



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



repositorio.uptc@uptc.edu.co



**ANÁLISIS CAUSA RAÍZ FUGA DE GAS POR ROTURA EN TUBERÍA DE 18”
PK0+200 GASODUCTO BALLENA – BARRANCABERMEJA**

LUIS RICARDO SEVERICHE ESCOBAR

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - UPTC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
BOGOTÁ
2021

LUIS RICARDO SEVERICHE ESCOBAR

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN

Presentado a:

ANIBAL SERNA (director monografía – Asesor - Evaluador)
PROFESOR ASOCIADO A LA ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE
INTEGRIDAD Y CORROSIÓN

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - UPTC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
BOGOTÁ
2021

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	8
2. OBJETIVOS	9
2.1. OBJETIVO GENERAL	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. ESTADO DEL ARTE / MARCO TEÓRICO.....	10
3.1 GENERALIDADES	10
3.2 PROCEDIMIENTO RCA.....	12
Identificación del Evento	13
Elaboración del reporte preliminar de evento o reporte de falla	14
Recopilación de la Información del Evento o Evidencias	14
Clasificación del evento	16
Ejecución del Taller RCA.....	17
Evaluar los componentes que fallaron.....	18
Soporte todas las causas con evidencias.....	21
Verificación de Causas	21
Identificación de Soluciones Efectivas.....	22
Hacer recomendaciones.....	22
Totalizar los resultados de las soluciones y recomendaciones	23
Divulgación de Lecciones Aprendidas	23
Implementación de Soluciones	23
4. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO.....	25
4.1. FASE 1 REGISTRO DE INCIDENTES	25
Importancia.....	25
Especificaciones del Gasoducto (Tubería):.....	26
4.2. FASE 2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA	26
Identificación del problema	26
Definición del problema.....	27
4.3. FASE 3. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.....	27
Elaboración árbol lógico de fallas	27

Análisis de causas posibles	28
Validación de datos	29
4.4. FASE 4 DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN	39
Selección de Criterios	39
Recomendaciones de solución	40
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
6. BIBLIOGRAFÍA	45

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de flujo del diagrama causa efecto.....	12
Ilustración 2 Ejemplo de Matriz de riesgo	17
Ilustración 3 Árbol Lógico de Fallas	19
Ilustración 4 Diagrama Causa Efecto.....	19
Ilustración 5 Esquema Típico Análisis Causa Raíz.....	20
Ilustración 6 Árbol Lógico de fallas basado en ASME B31.8S [3].....	28
Ilustración 7 Proceso de identificación de las causas	28
Ilustración 8 Árbol Lógico de fallas basado en ASME B31.8S [3].....	29
Ilustración 9 Proceso Validación de las causas	29
Ilustración 10 Árbol Lógico de fallas por corrosión externa basado en ASME B31.8S [3]	30
Ilustración 11 Árbol Lógico de fallas por corrosión externa basado en ASME B31.8S [3]	32
Ilustración 12 Árbol Lógico de fallas por corrosión interna basado en ASME B31.8S [3]	34
Ilustración 13 Árbol Lógico de fallas por fisura basado en ASME B31.8S [3]	35
Ilustración 14 Árbol Lógico de fallas por defectos de diseño y construcción basado en ASME B31.8S [3]	36
Ilustración 15 Árbol Lógico de fallas por factores externos basado en ASME B31.8S [3]	37
Ilustración 16 Árbol Lógico de fallas por error operacional basado en ASME B31.8S [3]	38

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Costos de la falla	25
Tabla 2 Descripción de eliminación de causas por recubrimiento	30
Tabla 3 Descripción de eliminación de causas por protección catódica	31
Tabla 4 Descripción de eliminación de causas por Interferencias entre sistemas de protección catódica y ambiente corrosivo	31
Tabla 5 Descripción de eliminación de causas por afectación por bacterias y corrosión generalizada.....	33
Tabla 6 Descripción de eliminación de causas por afectación por presencia de H ₂ S, glicol, erosión o abrasión	34
Tabla 7 Descripción de eliminación de causas por fatiga, SCC y HIC-SOHIC...	35
Tabla 8 Descripción de eliminación de causas por defectos de construcción	36
Tabla 9 Descripción de eliminación de causas por factores externos.....	37
Tabla 10 Descripción de eliminación de causas por error operacional	39
Tabla 11 Secuencia de recomendaciones	41

RESUMEN

Estandarizar la metodología RCAⁱ (Análisis de Causa Raíz) para que forme parte de un proceso de administración de las fallas y este sea seguido de una forma estructurada por las empresas de mantenimiento y operaciones, es la finalidad que toda empresa debería alcanzar, dentro de este trabajo además se describe la metodología, las herramientas de calidad aplicables para el desarrollo del mismo y la técnica de documentación del proceso que nos permita reportar fallas con lecciones aprendidas o análisis de falla estadístico, teniendo en cuenta su impacto al medio ambiente, a la producción, al mantenimiento, a la calidad e imagen de la organización y a los aspectos de seguridad industrial.

El presente documento tiene como finalidad dar a conocer mediante la metodología Análisis de Causa Raíz o RCA (Root Cause Analisis) por sus siglas en inglés, las causas probables y/o raíces que actuaron para producirse el evento rotura del Gasoducto de 18" Ballena Hato Nuevo.

PALABRAS CLAVE: RCA, Falla, Rotura, Gasoducto, Gas Natural, Causa Probable.

ⁱ Root Cause Análisis

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El análisis causa raíz o RCA por sus siglas en inglés (Root Cause Analysis) es una metodología de confiabilidad que emplea un conjunto de técnicas o procesos, para identificar factores causales de falla, es decir el origen de un problema definido, relacionado con el personal, los procesos, las tecnologías, y la organización, con el objetivo de identificar actividades o acciones rentables que los eliminen.

El presente ejercicio busca mostrar las etapas que se desarrollaron durante la ejecución de la metodología de análisis causa raíz descrita en este documento y utilizada en el evento de fuga de gas por rotura en tubería de 18” ubicada en la planta Ballena en el municipio de Hatonuevoⁱⁱ; esto con el fin de identificar las acciones y/o recomendaciones que eliminen las causas de las fallas y que ofrezcan rentabilidad.

Dentro de este documento se presenta una descripción detallada de la metodología para realizar análisis causa raíz, como proceso de confiabilidad, aplicado al análisis de eventos de falla presentados en todo el ciclo de vida de activos.

Por lo que se presenta la recopilación información antes del evento sobre las condiciones generales del gasoducto de 18” con su respectiva validación de la información que permita encontrar la causa raíz del evento, para generar propuestas con planes de acción, lecciones aprendidas u oportunidades de mejora que eliminen o mitiguen posibles eventos de esta magnitud con características similares.

ⁱⁱ Hatonuevo es un municipio colombiano del departamento de La Guajira

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Dar a conocer mediante la metodología análisis causa raíz las causas probables y/o raíces que actuaron para producirse el evento “ROTURA EN TUBERÍA DE 18” PK0+200 GASODUCTO BALLENA – BARRANCABERMEJA”.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar un procedimiento estandarizado que describa la metodología análisis causa raíz para que forme parte de un proceso de administración de fallas y sea seguida en forma estructurada.
- Reportar las fallas con lecciones aprendidas, teniendo en cuenta su impacto al medio ambiente, a la producción, al mantenimiento, a la calidad e imagen de la organización y a los aspectos de seguridad industrial.
- Generar un plan de recomendaciones de fácil implementación que permita evitar la repetibilidad de este suceso en gasoductos de condiciones similares.

3. ESTADO DEL ARTE / MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES

Muchos son los factores que afectan la efectividad de los análisis de causa raíz (RCA) ejecutados en las organizaciones, el principal radica en el desconocimiento de la aplicación y el alcance de esta metodología [1]. En muchas ocasiones se tiene la oportunidad de participar en RCA que son todo un éxito. RCA que responden claramente a las preguntas ¿Cómo fallo?, ¿Por qué fallo? y que dejan clasificadas las causas raíces físicas, humanas y latentes que dieron origen a la aparición y recurrencia de las fallas, así como sus respectivas recomendaciones. Luego de algún tiempo cuando se pregunta si el equipo se estabilizó, se encuentra con la sorpresa de que volvió a fallar de la misma manera. ¿Qué pudo suceder? La ejecución de todas las recomendaciones emitidas en un RCA y su seguimiento es quizá el tema de mayor importancia en la realización de cualquier análisis.

Antes de explicar el procedimiento RCA, se debe dejar claro dos conceptos muy importantes como lo son el Método de Razonamiento Inductivo-Deductivo y el de Diagrama Causa Efecto los cuales son la base metodológica de este procedimiento.

La Inducción es un modo de razonar que nos lleva de lo particular a lo general, de una parte, a un todo, inducir es ir más allá de lo evidente. La generalización de los eventos es un proceso que sirve de estructura a todas las ciencias experimentales, ya que éstas—como la física, la química y la biología— se basan (en principio) en la observación de un fenómeno (un caso particular) y posteriormente se realizan investigaciones y experimentos que conducen a los científicos a la generalización. La Deducción es un tipo de razonamiento que nos lleva de lo general a lo particular, de lo complejo a lo simple. Pese a que el razonamiento deductivo es una maravillosa herramienta del conocimiento científico, si el avance de la ciencia se diera sólo en función de él, éste sería muy pequeño. Esto se debe a que nuestra experiencia como humanos es limitada, depende de nuestros sentidos y de nuestra memoria.

La inducción y la deducción no son formas diferentes de razonamiento, ambas son formas de inferencia. El proceso de inferencia inductiva consiste en exhibir la manera cómo los hechos particulares (variables) están conectados a un todo (leyes). La inferencia deductiva nos muestra cómo un principio general (ley), descansa en un grupo de hechos que son los que lo constituyen como un todo. Ambas formas de inferencia alcanzan el mismo propósito aun cuando el punto de partida sea diferente.

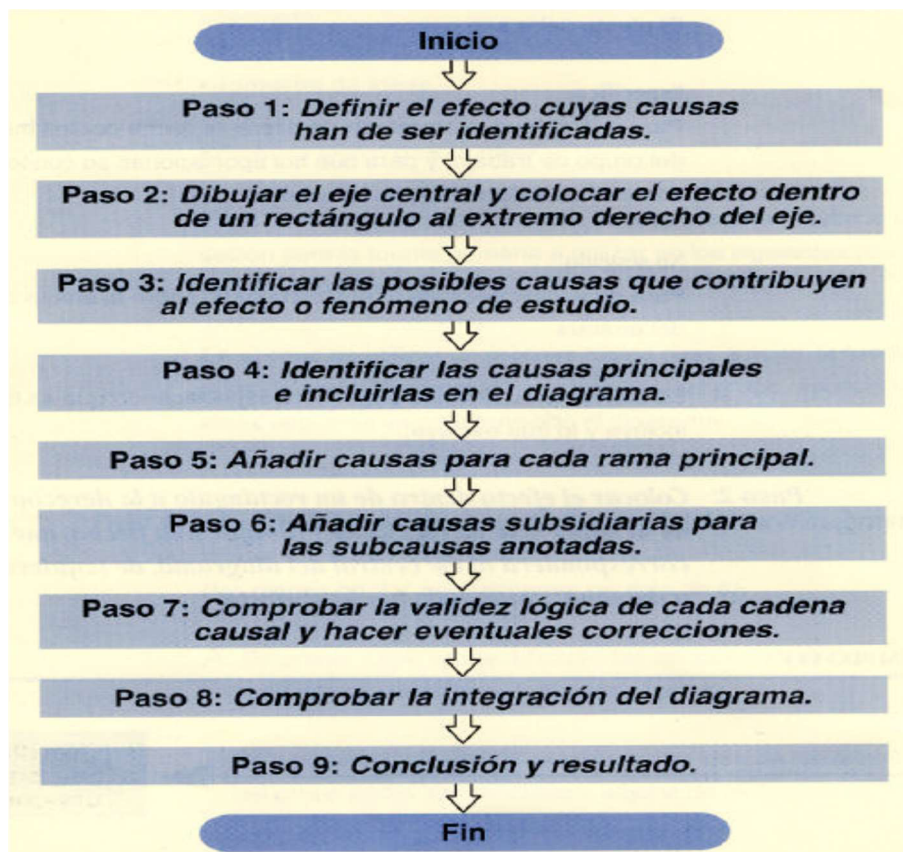
Cuando usamos simultáneamente los métodos de inferencia inductiva y deductiva para buscar la solución de un problema científico decimos que estamos empleando el método inductivo–deductivo (método en que se basa el RCA), cuyas reglas básicas de operación son:

- a) Observar cómo se asocian ciertos fenómenos, aparentemente ajenos entre sí.
- b) Por medio del razonamiento inductivo, intentar descubrir el denominador común (ley o principios) que los asocia a todos.
- c) Tomando como punto de partida este denominador común (por inducción), generar un conjunto de hipótesis referidas a los fenómenos diferentes, de los que se partió inicialmente.
- d) Planteadas las hipótesis, deducir sus consecuencias con respecto a los fenómenos considerados.
- e) Hacer investigaciones (teóricas o experimentales) para observar si las consecuencias de las hipótesis son verificadas por los hechos.

El Diagrama Causa-Efecto es una representación gráfica que muestra la relación cualitativa e hipotética de los diversos factores que pueden contribuir a un efecto o fenómeno determinado. Es utilizado en la fase de un proceso de solución de problemas:

- En la fase de diagnóstico durante la formulación de posibles causas del problema.
- En la fase de corrección para considerar soluciones alternativas.
- Para pensar de forma sistemática sobre las posibles resistencias en la organización a la solución propuesta.

En la Ilustración 1 Diagrama de flujo del diagrama causa efecto Ilustración 1 se esboza el diagrama de flujo de cómo se realiza un diagrama causa efecto



Fuente: www.fundibeq.org

Ilustración 1 Diagrama de flujo del diagrama causa efecto

3.2 PROCEDIMIENTO RCA

La metodología RCA busca identificar mediante una secuencia lógica de pasos que conducen la investigación a aislar los eventos o la ocurrencia de la falla. Cuando la falla es identificada correctamente, el análisis permite definir la mejor ruta o camino que resolverá ese evento que genera insatisfacción.

El procedimiento para el análisis de causas RCA, comprende los siguientes ítems:

- Identificación del evento
- Elaboración del reporte preliminar de evento o reporte de falla
- Recopilación de la información del evento o evidencias
- Clasificación del evento
- Ejecución del taller RCA
- Elaboración del informe

Identificación del Evento

Se considera evento a un impacto o consecuencia negativa para la organización, que pueden presentarse como fallas de equipo o desviaciones en los procesos tanto técnicos como humanos. Para realizar un RCA en términos generales se tienen en cuenta dos escenarios: primero por una falla esporádica, pero de gran impacto o segundo cuando sean fallas crónicas (pueden no ser de gran impacto, pero son repetitivas), estas últimas salen de análisis de paretosⁱⁱⁱ, indicadores o de otra fuente que nos permita identificar la recurrencia de las mismas. Para identificar los eventos es necesario formular una serie de preguntas, empleando una tormenta de ideas para tal fin.

¿Qué ocurrió? Las fuentes para determinar “**qué ocurrió**” son las personas involucradas y la evidencia física existente (si está disponible). En esta pregunta debe definirse exactamente cuál es el evento, falla e incidente que se presentó.

¿Dónde ocurrió? El lugar de los hechos o escena del evento puede contener información o evidencias para detectar la forma en que ocurrió la falla. Son útiles las fotografías, videos, dibujos. Es importante definir exactamente el componente o equipo donde se presentó la falla (si aplica).

¿Cuándo ocurrió? Definir exactamente el momento o intervalo de tiempo en que ocurrió el evento y la secuencia de los eventos que delimitan el evento; también es importante tener claro y definir el cuándo relativo (durante una tormenta, cambio de turno, etc).

¿Qué cambió? Determinar cómo estaban las variables de operación, mantenimiento, medio ambientales, antes de la ocurrencia del evento y determinar si alguna o varias de ellas pudieron incidir.

¿Quién estuvo involucrado? Conocer quiénes fueron los directos implicados en la ocurrencia del evento en todos los niveles: operadores, mantenedores, supervisores, ingenieros, gerentes y otros.

ⁱⁱⁱ El diagrama de Pareto, también llamado curva cerrada o Distribución A-B-C, es una gráfica para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite asignar un orden de prioridades.

¿Cuál es el impacto? Como afectó el evento, determinando la magnitud evaluando en términos de lesiones, confiabilidad, monetarios en función de daños en equipos y pérdidas de producción; cruzando con la matriz de criticidad.

¿Pasará de nuevo? Evaluar las probabilidades de ocurrencia nuevamente del evento o situaciones similares que se puedan presentarse.

¿Puede prevenirse la recurrencia? Determinar cómo es posible que se vuelva a presentar el evento si es posible o en eventos similares.

Elaboración del reporte preliminar de evento o reporte de falla

Cuando se produce un evento, la persona a cargo de la actividad en el lugar de ocurrencia debe notificarlo, dentro de las primeras 24 horas de ocurrido el evento, al responsable del área de operación en donde ocurrió y al responsable de la actividad específica que se estaba desarrollando. Para esto se utilizará el formato de reporte preliminar de evento o reporte de falla, el cual consta de cinco puntos que se deben diligenciar con la siguiente información:

- Información de la falla: Explicar qué ocurrió, qué componente falló, hora que ocurrió el evento, TAG^{iv} del equipo, donde ocurrió el evento, etc.
- Evidencias de la falla: Registrar antecedentes de la falla y qué alarmas se presentaron.
- Acciones correctivas: Registrar que actividad se realizó para corregir el evento de falla
- Causas posibles
- Recomendaciones

Recopilación de la Información del Evento o Evidencias

Las preguntas realizadas durante la identificación del evento permiten determinar la magnitud del evento. Para preservar la evidencia de la información mencionada, es requerido conservar toda la información posible para realizar el análisis. Cuando la información no es capturada oportunamente los equipos reinician operaciones, las personas olvidan lo ocurrido o intercambian ideas confundiendo como se desarrollaron los eventos.

^{iv} Un TAG o etiqueta es un conjunto de palabras claves que se encuentran asociadas a la identificación de un equipo

Dentro de la metodología RCA, es necesario recopilar la mayor cantidad posible de información y evidencias para hacer el análisis. Para capturar la información puede emplearse el concepto de las 5 P's: posición, partes, personas, paradigmas, papeles.

“Posición”, o escena del evento es clave para encontrar la causa raíz, donde se ubican: fotografías, videos, diagramas que indiquen ubicaciones, orientación, distancia con puntos fijos de referencia. Ubicación de válvulas, interruptores, indicadores, personas, equipos. Condiciones de tiempo y ambiente (ruido, iluminación, clima, etc.)

Las “partes” son referidas a los componentes de los equipos que generaron la falla, es importante conservar las piezas deterioradas que fueron reemplazadas por nuevos repuestos siempre y cuando sea posible, además lo amerite el análisis a realizar, es decir, si estas partes pueden proporcionar una pista o un indicio claro para encontrar la causa de la falla.

Las “personas” involucradas y los testigos deben ser entrevistados tan pronto como sea posible, ya que las personas tienden a olvidar lo visto o acomodarse. Las personas a entrevistar son: testigos, técnicos, operadores, ingenieros, proveedores, fabricantes, personal de bodega, gerentes, personal de laboratorio, expertos externos, consultores, compradores y otros.

La mejor forma de evitar la distorsión de los testimonios es haciendo preguntas claves, se pueden emplear las siguientes:

- Qué vio, escuchó, sintió, olió, etc.?
- Cuándo vio, escuchó, sintió, olió, etc.?
- Dónde vio, escuchó, sintió, olió, etc.?
- Quién vio, escuchó, sintió, olió, etc.?
- Por qué vio, escuchó, sintió, olió, etc.?
- Qué pudo haber evitado que esto pasara?

Los **“paradigmas”** son reglas con límites definidos, arraigados en la cultura de las personas y las empresas. Detectar los paradigmas, puede ser una tarea sencilla, tan solo escuchando los comentarios repetitivos o comportamientos reiterativos, observando las costumbres de la gente, por ejemplo, no prestar atención a las alarmas, llenar mal los formatos, entre otros. Las condiciones de trabajo también dan indicios de los paradigmas, por ejemplo, fugas excesivas, desorden en cuartos de control, partes corroídas en las bodegas.

Entre los paradigmas que comúnmente están arraigados en el interior de las empresas, están:

- No se tiene tiempo para hacer análisis.
- Esto es imposible de resolver.
- Se ha tratado de resolver por 20 años.
- El equipo es viejo, se supone que falle.
- Los análisis eliminarán personal de mantenimiento.
- No son necesarios datos para soportar los análisis porque nosotros conocemos la respuesta.
- Lo que ocurrió es conocido porque hay personal con 25 años en la empresa.

Los “papeles”, son probablemente la forma más conocida y entendida de datos: tendencias de las condiciones del proceso (temperatura, presión, flujo, nivel), impresiones de alarmas, libros de registro, cuadros, procedimientos operativos, instrucciones operativas, hojas de instrucción diaria, notas de trabajo, planos del sitio, P&ID^v o diagramas de flujo del proceso, dibujos y procedimientos de montaje de equipo, registros de mantenimiento, resultados de pruebas de laboratorio, registros de inspección, etc.

No debe olvidarse la importancia de recopilar la información oportunamente, los datos tienden a ser volátiles, las posiciones desaparecen rápidamente, las personas cambian de parecer, las partes se deterioran y los papeles se pierden. En cambio, los paradigmas son los que más se mantienen.

Clasificación del evento

La clasificación de los eventos busca optimizar la cantidad de análisis que se realizan, estableciendo la utilidad de realizar un RCA; dicha clasificación se deberá realizar mediante la matriz de riesgos y el nivel de investigación estará determinado por la clasificación potencial del mismo. Esta clasificación potencial se realiza evaluando que pudo ser lo más grave que haya podido generar el evento tomando como base el impacto o las consecuencias reales del mismo.

El usuario que reporta el evento puede sugerir un nivel de clasificación, el cual deberá estar avalado por el supervisor del área donde ocurrió el evento, que posteriormente deberá ser validado por el ingeniero de confiabilidad encargado. Para cada cliente, se deberá utilizar su matriz de riesgo, o en su defecto elaborar

^v P&ID Piping and instrumentation diagram – es lo que se define como un diagrama de tuberías e instrumentación

una en conjunto o utilizar alguna matriz genérica como la que se muestra en la Ilustración 2:

E	Medio	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
D	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Muy Alto
C	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
B	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto
A	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	Medio
Probabilidad / Consecuencia	1	2	3	4	5

Ilustración 2 Ejemplo de Matriz de riesgo

Investigación Nivel 1

Estos eventos se consideran de impacto potencial bajo, para estos no se requiere conformar un equipo investigador. Se deberá complementar el reporte preliminar de evento, donde se establezcan las causas inmediatas, las causas raíces y el plan de implementación de las soluciones efectivas si son necesarias y económicamente viables. Estos eventos se identifican en la matriz en rango Muy Bajo y Bajo.

Investigación Nivel 2 y 3

Estos eventos se consideran de impacto potencial medio y alto respectivamente, para este tipo de investigación es recomendable la realización de un RCA el cuál para su inicio, se debe elaborar un documento de términos de referencia que deben contener información general del evento, objetivo del análisis, alcance, equipo RCA, agenda de reuniones y la información necesaria para desarrollar la investigación. Estos eventos se identifican en la matriz en rangos Medio, Alto y Muy Alto.

Ejecución del Taller RCA

Al inicio de la sesión de análisis RCA, el Líder RCA o el Facilitador RCA leerá el reporte preliminar con el fin de poner en contexto a todos los integrantes del equipo RCA. Así mismo definirá los objetivos y el marco de tiempo requerido para el

análisis, y se deberá realizar una presentación introductoria de la metodología a aplicar, para que los integrantes del Equipo RCA se familiaricen con la metodología.

Se establecen como reglas básicas para el desarrollo del análisis:

- No hablar de soluciones hasta que se haya creado el diagrama de causas.
- Evitar las conversaciones colaterales, dialogar abiertamente.
- Respetar las opiniones de los demás integrantes del equipo RCA, ya que dos personas no comparten la misma realidad; cada persona en particular tiene una perspectiva diferente al análisis.
- Se debe evitar el juzgamiento de las perspectivas de otros y se debe propender por la escucha empática de todos los participantes.
- Se debe definir secuencia clara de eventos.
- Se pueden hacer suposiciones, marcándolas con un signo de interrogación, hasta que se encuentre evidencia que las validen o descarten.

Evaluar los componentes que fallaron

El análisis se concentra en revisar que falló, mediante pruebas de campo y determinando si la causa raíz es evidente o no; esto cuando la causa raíz es verificada mediante pruebas, en el caso contrario son evaluadas las causas posibles evaluando los siguientes factores:

Evaluar el diseño: determinar si los eventos ocurrieron por razones de diseños mal concebidos que pudieron generar la falla, estableciendo las características de los equipos involucrados en el evento, definiendo las funciones y rangos de operación, revisando manuales de operación, mantenimiento, procedimientos establecidos.

Adicionalmente son revisadas las especificaciones del proceso y variables de operación tales como: temperatura, densidad, volumen, presión, y otras variables cuantificables, al igual que eficiencia, potencia, pérdidas de producto de los equipos o sistemas involucrados.

Evaluar las instalaciones: Conociendo las especificaciones de las instalaciones y equipos los analistas inspeccionan visualmente determinando si hay condiciones inadecuadas para la operación de los equipos y/o instalaciones. Pueden emplearse fotografías, planos, esquemas, diagramas de flujo, para apoyar el análisis.

Evaluar las practicas operacionales: indagar sobre las actuales condiciones de operación de los equipos, es más complicado, porque definir los rangos de operaciones como velocidad, flujo, variaciones dentro del proceso y como están asociados al sistema no es una tarea sencilla. Es necesario revisar los

procedimientos de operación, seguimiento al comportamiento de variables en operación, apoyándose en sistemas supervisorios de control de proceso que en algunos casos monitorean constantemente las variables de operación. También pueden emplearse reportes donde se registren las condiciones operativas.

Evaluar las prácticas de mantenimiento: Considerar las rutinas de inspección, lubricación, monitoreo establecidas en el plan de mantenimiento, los procedimientos de reparación, al igual que los eventos ocurridos anteriormente en los equipos revisando la historia consignada en el módulo PM^{vi} de SAP^{vii} u otro de acuerdo al CMMS^{viii} utilizado por el cliente, reportes, bitácoras, entre otros.

Listar Modos de Falla / Causas Potenciales: Una vez consignada la información referida anteriormente, el grupo de análisis determina cuales pueden ser los modos de falla de la ocurrencia del evento. Pueden emplearse diagramas de árbol lógico de fallas Ilustración 3 o diagramas causa efecto Ilustración 4.

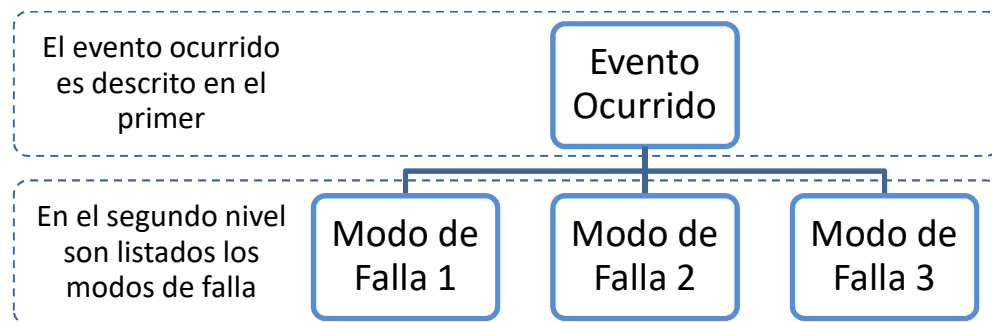


Ilustración 3 Árbol Lógico de Fallas

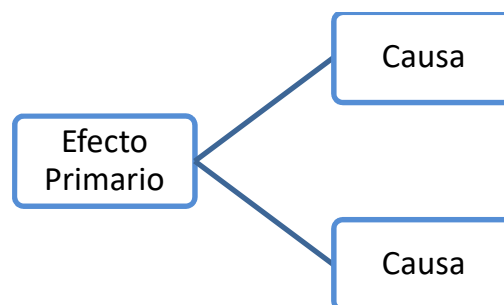


Ilustración 4 Diagrama Causa Efecto

^{vi} PM (Plant Maintenance) módulo de SAP que permite la planificación, el procesamiento y la terminación de tareas, para el mantenimiento de una planta facilitando la toma de decisiones.

^{vii} SAP (System Applications and Products) es una empresa de software empresarial, especializada en inteligencia empresarial

^{viii} CMMS (Computerized Maintenance Management System) Gestión de mantenimiento asistido por computadora u ordenador

Verificar las causas mediante pruebas: Con la información obtenida, es posible definir cuál o cuáles de las causas potenciales es la causa más probable que produjo el evento, verificando con las fotos, figuras, planos, procedimientos, reportes, seguimientos a variables de proceso, entre otros.

Confirmar la causa de falla más probable: La mencionada anteriormente permite descartar o confirmar la causa más probable. Una vez confirmada la causa más probable, se determina la característica de la misma (causa raíz física, humana, latente); esto para los casos que aplique y teniendo mucho cuidado de no hacer mucho énfasis en las causas humanas (siempre se parte del hecho de que todos actúan de buena fe), además por lo general son el resultado de una acusa latente, cómo se aprecia en la Ilustración 5.

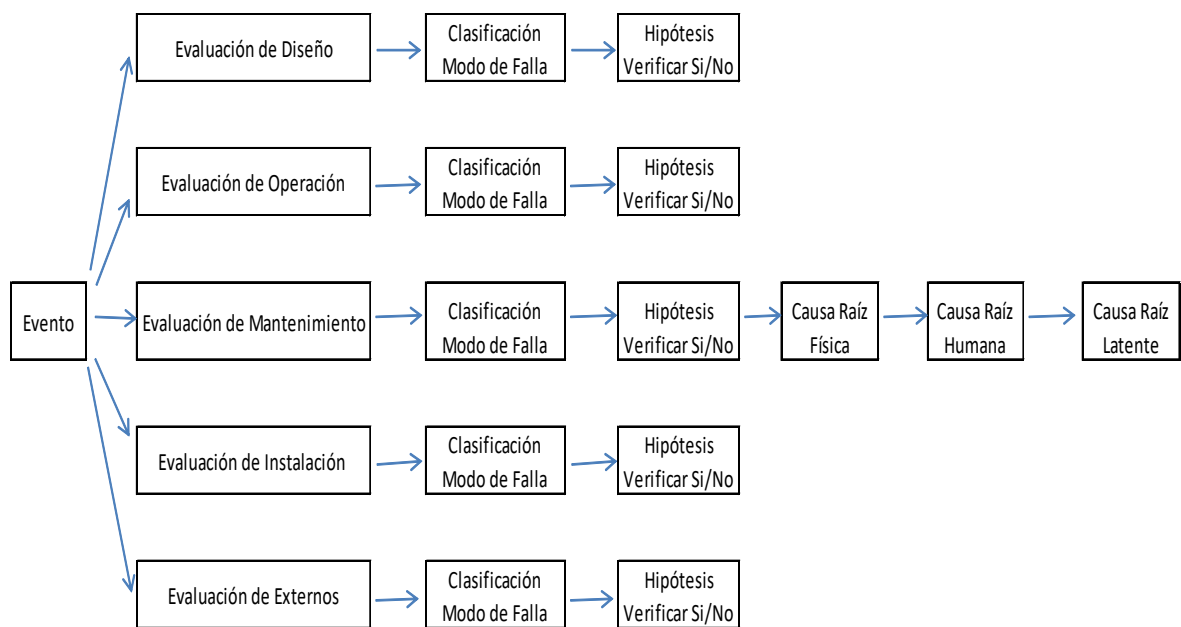


Ilustración 5 Esquema Típico Análisis Causa Raíz.

Definir potenciales acciones correctivas: Una vez fue definida la causa y cuál es la acción para corregirla en los factores mencionados anteriormente: diseño, las instalaciones o equipos, practicas operacionales, prácticas de mantenimiento. Las acciones pueden ser rediseñar o modificar un equipo, cambiar prácticas operacionales, procedimientos, entrenamiento al personal, entre otros.

Preparar análisis costo beneficio: La implementación de las acciones mencionadas anteriormente requieren de una inversión. Es necesario evaluar si la solución es costo-eficiente cuando el evento está relacionado con temas financieros (reparaciones, nuevos equipos, nuevos diseños). La implementación de soluciones no puede ser evaluadas desde el punto de vista de costo-efectividad y retorno de la inversión. Toda solución que disminuya los niveles de riesgo o elimine una situación

intolerable no debe ser evaluada desde el punto de vista financiero en organizaciones responsables.

Soporte todas las causas con evidencias.

Cada causa debe ser conocida y la evidencia de su existencia debe ser documentada en el diagrama respectivo. Esta herramienta le permite incluir la evidencia existente por cada Causa Potencial, Causa-Acción y/o cada Causa-Condición.

El equipo RCA necesita desarrollar una estrategia para la recolección de las evidencias requeridas para validar o descartar las hipótesis de causa del problema. La obtención de evidencia es crucial en los casos de eventos esporádicos o puntuales, puesto que el equipo solamente tiene una oportunidad para obtenerlas. La recolección de las evidencias de eventos crónicos o recurrentes se puede realizar simultáneamente con el restablecimiento de las condiciones normales de desempeño del proceso.

La evidencia puede clasificarse en cuatro Niveles de los cuales solo dos son aceptados como soporte del análisis:

- Evidencia Emocional: Los sentimientos y las emociones nunca son evidencias efectivas, pero, estas pueden proporcionarnos pistas hacia causas visibles.
- Evidencia inferida: Es derivada del conocimiento de las relaciones causales conocidas y repetibles.
- Evidencia Intuitiva: También es inferida, pero combina el razonamiento y los sentimientos a nivel subconsciente; por su naturaleza no es fiable.
- Evidencia sentida: Es la evidencia asociada a los sentidos, se puede oler, probar, tocar, ver y oír, y resulta incuestionable para el descarte o validación de las causas analizadas. Algunos ejemplos pueden ser fotos, registros, reportes, partes, entrevistas a testigos, etc. Los Niveles de evidencia Intuitiva y Emocional, no se deben utilizar dentro de los análisis debido a que su propia naturaleza no es fiable y objetiva.

Verificación de Causas

Cuando se haya construido completamente el diagrama, es decir cuando se hayan agotado las fuentes de información, se debe regresar al diagrama y validar las causas con información objetiva que las sustente.

Se deben eliminar las causas con información inexistente, información deficiente o que produzca dudas.

De las causas posibles que queden en el diagrama se deben postular las causas a ser solucionadas. Se debe preguntar:

¿Si desaparece la causa desaparece el efecto primario?

¿En qué medida contribuye a la eliminación del efecto primario?

Identificación de Soluciones Efectivas

Plantear posibles soluciones a las causas probables. Una solución es efectiva si:

- Previene la recurrencia de las causas identificadas.
- Cumple con las metas y objetivos de la compañía.
- Su ejecución está bajo el control de la organización.
- Es viable (costo-beneficio)
- No crea nuevos problemas.

Se debe preguntar si la eliminación de esa causa contribuye a eliminar el efecto primario o mitigarlo y calcular en qué medida. Luego es necesario asignar recursos requeridos, como personal, materiales, equipos involucrados, tiempo y costo estimado, etc.

Para seleccionar la mejor solución (o soluciones efectivas por implementar), se debe hacer una evaluación de las alternativas propuestas mediante la utilización la matriz de priorización, donde se califica la medida en que la solución satisface el cumplimiento con las metas establecidas, la prevención de la recurrencia del problema y los costos de implementación.

Para el caso del diagrama Causa – Efecto se debe tener en cuenta que si la causa a eliminar se encuentra hacia la derecha del Diagrama Causa-Efecto la solución es más económica y efectiva, debido a que probablemente contribuya a la eliminación de otras causas encadenadas. Si la causa está hacia la izquierda del diagrama, su ejecución es más controlable pero su implementación generalmente es más costosa.

Hacer recomendaciones

El grupo de análisis define unas recomendaciones las cuales son presentadas a las directivas, quien debe decidir si son aprobadas o no. En caso de no ser aprobada la solución, la información es organizada y archivada. Es importante recalcar que no aprobar la implementación es posible en el caso particular de soluciones a problemas no relacionados con el medio ambiente o la seguridad.

Las recomendaciones también son aplicables al mejoramiento de la cultura organizacional informando que practica o política empresarial debe ser corregida.

Totalizar los resultados de las soluciones y recomendaciones

Al ser implementadas las recomendaciones, es conveniente realizar un seguimiento o acompañamiento en esta labor para corroborar que la solución se realizada como fue recomendado.

Se realizará un plan de implementación detallado con acciones a corto y largo plazo, incluyendo quién está asignado a la tarea, costos de la implementación si es posible y las fechas para su completamiento.

La prioridad de la implementación de las recomendaciones puede ser altas, media o baja, dependiendo del porcentaje de éxito, efectividad y análisis costo beneficio.

Divulgación de Lecciones Aprendidas

Por cada RCA validado, se debe generar una lección aprendida, la cual contiene:

- Datos básicos del incidente y/o evento (Nombre, fecha, hora, lugar)
- Descripción
- Causas del incidente y/o evento (Raíces e inmediatas)
- Registro fotográfico
- Recomendaciones

Esta información debe ser utilizada por los usuarios del sistema para divulgar en sus Equipos de Trabajo y aprender de los detalles del incidente y/o evento para prevenir y evitar su recurrencia.

Implementación de Soluciones

El éxito de un RCA se deriva de la efectividad de las soluciones implementadas.

El Custodio del Proceso RCA debe notificar periódicamente al Superintendente de Mantenimiento, sobre las acciones aprobadas para implementación y estado.

Los responsables de implementar las soluciones propuestas por el equipo RCA, deben notificar a los involucrados en cada actividad y comprometerlos con el plan. Se acordará la estrategia y plan de acción, de tal forma que se logre cumplir con las fechas de entrega, teniendo en cuenta el alcance, la dedicación y los recursos disponibles. Los responsables de la ejecución del plan de implementación deben

documentar el avance mensual, donde se muestre el porcentaje de ejecución, además de los comentarios y observaciones del proceso.

El responsable por el éxito de la implementación de soluciones es el Gerente de mantenimiento el área donde se está ejecutando la solución. Para realizar el seguimiento de la implementación de soluciones, el Facilitador RCA de cada Equipo debe monitorear el estado de las actividades en curso, revisando el avance reportado por el responsable de la implementación.

Mensualmente el Facilitador RCA debe enviar la notificación del estado de las actividades pendientes a los responsables de la implementación, quienes deberán responder actualizando sus avances y soportes respectivos, durante las 72 horas siguientes.

En caso de retraso en las actividades programadas se debe informar dicho retraso con la justificación y la solicitud de aplazamiento con fecha de entrega. Esta última debe ser presentada por el responsable de la ejecución y autorizada por el Superintendente de mantenimiento o jefe de área responsable.

Una vez terminada una actividad se debe informar el cierre junto con los costos de la implementación y los documentos que lo soportan.

4. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO

Para realizar el análisis de causa raíz se toma como base la información suministrada por los ejecutores del mantenimiento y operadores de la planta, este análisis se divide en las siguientes fases.

4.1. FASE 1 REGISTRO DE INCIDENTES

Descripción de la falla / reporte del incidente

¿QUE PASO?

Fuga de Gas por Rotura en la tubería de 18" del Gasoducto Ballenas – Hato Nuevo.

¿CUÁNDO PASO?

El día Lunes 8 de enero de 2018.

¿DONDE PASO?

En la estación Ballenas PK0+200 Gasoducto Ballenas - Barrancabermeja

Importancia

Para el cálculo de los costos asociados a la falla (ver Tabla 1) se consideraron los siguientes valores en consenso con el grupo interdisciplinario para el RCA, estos datos fueron obtenidos de los operadores y mantenedores de la planta y verificados por el grupo de personas que participaron en el taller.

Tabla 1 Costos de la falla

ÍTEM	Pesos Colombianos	USD
Lucro Cesante	10,979 MPC ^{ix}	(Precio Variable)
Costo Reparación	\$ 686,217,510	\$ 228,739.17
Total	\$ 686,217,510 + 10,979 MPC	\$ 228,739.17 + 10,979 MPC

^{ix} MPC - Miles de Pies Cúbicos

Especificaciones del Gasoducto (Tubería):

Año construcción: 1998	Longitud gasoducto: 79.40 km
Tubería Grado: API 5L X65 [2]	Tubería con costura longitudinal ERW ^x
Diámetro nominal: 18"	Espesor nominal: 8.64 mm
MAOP ^{xi} (PSI): 1199.46	MAOP (MPa): 8.27
Presión de diseño (PSI ^{xii}): 1240.07	Presión de diseño (MPa): 8.54
Límite elástico - mínimo especificado (PSI): 65000	
Límite elástico - mínimo especificado (MPa ^{xiii}): 448	
Resistencia a la tracción máxima específica (PSI): 77000	
Resistencia a la tracción máxima específica (MPa): 530	

En la Fotografía 1 se puede apreciar la localización y disposición de las tuberías en el lugar del evento:



Fotografía 1 Localización de tuberías y lugar del evento

4.2. FASE 2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Identificación del problema

Secuencia de eventos:

Lunes 08 de enero de 2018

Turno: 06:00 – 18:00

Operador entrante: NS^{xiv}

Operador saliente: RG^{xv}

^x ERW - Electric Resistance Weld - Soldadura por resistencia eléctrica

^{xi} MAOP (Maximum allowable operating pressure) es la presión máxima permitida de operación

^{xii} PSI – unidad de presión equivalente a Libra por pulgada cuadrada

^{xiii} MPa - Megapascales

^{xiv} Nombre del operador, censurado para proteger privacidad

^{xv} Nombre del operador, censurado para proteger privacidad

A continuación, se transcriben los eventos de acuerdo a la narración de los operadores de turno:

07:08 Ingreso del personal para labores de limpieza y aplicación de pintura

11:45 A esta hora ocurre una fuerte explosión, se presume que sucede dentro de la estación, a la salida de la trampa de envío^{xvi}.

13:30 Disminución de las llamas, la explosión ocurrió aproximadamente a 100 metros de la estación.

14:00 Se recibe llamada de la empresa D^{xvii} para solicitar el cierre de las válvulas de ellos dentro de la estación.

Definición del problema

Esperado: Operación normal del Gasoducto sin inconvenientes durante el despacho a clientes.

Real: En esta condición aislada se presenta fuga por rotura del Gasoducto a 200 metros de la estación ballenas.

Impacto: El impacto en este incidente se determina por el costo económico, quejas y/o reclamos de los clientes y adicional la afectación a personas.

4.3. FASE 3. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

El Análisis Causa Raíz (RCA) se desarrollará inicialmente mediante dos Talleres donde se dará a conocer la Metodología a utilizar para la elaboración del árbol Lógico de Fallas y como analizar cada una de las posibles causas raíz.

Elaboración árbol lógico de fallas

La elaboración del Árbol Lógico de Fallas está basada en la norma ASME B318-S [3], donde se toman las tres variables para la determinación de los modos de fallas: Dependientes del tiempo [3], estables en el tiempo [3] e independientes del tiempo [3]. Elaborando inicialmente el árbol con los modos de falla dados a conocer en la siguiente Ilustración 6:

^{xvi} Trampa de envío - Son equipos utilizados principalmente para introducir y remover herramientas de limpieza dentro de la tubería

^{xvii} Ver Fotografía 1 Localización de tuberías y lugar del evento



Ilustración 6 Árbol Lógico de fallas basado en ASME B31.8S [3]

Análisis de causas posibles

Para realizar el análisis de causas posibles se emplea la metodología del diagrama Causa efecto que apreciamos en la Ilustración 7 la cual, se inicia con la pregunta:

¿Por qué sucedió la fuga por rotura en el PK0+200 del Gasoducto Ballenas – Hato Nuevo?

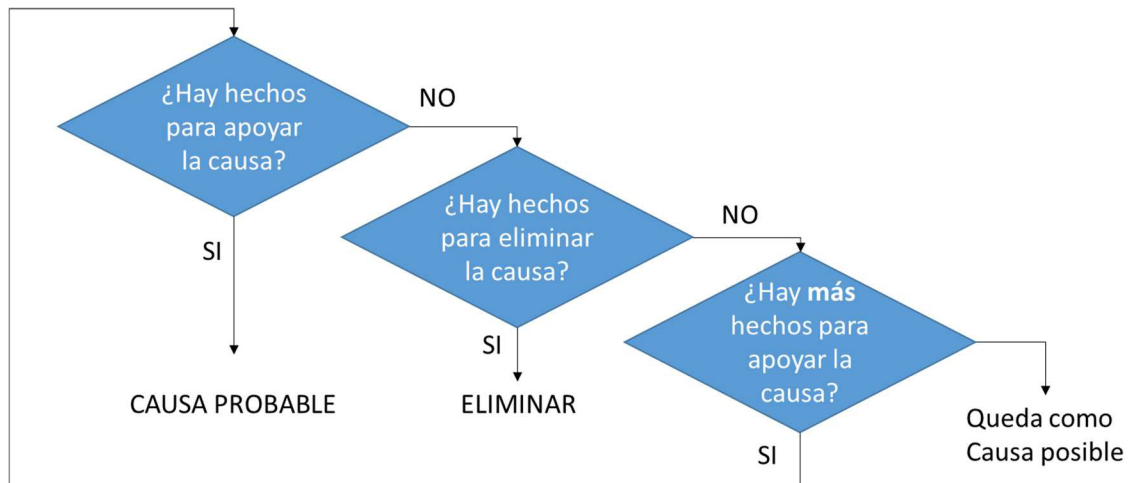


Ilustración 7 Proceso de identificación de las causas

Como instrumento de partida se emplea la metodología de Lluvia de Ideas, donde participan todo el personal de la Empresa A^{xviii} presente en el taller. Como resultado de esta lluvia de ideas aplicada a cada uno de los modos de fallas se pudo determinar una serie de causas dadas a conocer en la Ilustración 8:

^{xviii} Ver Fotografía 1 Localización de tuberías y lugar del evento

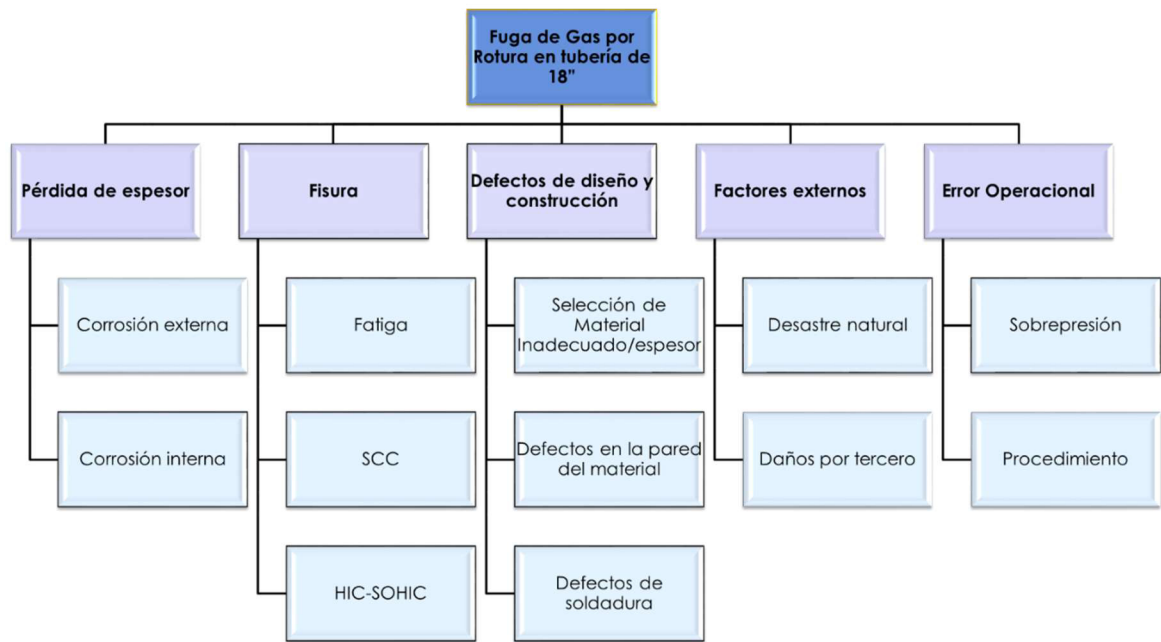


Ilustración 8 Árbol Lógico de fallas basado en ASME B31.8S [3]

Validación de datos

El propósito de este paso es determinar cuál de las causas posibles determinadas en el paso anterior tienen hechos que la soporten. Este paso se enfoca en eliminar los datos que no son verificables tal como lo muestra la Ilustración 9. Esto se realiza con la finalidad de asegurar un proceso de solución de problemas basado en hechos tangibles quedando las causas probables o raíz.

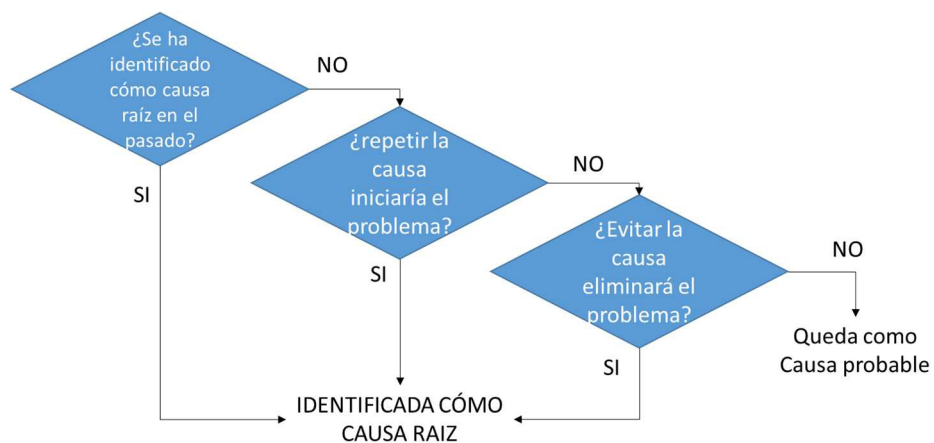


Ilustración 9 Proceso Validación de las causas

A partir de esta premisa se eliminaron las causas que no fueren ni posibles ni probables tal como se muestra en los siguientes gráficos y tablas.

En la Ilustración 10 y las Tabla 2, *Tabla 3* y *Tabla 4* se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente a corrosión localizada, en los apartados de recubrimiento, protección catódica, interferencia entre sistemas de protección catódica y ambiente corrosivo.

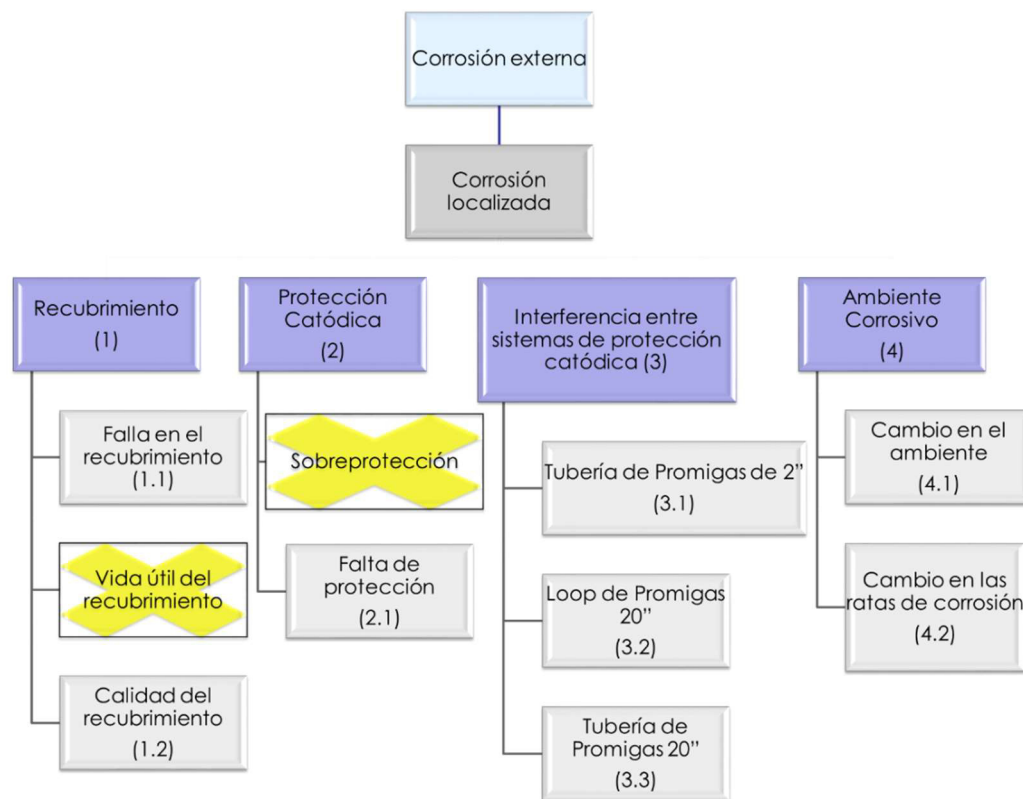


Ilustración 10 Árbol Lógico de fallas por corrosión externa basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 2 Descripción de eliminación de causas por recubrimiento

	Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Recubrimient	Pérdida del recubrimiento antes del evento	Contribuyente	Debido al análisis de falla realizado se determinó que se presentaba daño en el recubrimiento en la zona afectada [4].
	Vida útil del recubrimiento	Descartado	FBE ^{xix} Larga vida útil (+ 20 años)

^{xix} FBE - Fusion bonded epoxy, Recubrimiento epóxico

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Calidad del recubrimiento	Contribuyente	Debido a la incertidumbre del estado del recubrimiento en el lugar de la falla, se desconoce el estado de la misma antes del suceso.

Tabla 3 Descripción de eliminación de causas por protección catódica

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Protección Catódica	Sobrepotección	Descartado Los potenciales en OFF reportados están por debajo de -1200mV [5]
	Falta de Protección	Contribuyente No se puede demostrar que la tubería se encontraba protegida indirectamente. El PK 0 es una tubería aislada por una junta monolítica y que por lo tanto no incide en la polarización de los 79 km de tuberías tendidos hasta la Estación compresora Hatonuevo. Sin embargo, se puede concluir que la tubería enterrada dentro de la Estación Ballena cumple con el criterio de los - 850 mv [5] y que por lo tanto está tubería se encuentra protegida catódicamente. La tubería que sale de la estación Ballena hasta la estación compresora Hato Nuevo se encontraba al momento de rotura sin la acción del rectificador de Cuestecitas ^{xx} (por la acción vandálica reiterativa de terceros, con 9 acciones de robo desde el año 2012), lo que significa que la tubería desde Ballena hasta Hatonuevo se encuentra sin una de las barreras para la protección de la corrosión, como segunda protección después del recubrimiento.

Tabla 4 Descripción de eliminación de causas por Interferencias entre sistemas de protección catódica y ambiente corrosivo

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?	
Interferencia entre sistemas	Tubería de Empresa C ^{xxi} de 2"	Raíz	Existe interferencia eléctrica con los sistemas de protección catódica de las tuberías aledañas. El daño se pudo generar por un fenómeno de interferencias DC [6], es decir entre sistemas de protección catódica, un fenómeno de este tipo
	Loop ^{xxii} de Empresa C 20"	Raíz	
	Tubería de Empresa C 20"	Raíz	

^{xx} Corregimiento Cuestecitas – Maicao Guajira

^{xxi} Ver Fotografía 1 Localización de tuberías y lugar del evento

^{xxii} Loop - Bucle de tuberías

	Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
			puede acelerar las tasas de corrosión de una tubería frente a otra.
Ambiente Corrosivo	Cambio en el Ambiente	Contribuyente	Agua de mar; incrementándose por acumulación de agua salobre, por tormenta ocurrida en octubre 2016
	Cambio en las Ratas de Corrosión	Contribuyente	Se acelera el proceso de corrosión al conjugar todas las situaciones que se presentan. Se infiere que la interferencia que presentan las líneas que están protegidas, aceleran el proceso de corrosión de este tramo.

En la Ilustración 11 y la *Tabla 5 Descripción de eliminación de causas por afectación por bacterias y corrosión generalizada*, se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente a la afectación por bacterias y corrosión generalizada.



Ilustración 11 Árbol Lógico de fallas por corrosión externa basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 5 Descripción de eliminación de causas por afectación por bacterias y corrosión generalizada

Modo de Falla		Tipo de Causa	¿Por Qué?
Afectación por bacterias	Concentración por encima de los límites permisibles	Descartado	En inspección visual no se observó presencia ni formación de bacterias y por los resultados del Informe de fallas no se encontraron bacterias. [4]
	Cambio Morfología Física por afectación de bacterias.	Descartado	No se observaron cambios en la morfología física del material de acuerdo al Informe de falla [4]
Recubrimiento	Aplica en forma similar a la corrosión Localizada	Descartado	Se descarta este modo de falla debido a que en el análisis de falla ni en la inspección visual de la tubería mientras se reparaba el tramo; no se evidencia corrosión general sino localizada [4]
Protección Catódica			
Corrientes parásitas			
Ambiente Corrosivo			

En la Ilustración 12 y la Tabla 6, se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente a la afectación por presencia de H₂S, glicol, erosión o abrasión.

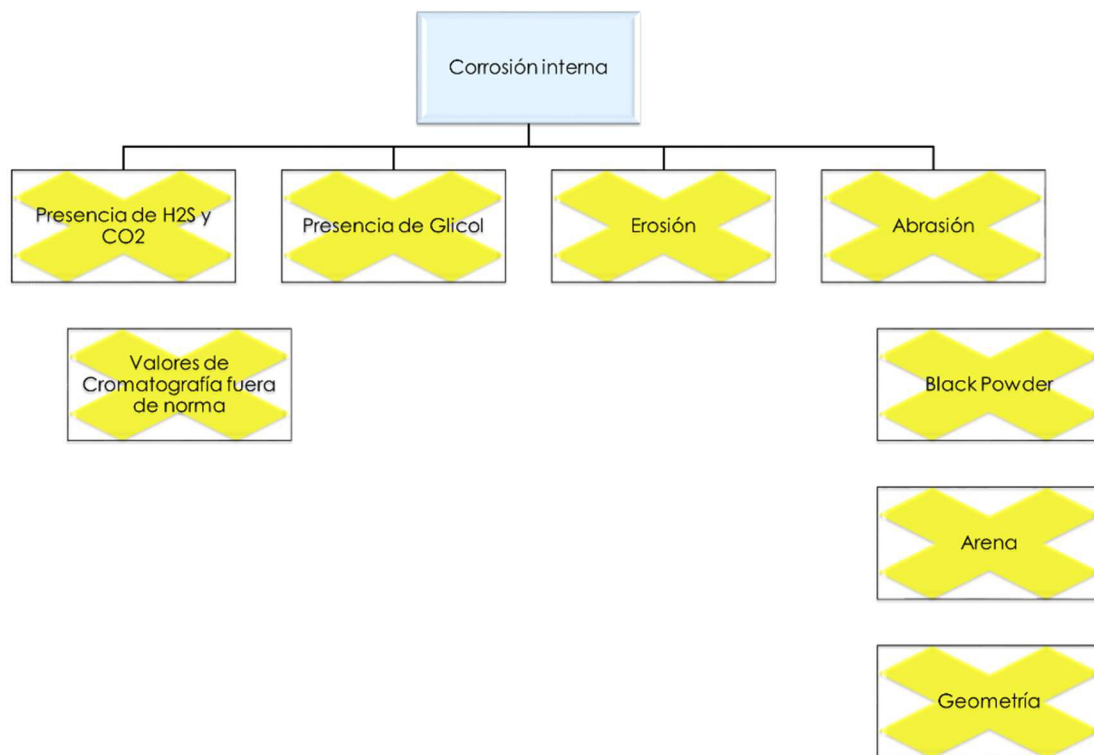


Ilustración 12 Árbol Lógico de fallas por corrosión interna basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 6 Descripción de eliminación de causas por afectación por presencia de H2S, glicol, erosión o abrasión

Modo de Falla		Tipo de Causa	¿Por Qué?
Presencia de H2S y CO2	Valores de Cromatografía fuera de norma	Descartado	Límites permisibles. [4] [7] [8]
Presencia de Glicol	Valores de Cromatografía fuera de norma	Descartado	Valores dentro de norma [4]
Erosión	No se observaron rasgos en la pared del tramo de tubería analizado	Descartado	El reporte de Fallas no determinó erosión en pared interna en el sector de tubería analizado. [4] [8]
Abrasión	No se observaron rasgos en la pared del tramo de tubería analizado	Descartado	La geometría de la línea es recta no permitiendo abrasión con el fluido. En las limpiezas realizadas no se detectaron partículas que puedan contribuir a la abrasión. [8]

En la Ilustración 13 y la Tabla 7, se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente a la afectación por fatiga, SCC y HIC-SOHIC.

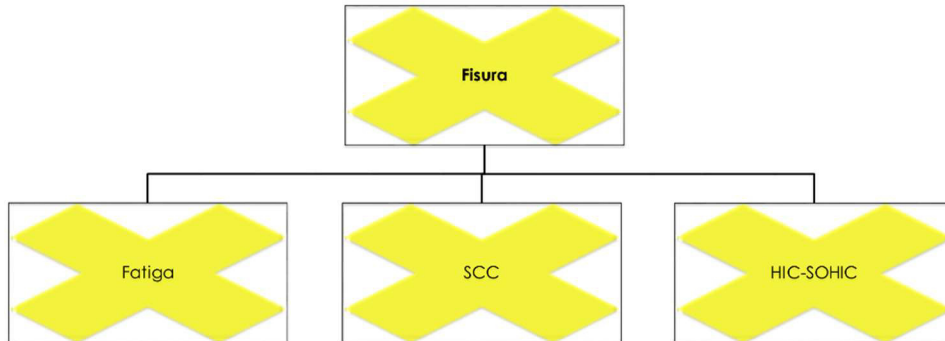


Ilustración 13 Árbol Lógico de fallas por fisura basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 7 Descripción de eliminación de causas por fatiga, SCC y HIC-SOHIC

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Fatiga	Descartado	Por los valores obtenidos en los reportes diarios no existen variaciones drásticas para producirse fatiga en el material. [8]
SCC ^{xxiii}	Descartado	De acuerdo al informe de fallas no se detectaron propagación de grietas [4] [8]
HIC-SOHIC ^{xxiv}	Descartado	De acuerdo al informe de fallas no se detectaron propagación de grietas [4] [8]

En la Ilustración 14 Ilustración 13 y la Tabla 8 se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente por defectos de construcción.

^{xxiii} SCC – Stress Corrosion Cracking – Agrietamiento por corrosión bajo tensión

^{xxiv} HIC-SOHIC – Hidrogen Induced Cracking Stress oriented Hydrogen Induced Cracking – Agrietamiento inducido por hidrógeno Agrietamiento inducido por hidrógeno bajo tensión

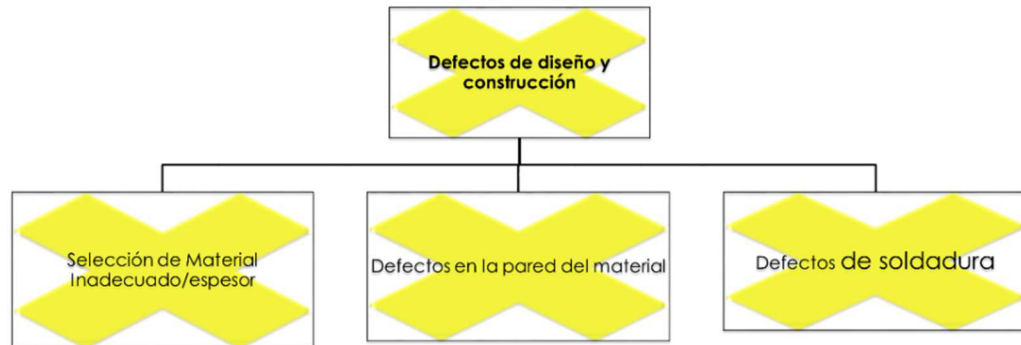


Ilustración 14 Árbol Lógico de fallas por defectos de diseño y construcción basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 8 Descripción de eliminación de causas por defectos de construcción

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Selección de Material Inadecuado /espesor	Descartado	En el análisis de falla se evidencia que el material cumple con el código de diseño [4] [9]
Defectos en la pared del material		
Defectos de soldadura		

En la Ilustración 13 Ilustración 15 y la Tabla 9 se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente por defectos de construcción.



Ilustración 15 Árbol Lógico de fallas por factores externos basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 9 Descripción de eliminación de causas por factores externos

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Terremoto	Descartado	No se reportó un terremoto antes ni durante el incidente
Huracán	Descartado	No se reportó un huracán antes ni durante el incidente
Presencia de Falla Geotécnica	Descartado	No se encuentran fallas en el lugar del suceso
Avalanchas	Descartado	No existe un lugar propicio para avalanchas
Sabotaje	Descartado	NO existen Sabotaje de acuerdo a Informe del personal de seguridad física

Excavaciones e intervenciones	Contribuyente	NO se han realizado excavaciones por parte de la empresa A. Se evidencia que hubo intervención para la instalación de una tubería de 2" y la desconexión de dos cables (fotos en el análisis de falla) generando probabilidad de par galvánico por la no recuperación adecuada del recubrimiento. [4]
Daño No Intencional	Descartado	NO se evidencian daños por terceros de acuerdo al informe del personal de seguridad física
Sobrepresión	Descartado	Según reportes de presiones diarias, las presiones se mantuvieron dentro del límite

En la Ilustración 13 Ilustración 16 y la Tabla 10 se muestra el árbol lógico de fallas referente al mecanismo de daño por corrosión externa, específicamente por defectos de construcción.

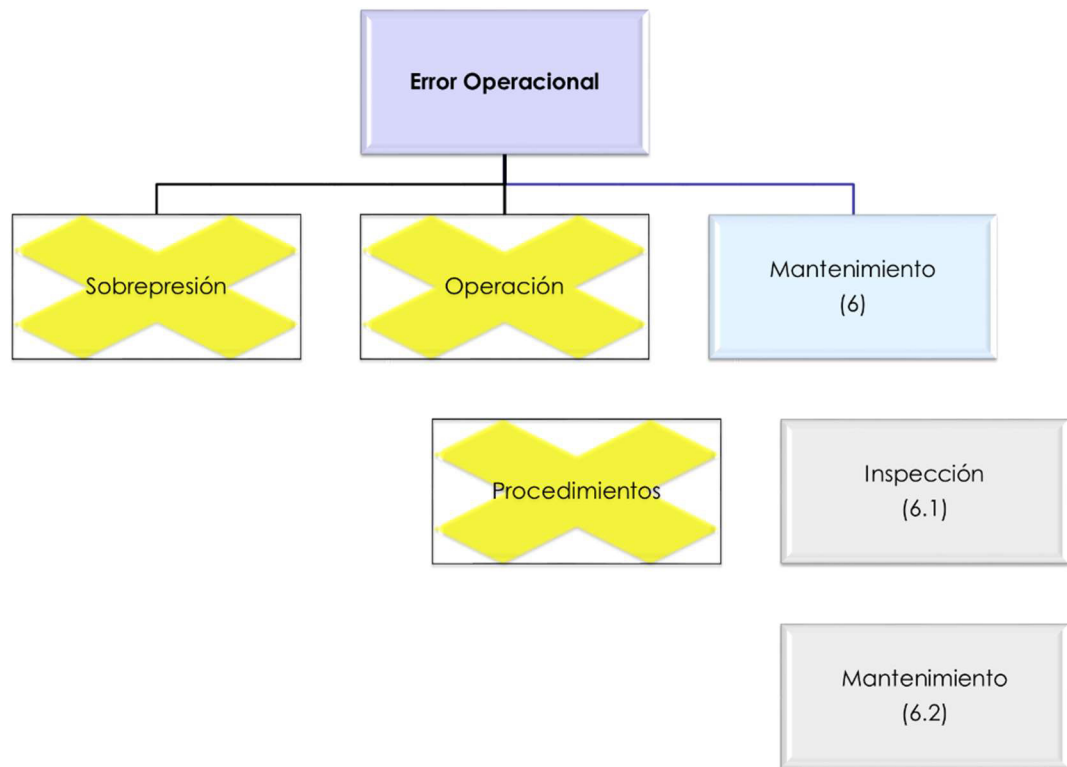


Ilustración 16 Árbol Lógico de fallas por error operacional basado en ASME B31.8S [3]

Tabla 10 Descripción de eliminación de causas por error operacional

Modo de Falla	Tipo de Causa	¿Por Qué?
Operacionales	Descartado	No se evidencian operaciones incorrectas.
Proceso administrativo de gestión	Contribuyente	Debido a la falta de retroalimentación del operador anterior; no se actualizó el plan de gestión del cambio (plan actualizado) desde la entrega de la infraestructura para las nuevas condiciones (cambio de las condiciones ambientales, de terreno; protección catódica).

4.4. FASE 4 DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN

En esta etapa se busca el desarrollo de la solución con el fin de responder el interrogante:

¿Qué hacemos para eliminar la causa o causas raíces descubiertas en el análisis?

Se especifica lo que se debe cumplir, y requerimientos mínimos de las soluciones posibles, mediante la evaluación y comparación de estas, entendiendo los riesgos asociados a nivel técnico, económico, humano, ambiental y de imagen corporativa.

Selección de Criterios

El objetivo es definir los factores específicos que deben ser satisfechos por la solución. Para tal fin se emplea las siguientes preguntas.

Definir las **Metas Requeridas** preguntando:

- a. “Que debe lograr la solución?”
- b. “Que debe evitar la solución?”
- c. “Que debe mantener la solución?”

Definir las **Metas Deseadas** preguntando:

- d. “Que desea que la solución ideal alcanzara?”
- e. “Que desea que la solución ideal evitara?”
- f. “Que desea que la solución ideal mantenga?”

a. *¿Que debe lograr la solución?*

La solución debe lograr que se conozca el estado de integridad del Gasoducto de manera.

b. *¿Que debe evitar la solución?*

La solución debe evitar la parada del sistema debido a fuga por rotura en el Gasoducto.

c. *¿Qué debe mantener la solución?*

La solución debe mantener la disponibilidad del sistema y garantizar la integridad del Gasoducto.

d. *¿Qué desea que la solución ideal logre?*

Lograr que se mantengan todas las barreras de protección del gasoducto en funcionamiento.

e. *¿Qué desea que la solución ideal evite?*

Evitar la parada del sistema por pérdida de contención, fuga o cualquier otra eventualidad.

f. *¿Qué desea que la solución ideal mantenga?*

Mantener la integridad del Gasoducto y sus barreras de protección.

Recomendaciones de solución

El propósito es plantear recomendaciones de solución, para el problema y causas identificadas, estas recomendaciones de solución deben cumplir con los “debes” establecidos como condición inicial y fundamental.

Estas recomendaciones se deben plantear en diversos niveles de acción de acuerdo a las posibilidades de solución del problema. Para este problema y causa raíz en particular se plantearon las siguientes recomendaciones de solución:

- Recomendación 1. Actualización del plan de integridad para definir nuevas frecuencias de inspección de las técnicas de inspección de recubrimiento y protección catódica.

- Recomendación 2. Realizar de acuerdo a la planeación que se tenía, la corrida de herramienta de inspección ILI para determinar el estado de integridad del Gasoducto Ballenas - Hato nuevo.
- Recomendación 3. Realizar estudio de interferencia eléctrica a fin de determinar el grado de interferencia, tasas de corrosión, para después ajustar el sistema de protección catódica y poder mitigar esta situación y ajustar frecuencias de inspección.
- Recomendación 4. Implementar talleres de trabajo, donde se comuniquen las acciones que puedan afectar áreas de interés común a fin de evaluar, analizar y tomar acciones correctivas para mitigar el problema de interferencia, protección catódica y/o cualquier otro tipo de evento que se pueda suscitar entre compañías vecinas (PDVSA, CHEVRON, PROMIGAS).
- Recomendación 5. Actualizar el plan gestión al cambio tomando en cuenta las nuevas condiciones ambientales, protección catódica y terceros.

Las cinco recomendaciones cumplen con los “**debes**” estipulados.

Para el correcto desarrollo y entendimiento de las recomendaciones planteadas, se estableció una secuencia general de actividades las cuales presentan el desarrollo lógico de las alternativas, El detalle y secuencia de estas se presentan en la Tabla 11:

Tabla 11 Secuencia de recomendaciones

RECOMENDACIONES	COBERTURA
Actualización del plan de integridad para definir nuevas frecuencias de inspección de las técnicas de inspección de recubrimiento y protección catódica.	Recubrimiento, Protección catódica, Interferencias entre sistemas de protección catódica, Ambiente corrosivo, Inspección y Mantenimiento
Realizar corrida de herramienta de inspección ILI ^{xxv} para determinar el estado de integridad del Gasoducto Ballenas - Hatonuevo.	Inspección y Mantenimiento

^{xxv} ILI – In line inspection – Inspección en línea con marrano inteligente

RECOMENDACIONES	COBERTURA
Una vez se cuente con los resultados de la herramienta inteligente se recomienda realizar FFS [10], para determinar los defectos que son investigables o reparables mediante análisis de ingeniería desarrollados para demostrar la integridad de un componente.	Inspección y Mantenimiento
Se recomienda realizar un estudio de interferencia eléctrica a fin de determinar el grado de interferencia, tasas de corrosión, para después ajustar el sistema de protección catódica y poder mitigar esta situación y ajustar frecuencias de inspección.	Interferencias entre sistemas de protección catódica
Implementar talleres de trabajo, donde se comuniquen las acciones que puedan afectar áreas de interés común a fin de evaluar, analizar y tomar acciones correctivas para mitigar el problema de interferencia, protección catódica y/o cualquier otro tipo de evento que se pueda suscitar entre compañías vecinas	Daños por terceros
Se recomienda actualizar la valoración de riesgos de integridad de la línea [11], para poder enfocar las inspecciones y frecuencias en las zonas de mayor impacto.	Inspección y Mantenimiento
Actualizar el plan gestión al cambio [12] tomando en cuenta las nuevas condiciones ambientales, protección catódica y terceros.	Inspección y Mantenimiento

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se dio a conocer mediante la metodología de análisis causa raíz la causa probable y/o raíces que actuó para producirse el evento “ROTURA EN TUBERÍA DE 18” PK0+200 GASODUCTO BALLENA – BARRANCABERMEJA”.
- Durante el desarrollo del documento se describió un procedimiento estandarizado aplicando la metodología análisis causa raíz administrando mediante un árbol de fallas y seguido de una forma estructurada.
- Las fallas reportadas quedan registradas cómo con lecciones aprendidas, teniendo en cuenta su impacto al medio ambiente, a la producción, al mantenimiento, a la calidad e imagen de la organización y a los aspectos de seguridad industrial.
- Se generó un plan de recomendaciones^{xxvi} de fácil implementación que permite evitar la repetibilidad de este suceso en gasoductos de condiciones similares.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo del presente análisis causa raíz, es necesario actualizar el plan de integridad actual con el que cuenta la Empresa A con el fin de definir nuevas frecuencias de inspección usando técnicas de inspección de recubrimiento y protección catódica.
- Se requiere realizar un estudio de interferencia eléctrica, a fin de determinar el grado de interferencia, junto al cálculo de tasas de corrosión, que implemente un ajuste en el sistema de protección catódica y así mitigar esta situación ajustando las frecuencias de inspección.
- Con el fin de mejorar el hallazgo de causa raíz de este RCA se busca implementar talleres de trabajo, donde se comuniquen las acciones que puedan afectar áreas de interés común en empresas vecinas y así evaluar, analizar y tomar acciones correctivas para mitigar el problema de interferencia, protección catódica y/o cualquier otro tipo de evento que se pueda suscitar entre compañías vecinas.
- La realización de la actualización de la valoración de riesgos bajo API 580 [11] busca enfocar las inspecciones y frecuencias en las zonas de mayor impacto, además de contar con una previsión y valoración actual del riesgo en las zonas de alta consecuencia.

^{xxvi} Ver Tabla 11 Secuencia de recomendaciones

- Aunque se evidencian acciones tardías de ejecución, éstas a su vez se deben a causas latentes entre compañías vecinas, la colaboración entre estas es lo que finalmente logrará la eliminación o mitigación de este evento mediante las ejecuciones de las recomendaciones propuestas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Uzcátegui, «PLANIFICACION, CONTROL y PRODUCTIVIDAD DE PROYECTOS,» 2017.
- [2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API SPECIFICATION 5L, WASHINGTON: API, 2018.
- [3] Engineers, The American Society of Mechanical, ASME B31.8S Managing System Integrity of Gas Pipelines, New York: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2020.
- [4] C. CIMA, «ANÁLISIS DE FALLA TUBERÍA GASODUCTO DE 18”. ESTACIÓN BALLENA – HATO NUEVO. TGI - LA GUAJIRA.,» BUCARAMANGA.
- [5] NACE, NACE SP0169, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, NACE, 2013.
- [6] NACE, NACE SP0177-2007 Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems, NACE, 2007.
- [7] NACE, Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production, NACE, 2015.
- [8] API, API 571 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, API, 2020.
- [9] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API 5L - Specification for Line Pipe, API, 2013.
- [10] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API 579-1 Fitness For Service, API, 2016.
- [11] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API 580 - RISK BASED INSPECTION, API, 2020.
- [12] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API Q1 - Specification for Quality Management System Requirements for Manufacturing Organizations for the Petroleum and Natural Gas Industry, API, 2019.
- [13] The American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME, 2014.