiza la confirmación si esta causa raíz encontrada ha sido conocida como causa raíz en el pasado, con lo cual se confirma que es un suceso reiterativo ya conocido como problema de estos equipos. Igualmente se cuestionará si esta causa repetiría el problema y para finalizar, se cuestiona si eliminando esta causa raíz se eliminaría el problema planteado. Con todo lo anterior se confirma que con diversas formulaciones o teorías de causa raíz, una o varias de ellas, pueden llegar a ser concluyentes con esta metodología, con lo cual se determina asertivamente la causa raíz real del problema planteado.

3.1.3.2 Fase III. Paso 6. Planteamiento de Soluciones y Entregables.

Como paso final, se plantea definir los objetivos que buscara evitar nuevamente la materialización del efecto primario (problema) por medio de soluciones apropiadas y alcanzables, las cuales deben estar representadas en acciones que encamine a eliminar la causa raíz determinada por esta metodología usada en los calentadores de la estación. Para esto se diligencia el formulario que se observa en la tabla 5.

La utilización de la metodología RCA por medio de formularios estructurados y ordenados contribuyen a la obtención de información clara y precisa que evita divagaciones o suposiciones no valederas en el momento de una valoración RCA, con lo cual se puede estimar que esta metodología utilizada llega a ser una aproximación real y de gran valor para la empresa que la utilice o que diseñe una metodología similar. Los pasos y herramientas utilizadas en el presente RCA, se encuentran disponibles en el estudio de la Ingeniería de Mantenimiento bajo diversos nombres u autores y son configuradas según la necesidad o la severidad que se requiera en los resultados, con lo cual este modelo estructurado de formulario de 6 simples pasos, llegan a ser una herramienta de gran importancia en la contribución de soluciones de problemas que enfrenta la industria a diario.

Tabla 5. Paso 5. Formulario de Verificación de causa raíz

FASE III. ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ PASO 5. VERIFICACIÓN DE CAUSAS RAÍZ										
DIMENSIONES DEL PROBLEMA										
SISTEMA	EFECTO PRIMARIO	CAUSAS PROBABLES	IDENTIDAD	TIEMPO	LUGAR	EXTENSIÓN	¿SE HA CONOCIDO COMO CAUSA RAÍZ EN EL PASADO?	¿ESTA CAUSA REPETIRÍA EL PROBLEMA?	¿ELIMINANDO LA CAUSA SE ELIMINARÍA EL PROBLEMA?	CAUSA RAÍZ
			¿QUÉ?	¿CUANDO?	¿DONDE?	¿CUANTO?				
Sistema de tratamiento (Hot Oil) de crudo.	Pérdida de operatividad segura del equipo.	Desafinamiento de quemadores.	Los tubos de fuego que se han retirado de operación, han presentado deformación de plástico del material en posición horaria de las 12 h, con evidencia que la llama pegó directamente en este punto.	Las fallas se han presentado durante un año de operación continua del equipo	En la parte interna de los tubos de fuego, se presenta perforación de la pared del tubo por deformación plástica e ingresa crudo a la recamara de combustión.	Ninguna lesión. Grave \$1M a \$10M.	si	si	si	si
	Pérdida de producción demandada por la planta	Falta de instrumentos que detecten sobrecalentamiento del tubo de fuego y apaguen quemadores.	El equipo por diseño no tiene o instrumentación que pueda censar la temperatura directa sobre el tubo de fuego en el área de combustión.	Desde su instalación los equipos no han presentado este tipo de instrumentación.	En la sección principal de recamara de combustión, no tiene sensores de temperatura	La no instalación de equipos e instrumentos que permitan monitorear y controlar las temperaturas de los puntos críticos (recamara de combustión) hace costoso las reparaciones del equipo.	no	si	si	si

**FASE III. ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ
PASO 5. VERIFICACIÓN DE CAUSAS RAÍZ**

SISTEMA	EFECTO	CAUSAS	DIMENSIONES DEL PROBLEMA		¿SE HA	¿ESTA	¿ELIMIN	CAU	
Costos elevados por remplazos de tubos de fuego y mantenimiento	Diseño inadecuado del sistema de refractario del tubo de fuego	Los refractarios que posee el tubo de fuego no cubren en totalidad la longitud de la llama, exponiendo a fugo directo el tubo.	se han instalado los refractarios de la misma longitud en todos los equipos	En la recamara de combustión existen refractarios de corta longitud.	Los refractarios no son de alto costo y su modificación se puede realizar por el departamento de Mantenimiento.	si	si	si	si

Tabla 6. Paso 6. Formulario de planteamiento de soluciones al problema

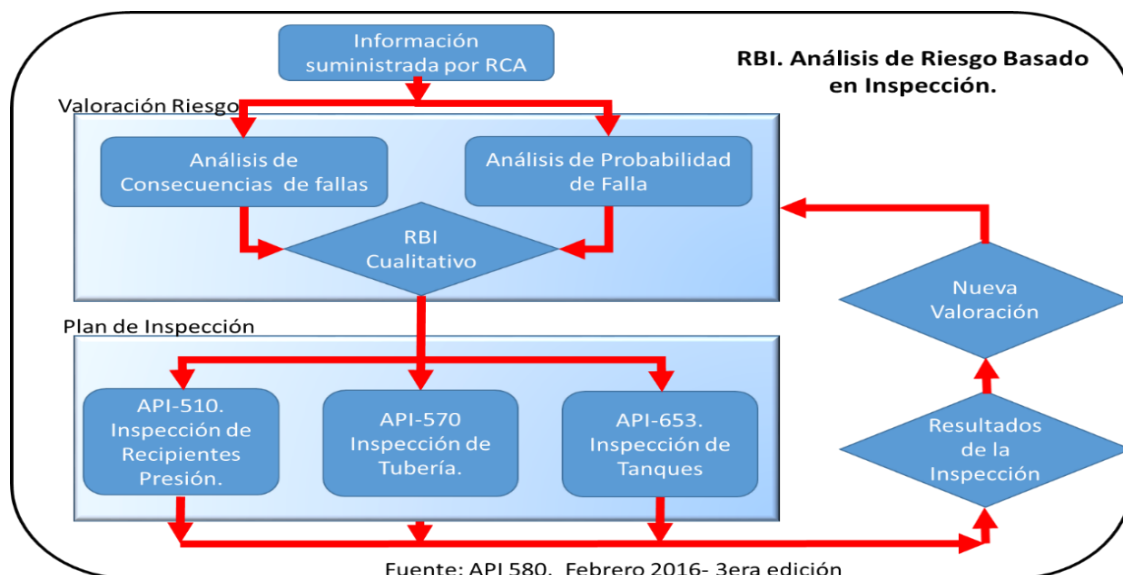
FASE III. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PASO 6. PLANTEAMIENTO DE LA DECISIÓN					
SISTEMA	EFECTO PRIMARIO	DECISIÓN	CAUSA RAÍZ	SOLUCIONES	ENTREGABLE
Sistema de tratamiento (Hot Oil) de crudo.	Pérdida de operatividad segura del equipo.	Realizar los controles necesarios al sistema de direccionamiento de la llama tanto de tamaño y dirección.	si	Establecer rutinas de verificación de quemadores estén alineados y la llama este dentro de parámetros normales	Especificación de rutinas operativas que incluyan la verificación del sistema de combustión de los calentadores
				Modificar los sistemas de movimiento de los quemadores para que no se muevan de la posición óptima.	Manual actualizado de operación del sistema de movimiento de quemadores y ajustes para evitar desalineación.
	Pérdida de producción demandada por la planta	Tener control y monitoreado la temperatura de operación directa de los tubos de fuego en zona crítica.	si	Realizar búsqueda en el mercado de instrumentos de alta temperatura y realizar estudio técnico para la incorporación de estos sensores al tubo de fuego en zona crítica.	Oferta económica a proveedores de instrumentación para control térmico de tubos de fuego.
				Instalar alarmas al cuarto de operación en caso de incremento a temperaturas críticas y apagado automático de quemadores.	Oferta económica a proveedores de instrumentación para sistema de apagado de quemadores.
	Costos elevados por replazos de tubos de fuego y mantenimiento	Destinar recursos económicos para las actividades de mantenimiento anuales.	si	Realizar presupuesto de mantenimiento de los siguientes años del equipo, detallando las actividades de mitigación de riesgo por daño de tubo de fuego	Presupuesto y Plan de trabajo de actividades de mantenimiento de los equipos críticos.
				Realizar estudio de viabilidad económica para adquisición de equipo de relevo, con el fin de no afectar producción durante mantenimientos programados.	Estudio de viabilidad económica para compra de equipo de soporte.

4. ANÁLISIS DE RIESGO BASADO EN INSPECCIÓN RBI

Basado en los resultados del RCA, de donde se obtuvieron las causa raíz del problema generado en los calentadores, se realiza a continuación un análisis de riesgo cualitativo enfocado a determinar un plan de inspección que reduzca los riesgos asociados a las consecuencias de las fallas que presenta los componentes de los calentadores. Con esto se podrá priorizar recursos y esfuerzos de mantenimiento con el fin de aumentar la confiabilidad de los equipos y con ello la producción de la planta.

Para este fin, se utiliza la metodología de análisis de Riesgo, contemplada en la norma API 580 (3^{era} edición 2016) la cual estructura un análisis de consecuencia de las fallas y un análisis de la probabilidad de los hechos que rodean la falla, con esto se determina un riesgo para cada elemento del equipo. En el diagrama 4 están contenido los diferentes pasos que se realizaron en el análisis de riesgo, con lo cual se podrá efectuar un completo estudio de los calentadores de la estación.

Diagrama 4. Bloques para desarrollar la RBI de calentadores



4.1 VALORACIÓN DE RIESGO

Como primer paso del análisis de riesgo, se realiza una segmentación del equipo a analizar, esta segmentación está limitada por las entradas y salidas del calentador, no se contempla líneas de ingreso o de relevo de presión e instrumentación. Se determinó como objetivo del presente trabajo, realizar una evaluación de un solo equipo ya que los otros equipos tiene el mismo funcionamiento, rangos de operación similares, igual fluido tratado e iguales configuraciones, por lo cual se toma un solo equipo como base para el análisis de riesgo. En la ilustración 3 se observa una configuración típica de un calentador de fuego directo, el cual posee dos tubos de fuego, dos chimeneas, dos refractario, dos sistema de quemadores y una vasija que contiene el crudo a tratar. En la tabla 7 está la segmentación típica del calentador a analizar:

Ilustración 3. Configuración típica de un calentador de fuego directo de crudo

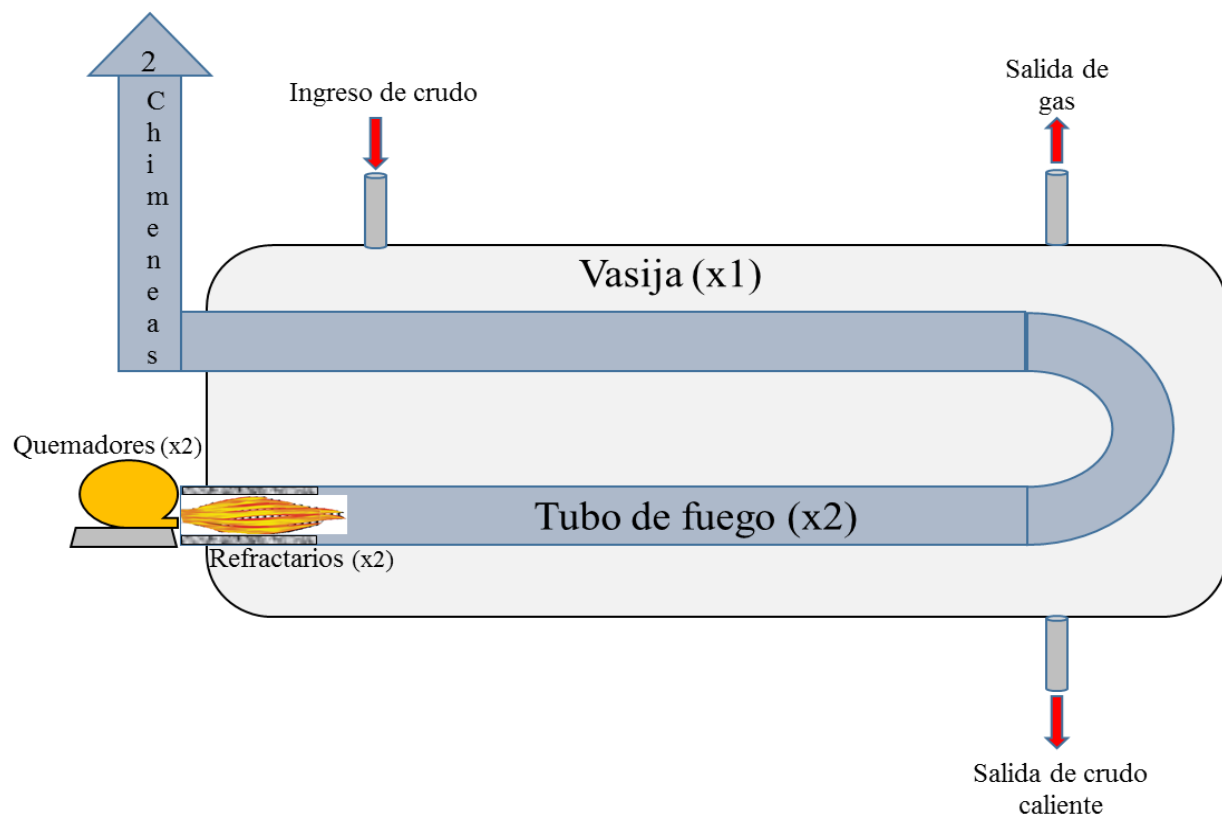


Tabla 7. Segmentación del calentador

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO		
EQUIPO	SEGMENTO EQUIPO	DESCRIPCIÓN
CALENTADORES DE FUEGO DIRECTO.	Chimeneas	Evacuación de gases de combustión
	Quemadores	Sistema de combustión
	Refractarios	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego
	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor
	Vasija	Recipiente de contención de fluido.

4.1.1 Análisis de Consecuencia de Fallas COF.

Las consecuencias a asociadas a las fallas de los calentadores están enfocadas en cinco factores de peso establecidos dentro de una matriz de valoración de los cuales se desglosa según su severidad en rangos específicos de mayor impacto a menor impacto. Las consecuencias analizadas son:

- ❖ **Consecuencias de seguridad a personas:** según la norma API 580 [1] en el capítulo 10.3.2 se refiere a la seguridad de las personas o procesos y esta se puede expresar en términos de severidad de la lesión o valores numéricos de costos de la lesión. En esta categoría se define si la falla más representativa del equipo a analizar (calentador o partes del calentador) puede producir una afectación a las personas que se encuentran en el contorno del equipo e inicia desde la consecuencia más baja que es “ninguna lesión” hasta la “fatalidad de una o más personas” como la consecuencia de mayor relevancia. Por lo cual, la pérdida de contención o falla de algunos de los elementos del calentador, arrollaran una consecuencias de seguridad mínima para las personas

que estén en cercanías al equipo debido a que el activo presenta bajas presiones de operación, tiene sistemas de alivio de presión (PSV) en caso de una sobre presión y cuenta con la red o sistema contra incendio de la estación en caso de conato de incendio. El área no es frecuentemente visitada por operarios debido a que el monitoreo y operación del equipo se hace remotamente desde el cuarto de control por medio de “PLC” (Control Lógico Programable).

- ❖ **Consecuencias Económica:** de acuerdo la norma API 580 [1] en el capítulo 10.3.3 los costos son el indicador más comúnmente utilizado en la valoración de las consecuencias, ya que expresa en si lo que la empresa u negocio perdería en caso de materializarse un evento de fuga o pérdida de operación del activo. En esta consecuencia se considera los costos referentes a las reparaciones que se desglosan de la falla del equipo (calentador o partes del calentador) igualmente se adiciona el valor directo de la producción diaria establecida para el equipo y se multiplica por los días que se demore la reparación, a esto se llama diferida de producción. El caso más crítico se representa en el evento que falle un tubo de fuego o la vasija como tal y según historial de reparaciones del equipo, los costos referentes a daños en los tubos de fuego o vasija ascienden a U\$150.000 dólares por equipo, este valor solo refleja los gastos de mantenimiento demandados en una parada de emergencia de cualquier de estos equipos. Adicional, los costos por diferida ascienden a U\$800.000 dólares diarios debido a que el equipo procesa diariamente un volumen de 16.000 barriles (BPD) y las reparaciones normalmente se demoran de 5 a 8 días. Por lo consiguiente,

la consecuencia económica de una falla más catastrófica de un calentador oscila en el rango de 100K a 1M de dólares.

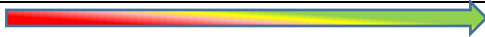
- ❖ **Consecuencia Ambiental:** basados en la norma API 580 [1] en el capítulo 10.3.5 la medición de las consecuencias ambientales está sujeta a la extensión de área afectada, especies biológicas o recursos hídricos contaminados, normalmente se mide en acres o millas o metros cúbicos afectados. En este caso, la falla que presenta el equipo (calentador o partes del calentador) puede llegar a afectar el medio ambiente por contaminación al suelo, agua o aire en muy baja proporción, debido a que los calentadores se encuentran dentro de las instalaciones y presentan diferentes sistemas de drenado que evitan que cualquier pérdida de contenido del equipo salga de la instalación y contamine más allá del límite de la estación. Adicionalmente, si se presenta una mala combustión (humo negro) el equipo será apagado inmediatamente por regulación ambiental regional. Por lo cual, la consecuencia ambiental en el presente análisis se representará como un efecto leve al ambiente y su entorno.

- ❖ **Consecuencia a clientes:** esta consecuencia específicamente se refiere al cumplimiento de producción para entrega (venta de producto), bajo las especificaciones y condiciones establecidas al cliente. La falla de un calentador traerá problemas internos en la operación de la planta y con ello tendrá un efecto leve en la entrega de los productos bajo especificaciones al cliente, lo cual no impacta drásticamente la operación debido a que se cuenta con reservas de producto en tanques de almacenamiento el cual podrá cubrir la entrega de producto al cliente mientras se realiza la reparación del equipo, lo cual no podrá superar los 5 días.

- ❖ **Imagen de la Empresa:** esta consecuencia es el impacto informático que causa la falla ante la sociedad externa de la empresa (Comunidad). En este caso la falla de un calentador no es relevante como tal para la imagen de la empresa ante la sociedad.

En la tabla 8 se presenta la matriz de las consecuencias desarrolladas para el caso de la falla de un calentador, las consecuencias seleccionadas se presentan en color rosado dentro del cuadro. Igualmente se categorizan con un número el rango de las consecuencias (de 5 a 0) según su impacto, con el fin de analizar cada elemento que se ha seleccionado del calentador.

Tabla 8. Matriz de consecuencias de falla de un calentador de crudo

		De Mayor Impacto  a Menor Impacto					
Categorización		5	4	3	2	1	0
Consecuencias	Personas	Una o más fatalidades	Incapacidad permanente (parcial o total)	Incapacidad temporal (>1 día)	Lesión menor (sin incapacidad)	Lesión leve (primeros auxilios)	Ninguna lesión
	Económica	Catastrófica > \$10M	Grave \$1M a \$10M	Severo \$100k a \$1M	Importante \$10k a \$100k	Marginal <\$10k	Ninguna
	Ambiental	Contaminación Irreparable	Contaminación Mayor	Contaminación Localizada	Efecto Menor	Efecto Leve	Ningún efecto
	Clientes	Veto como proveedor	Pérdida de participación en el mercado	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Quejas y/o reclamos	Incumplir especificaciones	Ningún impacto
	Imagen de la Empresa	Internacional	Nacional	Regional	Local	Interna	Ningún impacto

Fuente: Matriz RAM – Formato de valoración de Riesgo. ECOPEPETROL S.A.

Con la matriz de consecuencias de la tabla 8 se realiza la evaluación de cada componente seleccionado del calentador y se establece las consecuencias reales según sea el caso. De las diferentes consecuencias analizadas se realiza una ponderación del valor más alto y se define como la consecuencia representativa de este análisis. Esto se observa en la tabla 9.

Tabla 9. Consolidado de Consecuencias de los segmentos del calentador

Identificación del Equipo			CONSECUENCIA					Máximo valor de la consecuencia
Equipo	Segmento	Descripción	Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen	
Calentador de crudo con Fuego Directo	Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	P1	E1	A1	C1	I1	P1
	Quemadores	Sistema de combustión	P2	E1	A1	C1	I1	P2
	Refractarios	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego	P0	E2	A1	C1	I1	E2
	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	P0	E4	A1	C1	I1	E4
	Vasija	Recipiente de contención de fluido	P2	E4	A1	C1	I1	E4

4.1.2 Análisis de Probabilidad de Falla POF.

De acuerdo a la norma API 580 [1] en el numeral 9.2 la probabilidad de falla puede expresarse en términos de frecuencia. Esta frecuencia se expresa en número de eventos ocurridos durante un tiempo específico (ejemplo 0,02 veces por año). Para el análisis cualitativo, la “POF” puede categorizarse en niveles de acuerdo a la severidad de ocurrencia o su magnitud, para lo cual se asigna 5 categorías que se expresan en frecuencia ascendente o eventos ascendentes como se puede observar en la tabla 10.

Tabla 10. Frecuencias de falla establecidas para los calentadores

FRECUENCIA DE FALLA				
0 - 0,0027	0,0027 - 0,0054	0,0054 - 0,0082	0,0082 - 0,0109	0,0109 - 0,0137
La falla sucede entre 0 a 1 veces al año.	La falla sucede entre 1 a 2 veces al año.	La falla sucede entre 2 a 3 veces al año.	La falla sucede entre 3 a 4 veces al año.	La falla sucede entre 4 a 5 veces al año.

En la recolección de información (RCA) se obtuvo el historial de falla de los calentadores y de sus componentes, con esta información se realiza el cálculo aritmético obteniendo la frecuencia de falla de los componente del equipo, lo cual se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Frecuencia de falla de calentadores

NOMBRE	IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO		Probabilidad de falla POF	
	PARTE DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN	Falla anuales	Frecuencia de Falla
Calentadores de fuego directo.	Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	1	0,003
	Quemadores	Sistema de combustión	3	0,008
	Refractarios	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego	2	0,005
	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	3	0,008
	Vasija	Recipiente de contención de fluido.	2	0,005

4.1.3 Resultados de RBI.

Una vez obtenidos las consecuencias y la probabilidad de falla de cada componente, se realiza la valoración de riesgo utilizando la matriz de la tabla 12, donde se combina la POF con la COF y se categoriza un riesgo específico para cada componente.

En la tabla 12 se observa la matriz establecida para el análisis de los componente del calentador, la cual es típicamente utilizada por la metodología RBI según API 580[1] y contiene la probabilidad de falla “POF” en el eje horizontal con escala de eventos sucedidos anualmente (Frecuencia de ocurrencia) y las consecuencias de la falla “COP” se ubican el eje vertical de

forma descendente. La combinación de esta matriz da como resultado cinco (5) categorías de riesgo las cuales se diferencian por colores, estas se describen a continuación:

- ❖ Rojo: Zona de riesgo muy Alto o VH. Si se determinara el riesgo en esta zona, este es intolerable y se tiene que buscar alternativas inmediatamente para reducir el riesgo, puede llegar a ser necesario parar o detener el equipo sacrificando producción de la planta.

- ❖ Naranja: Zona de riesgo Alto H. Si se determina el riesgo en esta categoría, esta es inaceptable y debe buscar alternativas que controlen el riesgo. Este nivel riesgo debe ser conocido por el gerente de la planta y destinar recurso que generen acciones inmediatas.

- ❖ Amarillo: Zona de riesgo Medio M. en esta zona se debe tomar medidas para reducir el riesgo a niveles razonablemente prácticos, con lo cual se asegura que se crea una estrategia en el tiempo que permita realizar acciones encaminadas a reducir este nivel de riesgo.

- ❖ Beige (Crema): Zona de riesgo Bajo B. En esta zona de riesgo no es requerido realizar acciones inmediatamente, pero si deben de tener seguimiento estructurado para que en el tiempo no se conviertan o se eleve el nivel de riesgo por no tener control sobre este ítem.

- ❖ Verde: Zona de riesgo despreciable N. En este nivel el riesgo es muy bajo y usualmente no se realiza controles o seguimiento.

Tabla 12. Matriz de valoración de Riesgo

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD DE FALLA. "FRECUENCIA".					
					0 - 0,0027	0,0027 - 0,0054	0,0054 - 0,0082	0,0082 - 0,0109	0,0109 - 0,0137	
Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa	La falla sucede entre 0 a 1 veces al año.	La falla sucede entre 1 a 2 veces al año.	La falla sucede entre 2 a 3 veces al año.	La falla sucede entre 3 a 4 veces al año.	La falla sucede entre 4 a 5 veces al año.	
Una o más fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	L	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N	N

Fuente: Matriz RAM – Formato de valoración de Riesgo. ECOPELROL S.A

Como resultado de metodología RBI, se obtiene la tabla 13 en donde se presenta los niveles de riesgo de los segmentos del calentador analizado, con ellos se puede realizar el plan de inspección para mitigar estos niveles establecidos.

Tabla 13. Resultados de Riesgo de Calentador de fuego directo

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO			Probabilidad de Falla	Consecuencia de Falla	NIVEL DE RIESGO
NOMBRE	PARTES DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN	POF "Frecuencia"	COF "Magnitud"	
Calentadores de fuego directo	Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	0,003	P1	N
	Quemadores	Sistema de combustión	0,008	P2	L
	Refractarios	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego	0,005	E2	L
	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	0,008	E4	H
	Vasija	Recipiente de contención de fluido.	0,005	E4	M

4.2 PLAN DE INSPECCIÓN

Determinado el nivel de riesgo de los componentes más importantes del calentador, se desarrolla el plan de inspección que encamine a la reducción de la probabilidad de falla y con ello el impacto directo de la consecuencia, con esto se mitigará en gran parte los niveles de riesgos asociados a cada componente. El plan de inspección está dirigido a los tipos o mecanismos de daño que pueda tener cada componente, por lo cual el plan de inspección varía para cada elemento. Las técnicas de inspección y frecuencias de inspección se modificaran según el nivel de riesgo asociado o la incertidumbre que se quiera mantener.

El producto final de la metodología RBI aplicada, es la jerarquización prioritaria de cada componente del calentador e igualmente la aplicación de los planes de inspección y la destinación de los recursos asignados para su mantenibilidad.

Para el caso específico de los componentes analizados y según la normas API 571 [2], API 510 [3], API570 [4], alguno de los mecanismos de daño susceptibles a ocurrir durante la vida útil del calentador se describen en la tabla 14.

Tabla 14. Mecanismos de Falla susceptibles en calentadores

Equipo	Segmento equipo	Mecanismo de Falla						
		Degradación térmica del material	Fatiga Térmica	Corrosión generalizada /Picadura	corrosión bajo aislamiento (CUI)	Termo Fluencia	Diseño inadecuado.	Eficiencia térmica
Calentadores de fuego directo.	Chimeneas	x	x	x	x	x	x	N/A
	Quemadores	x	N/A	N/A	N/A	x	x	N/A
	Refractarios	x	N/A	N/A	N/A	N/A	x	x
	Tubos de fuego	x	x	x	N/A	x	x	x
	Vasija	x	x	x	x	N/A	N/A	N/A

Con la indagación de las normas aplicables a la inspección del calentador y sus componentes, se establece las frecuencias y las técnicas requeridas para la mitigación del riesgo establecida mediante la metodología RBI enfocados en los mecanismos de falla y las causa raíz identificados en el RCA de la primera parte del presente trabajo.

5. RESULTADOS

La aplicación de las dos metodologías de mantenimiento predictivo RCA y RBI en componentes de un calentador se generalizan a los demás calentadores de la estación (total 6) debido a que las condiciones de operación (temperaturas, presión, flujo) son similares y los mecanismo de daño se han presentados en igual frecuencia en los equipos.

De la metodología utilizada en el RCA (formularios) se obtuvieron tres (3) causas raíz importante establecida en la tabla 5 las cuales son relevantes y concluyentes, estas son:

- ❖ Desafinamiento de la llama en quemadores.
- ❖ Falta de instrumentos que detecten sobrecalentamiento del tubo de fuego y apaguen quemadores.
- ❖ Diseño inadecuada del sistema de refractario del tubo de fuego.

Determinada estas causas raíz del problema de los calentadores, se propone una serie de recomendaciones o soluciones aplicables a corto plazo, con el fin de evitar la aparición del mal factor determinado por el RCA, estas soluciones son:

- ❖ Rutinas de verificación de quemadores estén alineados y la llama este dentro de parámetros normales de operación.
- ❖ Modificar el mecanismo de movimiento de los quemadores para que no se desalineen de la posición óptima.

- ❖ Realizar búsqueda en el mercado de instrumentos de alta temperatura y realizar estudio técnico para la incorporación de estos sensores al tubo de fuego en zona crítica.
- ❖ Instalar alarmas al cuarto de operación en caso de incremento a temperaturas críticas en tubo de fuego y apagado automático de quemadores.
- ❖ Realizar presupuesto de mantenimiento de los siguientes años del equipo detallando las actividades de mitigación de riesgo por daño de tubo de fuego.
- ❖ Realizar estudio de viabilidad económica para adquisición de equipo de relevo para no afectar producción durante mantenimientos programados.

El aporte significativo de esta metodología RCA en el presente trabajo, es la estandarización de los formatos que se utilizaron para la obtención de la causa raíz del calentador, el cual puede ser utilizados para cualquier equipo de la planta ya que consiste en una forma lógica y estructurada de manejo de información detallada del problema analizado (Anexo 1).

Del análisis de riesgo RBI se define las principales consecuencias (tabla 9) y su magnitud de impacto según la falla del componente, se estableció de mayor impacto a la consecuencia económica debido al costo de reparación del equipo y la diferida que esta falla generaría.

Igualmente se obtuvo la probabilidad de falla (tabla 11) la cual se calculó como frecuencia de falla según API 580 [1] y se categorizo según su ocurrencia en cinco niveles, con esto y la determinación de las consecuencias de cada componente, se obtuvo el nivel de riesgo general los cuales se observa en la tabla 15.

Tabla 15. Resultado de Riesgo de cada componente del calentador

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO			NIVEL DE RIESGO
NOMBRE	PARTES DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN	
Calentadores de fuego directo	Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	N
	Quemadores	Sistema de combustión	L
	Refractarios	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego	L
	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	H
	Vasija	Recipiente de contención de fluido	M

Los tubos de fuego representan la categoría de riesgo Alta siendo estos los de mayor costo en la consecuencia económica (diferida) y los de mayor frecuencia de falla, por lo cual este riesgo es inaceptable y tiene que ser mitigado con planes de inspección a corto plazo.

Igualmente, para la elaboración del plan de inspección, se determinaron los mecanismos de daño más típicos y susceptibles a los cuales los componentes del calentador pueden estar expuestos en el funcionamiento u operación del activo, estos mecanismos fueron expuestos en la tabla 14 y de la cual se apoyó para la deducción de las técnicas de inspección requeridas. Con los niveles de riesgo ya establecidos, se obtiene la jerarquización de los componentes del calentador a los cuales debe ser priorizada la inspección y para ello se propone una plan de inspección que abarque las frecuencias, las técnicas de inspección y acciones referentes a las causas raíz que se obtuvieron del RCA, con lo cual se obtiene el complemento de las dos metodologías y se cumple con el objetivo del presente trabajo. Las frecuencias de inspección se determinaron según el nivel de riesgo establecido y las consecuencias relevantes obtenidas, con lo cual se determinó las periodicidades de inspecciones internas y externas, igualmente se determinó los tipos de ensayos no destructivos que debe tener cada inspección. Adicionalmente se establecieron recomendaciones al plan de inspección deducidas del RCA, esto se aprecia en la tabla 16.

Tabla 16. Plan de inspección

PLAN DE INSPECCIÓN														
Equipo	Segmento	Frecuencia		Técnicas de Inspección								Actividades complementaria al plan de inspección		
		Inspección Interna	Inspección Externa	Ultrasonido	Defecto logia	Radiografía	Termografía	Dureza de Metal	Tintas Penetrantes	Partículas Magnéticas	Inspección Visual	Limpieza General	Modificaciones de Diseño	Instalación de Instrumentación
Calentadores	Chimeneas	Bienal	Bienal	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO
	Quemadores	Semestral	Semestral	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI
	Refractarios	Semestral	Semestral	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO
	Tubos de fuego	Semestral	Semestral	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Vasija	Bienal	Anual	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO

Una vez establecido el plan de inspección para los componentes del calentador, este se replica en igual magnitud a los otros calentadores de la estación, con lo cual se tendría una cobertura total de las actividades propuestas en el presente trabajo. Igualmente, las recomendaciones que se deducen del RCA se complementa con las recomendaciones que arroja el RBI, por la tanto la combinación de estas dos herramientas sirven de gran apoyo a la industria y al departamento encargado de mantenimiento de estos equipos debido a que se logra abarcar los riesgos asociados a cada componente y las causas raíz de los problemas generados a estos equipos.

La metodología RBI incluye igualmente una reevaluación de riesgo (ilustración 4) después de aplicar completamente el plan de inspección inicial propuesto en el presente trabajo. Con estos resultados de la inspección, se deduce si las frecuencias de inspección pueden mantenerse, ampliarse o reducirse, igualmente, se evaluará si los alcances de las técnicas de ensayos no destructivos son eficientes o es necesario ampliar la cobertura. Con lo anterior se ajustara los planes de inspección sucesivos y por consiguiente se ajustan los presupuestos destinados al mantenimiento de estos equipos.

La metodología RCA y específicamente la propuesta en el presente trabajo, tiene inmersa las soluciones y recomendaciones que llevarían la no aparición nuevamente de la causa raíz del problema determinado, con lo cual se puede mejorar la operación y mantenimiento de estos equipos.

6. CONCLUSIONES

El componente del calentador denominado refractarios no tiene un nivel de riesgo alto en la valoración RBI, pero según el RCA este fue catalogado como uno de las causas raíz de los problemas que presenta el equipo, lo cual concluye que la combinación de estas dos metodologías de mantenimiento conlleven a proponer actividades de mantenimiento proactivo y preventivo con el fin de solucionar el problema identificado.

La implementación de la metodología RCA al calentador de fuego, mediante el desarrollo estructurado de formularios lógicos, permitió determinar tres (3) causas raíz reales del problema analizado.

Esta metodología RCA se basó en tres fases principales las cuales tiene 6 pasos inherente para su desarrollo. El desarrollo de estos pasos permitió establecer las causas probables y causa posible que llevaron a determinar la causa raíz real y descartar suposiciones no valederas, con lo cual se concluye que esta herramienta constituye un excelente método de análisis que puede ser usado por los departamentos de mantenimiento o responsables de los activos.

Esta herramienta RCA presenta recomendaciones y soluciones que eviten nuevamente la aparición del mal factor o nuevos sucesos que incluyan las causas raíz determinadas y con ello unos entregable o compromisos que serán asignados al responsable del activo.

El desarrollo lógico y estructurado de los formularios del RCA, permite integrar conocimientos teóricos y prácticos que fundamentan la construcción de estrategias adecuadas para la eliminación de malos factores o fallas repetitivas.

Los pasos y herramientas utilizadas en el presente RCA, se encuentran disponibles en el estudio de la Ingeniería de Mantenimiento bajo diversos nombres u autores y son configuradas según la necesidad o la asertividad que se requiera en los resultados, con lo cual este modelo estructurado de formulario de 6 simples pasos, llegan a ser una herramienta de gran importancia en la contribución de soluciones de problemas que enfrenta la industria a diario.

El RCA efectuado a los componentes del equipo, abarca situaciones que el RBI no cubre, igualmente, el RBI cubre factores que el alcance del RCA no tiene, por lo cual, la utilización de estas dos herramientas de mantenimiento proactivo y preventivo generan un valor agregado a las metodologías utilizadas en el mejoramiento de la confiabilidad de los equipos de una planta.

Con la información recolectada de los calentadores y la determinación de las consecuencias en el RBI determinar la magnitud del impacto que una falla generaría a la operación o producción de una planta, en este caso se determinó que el mayor impacto está representado en la consecuencia económica en la reparación y diferida que el equipo demandaría en caso de una falla.

La probabilidad de falla se pudo determinar gracias a las frecuencias de falla recolectadas en los años de operación de los equipos y valiéndose de la matriz de valoración, se obtuvo la jerarquización de riesgo de los componentes analizado en el calentador.

El nivel de riesgo determinado para los tubos de fuego fue el más alto según la probabilidad de falla y la magnitud del evento, el cual determino que este componente debe ser priorizado su inspección o una estrategia de mitigación del riesgo a corto plazo.

Con los niveles de riesgo determinado a los componentes del activo, se realizó el plan de inspección incluyendo las frecuencias de inspección y ensayos no destructivos que según los mecanismos de daño evaluados pueden llegar a afectar el equipo, igualmente este plan de inspección se complementó con las recomendaciones que entregó el RCA.

7. RECOMENDACIONES

El análisis causa raíz puede ser visto como un método correctivo, que actúa sobre problemas generados, pero la utilización correcta de esta herramienta, llega a ser de carácter preventivo si se desarrollan las recomendaciones emitidas por este análisis en los demás equipos. Con lo cual puede prevenir la aparición de estos malos factores en los demás equipos y contribuir a la mantenibilidad de los activos y producción de la planta.

Para el desarrollo estructurado del RCA, es necesario contar con la participación de las disciplinas encargadas de la operación, integridad, mantenimiento y producción, con el fin de obtener toda la información necesaria para el análisis y asignación de responsabilidades de las actividades propuestas en el RCA para la eliminación del mal hecho o de la causa raíz.

Este plan de inspección propuesto debe ser ejecutado en su totalidad y una vez desarrollado, evaluar si las frecuencias deben ser ajustadas y si los ensayos destructivos tienen que ser ampliada su alcance o si por el contrario, cambiar o modificar. Con lo anterior se ajustarán los planes de inspección sucesivos y por consiguiente se ajustan los presupuestos destinados al mantenimiento de estos equipos.

Para el desarrollo de la metodología RBI, es necesario contar con la participación de las disciplinas encargadas de la operación, integridad, mantenimiento y producción, con el fin de obtener toda la información necesaria para el análisis de consecuencias y probabilidad de fallas, una vez realizado el plan de inspección, asignar responsabilidades de las actividades propuestas para la gestión del plan de inspección.

BIBLIOGRAFÍA

[3] API 510. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration. 10th Edition, May 1, 2014.

[4] API 570. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems, Code. Third Edition, November 2009.

[2] API 571. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. API Recommended Practice 571. Second Edition, April 2011.

[1] API RP580. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Risk Based Inspection. (3^{era} edición 2016).

[5] API 581, Risk Based Inspection Technology, API Recommended Practice. Second Edition, September 2008.

[6] DURÁN, José Bernardo. 2000. ¿Qué es Confiabilidad Operacional? Revista Club Mantenimiento. Año 2000, No. 2. Septiembre 2000.

[7] <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/causaraizaltmann.pdf>

[8] GARCIA PALENCIA, Oliverio. El análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional. Conferencia y Exhibición Reliability Word Latin América. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2005.

[9] MUÑOZ AGUILAR, Miguel Ángel. Artículo: Gestión del Mantenimiento Basado en Riesgo.

[10] VERA, Muñoz Hernando. Aplicación de la metodología análisis causa raíz (RCA) para eliminar un mal actor en equipos críticos, 38 Pg., 2001. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico- Mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Bucaramanga 2011.

ANEXOS

ANEXO A. Matriz de Desarrollo del RCA en CALENTADORES

TABLA DE DESARROLLO DE RCA DE CALENTADORES DE ESTACION.

FASE	DESCRIPCIÓN	PASOS	RESULTADO	LINK
FASE I. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	Registrar el incidente junto con la información pertinente y la decisión de que tipo de investigación realizar. Descomponer una situación compleja en partes manejables. Da la respuesta a ¿Cual es el problema?.	1	Reporte del incidente	Reporte de incidente
		2	Planteamiento del problema	Enunciado del problema
FASE II. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS	Búsqueda metódica de la(s) causa(s) del problema. Da la respuesta a ¿porqué?.	3	Lluvia de ideas	Causas posibles
		4	Diagrama causa efecto	Causas posibles y probables
FASE III. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	Un método sistemático para seleccionar la mejor solución basado en una metodología estructurada que considera múltiples criterios. Garantiza que las soluciones propuestas se ejecuten en cabeza de los responsables idóneos y que se permita el aprendizaje de la organización para evitar recurrencia del evento analizado.	5	Verificación de causas raíz	Causa Raíz
		6	Planteamiento de la decisión y soluciones	Planteamiento de la decisión

FASE I ANÁLISIS DEL PROBLEMA
PASO 1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

DESCRIPCIÓN CORTA. QUE SUCEDIÓ?	Pérdida de operatividad de calentadores por daño interno de tubo de fuego.
QUE / CUAL SISTEMA, PROCESO, OBJETO FUE AFECTADO?	Sistema de tratamiento (Hot Oil) de crudo.
CUANDO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	las fallas se han presentado durante un año de operación continua del equipo
DONDE SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	En la estructura interna (tubos de fuego) de los calentadores de la estación de tratamiento.
COMO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	Durante la operación continua de los calentadores, el tubo de fuego deja de cumplir su función de contener fluido y transferir calor al crudo por ruptura, fisura o grietas en lomo interno del tubo de fuego.
CONSECUENCIA REAL DE LO SUCEDIDO?	Diferidas de producción.
IMPACTO EN PERSONAS?	Ninguna lesión.
IMPACTO AMBIENTAL?	Leve
IMPACTO ECONÓMICO?	Grave \$1M a \$10M.
IMPACTO IMAGEN?	Interna
IMPACTO CLIENTES?	Incumplir especificaciones.

FASE I ANÁLISIS DEL PROBLEMA
PASO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETO El "calentador de crudo" debe transferir de manera eficiente energía en forma de entalpía (aumento de temperatura) al crudo dentro del recipiente, con el fin de reducir su viscosidad y facilitar la separación del agua, gas y aceite en los siguientes procesos de la planta

DEFECTO Se presenta ruptura del tubo de fuego, filtrándose crudo dentro de la recámara de combustión del calentador, originado un riesgo de incendio o explosión.

IMPACTO Pérdida de operatividad del calentador, se tiene que reducir la carga del proceso al no tener un equipo de respaldo. Diferida de 16.000 Bpd equivalente a US\$800.000 dólares por día de parada.

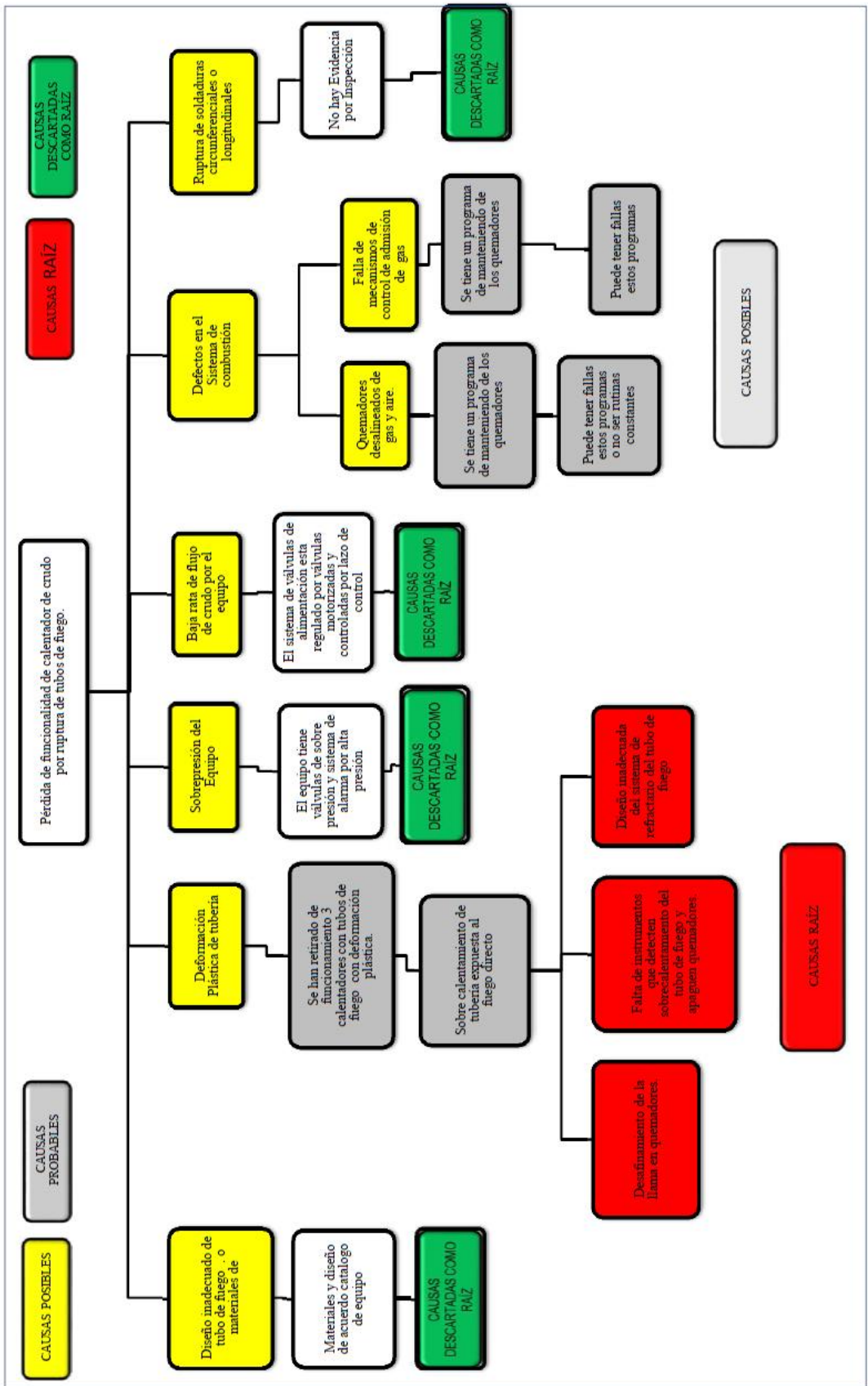
ENUNCIADO DEL PROBLEMA El "calentador de crudo" debe transferir de manera eficiente energía en forma de entalpía (aumento de temperatura) al crudo dentro del recipiente, con el fin de reducir su viscosidad y facilitar la separación del agua, gas y aceite en los siguientes procesos de la planta. Se presenta ruptura del tubo de fuego, filtrándose crudo dentro de la recámara de combustión del calentador, originado un riesgo de incendio o explosión. Pérdida de operatividad del calentador, se tiene que reducir la carga del proceso al no tener un equipo de respaldo. Diferida de 16.000 Bpd equivalente a US\$800.000 dólares por día de parada.

FASE II ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ
PASO 3. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS POSIBLES
LLUVIA DE IDEAS

Ítem	Problema	Ideas - Causas posibles
1	No se monitorea la temperatura directa del tubo de fuego.	No se tiene instrumentación adecuada que determine la temperatura del tubo directamente.
2	Las rutinas operativas no informan el estado de operación del equipo	No se contemplado dentro de las rutinas operativas mirar los visores de la llama de los calentadores para determinar su buen funcionamiento.
3	Gases corrosivos	Corrosión general o localizada dentro del tubo de fuego. Adelgazamiento.
4	Fatiga del material	La fluctuación de temperaturas y el constante operación pueden llegara fatigar el material del tubo de fuego.
5	Obstrucción de salida de gases de combustión.	Taponamiento de chimeneas y se incrementa la temperatura del tubo.
6	Intervalos de rutinas de inspección muy grandes	Presupuesto bajo o mal diseñado plan de inspección.
7	Defectos en fabricación de tubos de fuego	Grietas o poros en soldaduras circunferenciales o longitudinales.
8	Operación inadecuada del calentador	Baja rata de flujo al ingresar al equipo
9	Operación inadecuada del calentador	Sobre alimentación de gas de combustión a turbinas de quema.
10	Operación inadecuada del calentador	Alta rata de flujo al ingresar al equipo
11	Operación inadecuada del calentador	Cierre de válvula a la salida del equipo
12	Operación inadecuada del calentador	Desajuste de quemadores (direccionamiento de llama)

FASE II ANÁLISIS DE LA CAUSA RAIZ
PASO 4. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS PROBABLES
DIAGRAMA CAUSA - EFECTO

DIAGRAMA CAUSA-EFECTO: Análisis de causas posibles y Validación de hechos y datos (Causas probables)



FASE III ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ
PASO 5 VERIFICACIÓN DE CAUSAS RAÍZ

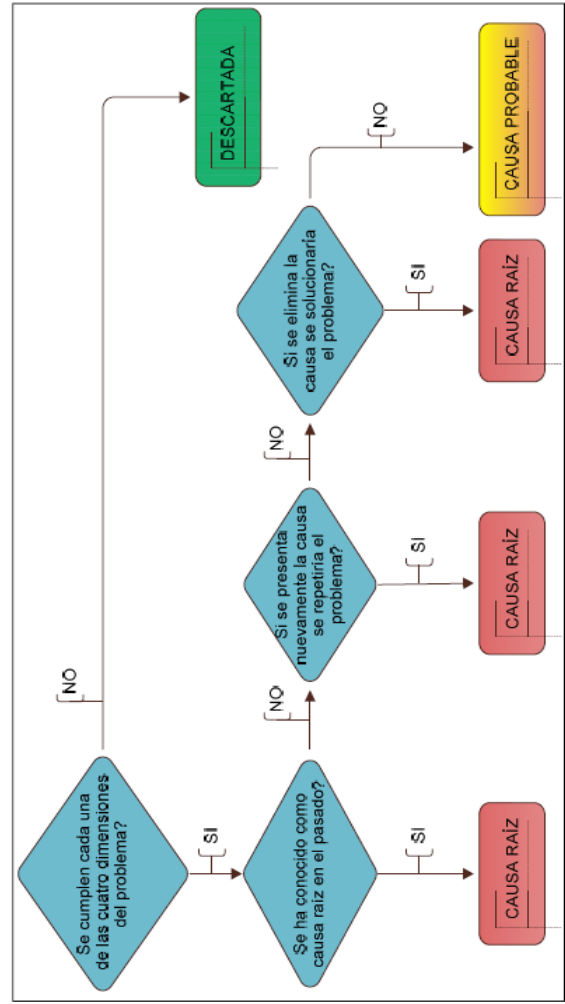
DIMENSIONES DEL PROBLEMA	
IDENTIDAD QUE?	LUGAR DONDE?
TIEMPO CUANDO?	EXTENSION CUANTO?

SISTEMA	EFFECTO PRIMARIO	CAUSAS PROBABLES	Pérdida de operatividad de calderones por daño interno de tubo de fuego.	En la estructura interna (tubo de fuego) de los calderones de la estación de tratamiento.	Las fallas se han presentado durante un año de operación continua del equipo	En la parte interna de los tubos de fuego, se presenta perforación de la pared del tubo por deformación plástica e ingreso crudo a la recámara de combustión.	El remplazo o reparación de los tubos de fuego pueden ascender a los 300 millones, un costo con la diferencia del equipo que es de 16.000 Epol de crudo urado.	SE HA CONOCIDO COMO CAUSA RAÍZ EN EL PASADO?	ESTA CAUSA REPERTEIRIA EL PROBLEMA?	ELIMINANDO LA CAUSA SE ELIMINA EL PROBLEMA?	CAUSA RAÍZ
---------	------------------	------------------	--	---	--	---	--	--	-------------------------------------	---	------------

Pérdida de operatividad segura del equipo.	Desafumamiento de la llama en quemadores.	Falta de instrumentos que detecten sobrecalentamiento del tubo de fuego y apaguen quemadores.	Los tubos de fuego que se han retirado de operación, han presentado deformación plástica del material en posición horrita de las 12 h, con evidencia que la llama pegó directamente en este punto.	En la parte interna de los tubos de fuego, se presenta perforación de la pared del tubo por deformación plástica e ingreso crudo a la recámara de combustión.	los equipos que han presentado falla en el tubo de fuego, han usado una operación continua de aproximadamente un año.	El remplazo o reparación de los tubos de fuego pueden ascender a los 300 millones, un costo con la diferencia del equipo que es de 16.000 Epol de crudo urado.	si	si	si	si	si
--	---	---	--	---	---	--	----	----	----	----	----

Sistema de tratamiento (Hor On) de crudo.	Pérdida de producción demandada por la planta	Falta de instrumentos que detecten sobrecalentamiento del tubo de fuego y apaguen quemadores.	El equipo por diseño no tiene facilidad o instrumentación que pueda sesar la temperatura directa sobre el tubo de fuego en el area de combustión.	En la sección principal de recámara de combustión, no tiene sensores de temperatura de combustión hace costoso las reparaciones del equipo.	Desde su instalación los equipos no han presentado este tipo de instrumentación.	La no instalación de equipos y instrumentos que permitan monitorear y controlar las temperaturas de los puntos críticos (recámara de combustión) hace costoso las reparaciones del equipo.	no	si	si	si	si
---	---	---	---	---	--	--	----	----	----	----	----

Costos elevados por remplazos de tubos de fuego y mantenimiento	Diseño inadecuado del sistema de llama, expuesto a fuego directo el tubo.	Los refractarios que posee el tubo de fuego no cubren en totalidad la longitud de la llama, expuesto a fuego directo el tubo.	Los refractarios que posee el tubo de fuego no cubren en totalidad la longitud de la llama, expuesto a fuego directo el tubo.	En la recámara de combustión existen refractarios de corta longitud.	se han instalado los refractarios de la misma longitud en todos los equipos	los refractarios no son de lato costo y su modificación se puede realizar por el departamento de Mantenimiento.	si	si	si	si	si
---	---	---	---	--	---	---	----	----	----	----	----



FASE III DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN
PASO 6. PLANTEAMIENTO DE LA DECISIÓN

SISTEMA	EFECTO PRIMARIO	DECISIÓN	CAUSA RAÍZ	SOLUCIONES	ENTREGABLE
	Pérdida de operatividad segura del equipo.	Realizar los controles necesarios al sistema de direccionamiento de la llama tanto de tamaño (Longitud) y dirección.	si	<p>Rutinas de verificación de quemadores estén alineados y la llama este dentro de parámetros normales</p> <hr/> <p>Modificar los sistemas de movimiento de los quemadores para que no se muevan de la posición optima.</p>	<p>Especificación de rutinas operativas que incluyan la verificación del sistema de combustión de calentadores</p> <hr/> <p>Manual actualizado de operación del sistema de movimiento de quemadores y ajustes para evitar desalineación.</p>
Sistema de tratamiento (Hot Oil) de crudo.	Pérdida de producción demandada por la planta	Tener control y monitoreado la temperatura de operación directa de los tubos de fuego en zona critica.	si	<p>Realizar búsqueda en el mercado de instrumentos de alta temperatura y realizar estudio técnico para la incorporación de estas sensores al tubo de fuego en zona critica.</p> <hr/> <p>Instalar alarmas al cuarto de operación en caso de incremento a temperaturas críticas y apagado automático de quemadores.</p>	<p>Oferta económica a proveedores de instrumentación para control térmico de tubos de fuego.</p> <hr/> <p>Oferta económica a proveedores de instrumentación para sistema de apagado de quemadores.</p>
	Costos elevados por remplazos de tubos de fuego y mantenimiento	Destinar recursos económicos para las actividades de mantenimiento anuales.	si	<p>Realizar presupuesto de mantenimiento de los siguientes años del equipo detallando las actividades de mitigación de riesgo por daño de tubo de fuego</p> <hr/> <p>Realizar estudio de viabilidad económica para adquisición de equipo de relevo para no afectar producción durante mantenimientos programados.</p>	<p>Presupuesto y Plan de trabajo de actividades de mantenimiento de los equipos críticos.</p> <hr/> <p>Estudio de viabilidad económica para compra de equipo de soporte.</p>

MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS.

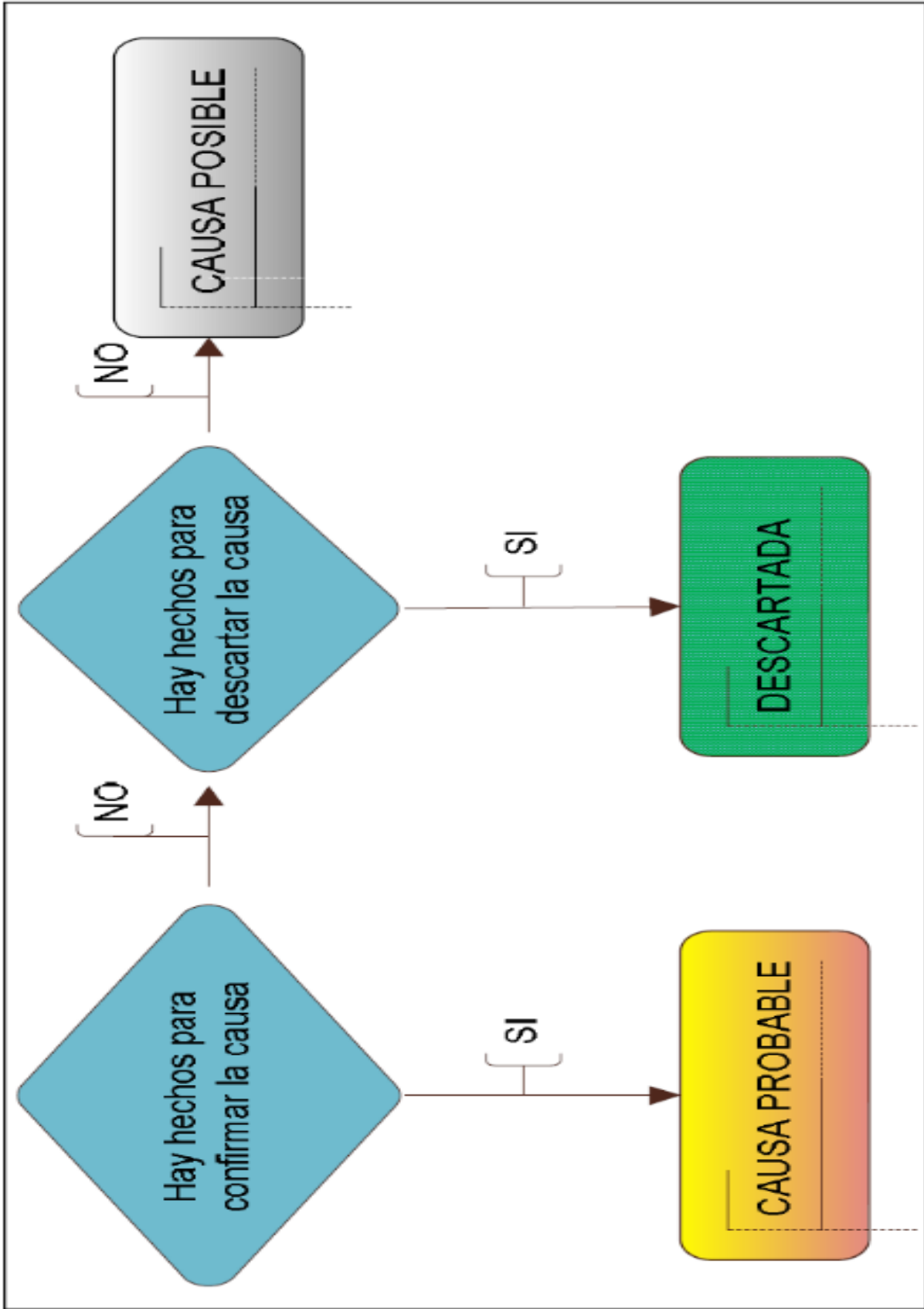
PROBABILIDAD DE FALLA. "FRECUENCIA".

0 - 0,0027	0,0027 - 0,0054	0,0054 - 0,0082	0,0082 - 0,0109	0,0109 - 0,0137
------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

CONSECUENCIAS

La falla sucede entre 0 a 1 veces al año. La falla sucede entre 1 a 2 veces al año. La falla sucede entre 2 a 3 veces al año. La falla sucede entre 3 a 4 veces al año. La falla sucede entre 4 a 5 veces al año.

Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa						
Una o más fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Inreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal < \$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones.	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningun efecto	Ningun impacto	Ningun impacto	0	N	N	N	N	N



ANEXO B. PLANTILLA RBI CALENTADORES

PLANTILLA EVALUACION DE RIESGO DE CALENTADOR DELA ESTATICO DE LA ESTACION							
IDENTIFICACION DEL EQUIPO			365	Probabilidad de Falla	Consecuencia de Falla	RIESGO	
ITEM	NOMBRE	TIPO DE EQUIPO	DESCRIPCION	Falla anuales	POF "Frecuencia"	COF "Magnitud"	
ITEM	EQUIPO	SEGMENTO EQUIPO	DESCRIPCION				
1		Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	1	0,003	P1	N
2		Quemadores	Sistema de combustión	3	0,008	P2	L
3	CALENTADORES DE FUEGO DIRECTO.	Refractarios	Sistema de aislamiento termico de tubos de fuego	2	0,005	E2	L
4		Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	3	0,008	E4	H
5		Vasija	Recipiente de contención de fluido.	2	0,005	E4	M

82

PLANTILLA EVALUACION DE RIESGO DE CALENTADOR DELA ESTATICO DE LA ESTACION								
IDENTIFICACION DEL EQUIPO			365	Probabilidad de Falla	Consecuencia de Falla			
ITEM	NOMBRE	TIPO DE EQUIPO	DESCRIPCION	Falla anuales	POF "Frecuencia"	COF "Magnitud"		
ITEM	NOMBRE	TIPO DE EQUIPO	DESCRIPCION					
ITEM	EQUIPO	SEGMENTO EQUIPO	DESCRIPCION	Fatiga Termica	Corrosión generalizada /Picadura	Mecanismo de falla		
						comosion bajo aislamiento (CUT)	Termofluencia (Deformación plástica)	Eficiencia termica
1		Chimeneas	Evacuación de gases de combustión	x	x	x	x	N/A
2		Quemadores	Sistema de combustión	x	N/A	N/A	x	N/A
3	CALENTADORES DE FUEGO DIRECTO.	Refractarios	Sistema de aislamiento termico de tubos de fuego	x	N/A	N/A	N/A	x
4		Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	x	x	N/A	x	x
5		Vasija	Recipiente de contención de fluido.	x	x	x	N/A	N/A

PLANTILLA EVALUACION DE RIESGO DE CALENTADOR DE LA ESTACION

IDENTIFICACION DEL EQUIPO		365	Probabilidad de Falla	Consecuencia de Falla
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCION	POF "Frecuencia"	COF "Magnitud"

PLAN DE INSPECCION

ITEM	NOMBRE EQUIPO	DESCRIPCION	Frecuencia				Técnicas de Inspección					Actividades complementarias al plan de inspección				
			Inspección interna	Inspección Externa	Ultrasonido	Deleritología	Radiografía	Termografía	Dureza de metal	Pruebas penetrantes	partículas magnéticas	Inspección Visual	Limpieza General	Modificación de instrumentos debido a	Manuten	
1	Chimeneas	Emericación de gases de combustión	Bienal	Bienal	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
2	Quemadores	Sistema de combustión	Semestral	Semestral	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI
3	CALENTADORES DE FUEGO DIRECTO	Sistema de aislamiento térmico de tubos de fuego	Semestral	Semestral	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO
4	Tubos de fuego	Sistema de transferencia de calor	semestral	Semestral	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
5	Vañija	Recipiente de contención de fluido.	Bienal	Annual	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO