

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE
REGULACIÓN CITY GATE LA DORADA.**

FERNANDO TORO OVIEDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2014

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE
REGULACIÓN CITY GATE LA DORADA.**

FERNANDO TORO OVIEDO

Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director:

ALEJANDRO DÍAZ OCHOA

Magister en Administración

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios por conceder el tiempo y los recursos necesarios para conseguir esta meta en mi vida profesional que con seguridad traerá grandes satisfacciones en el ámbito laboral y personal.

A mis dos grandes amores Paola Y Paula Fernanda quienes incondicionalmente están a mi lado en todos los proyectos que emprendo, que con amor y dedicación lograron transmitir apoyo y comprensión, en los momentos de soledad e incertidumbre.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. ASPECTOS GENERALES	16
1.1 DESCRIPCIÓN DE UN CITY GATE	17
1.1.1 Contenedor	17
1.1.2 Sistema de filtración	17
1.1.3 Sistema de regulación	18
1.1.4 Sistema de medición	19
1.1.5 Sistema de calentamiento	21
1.1.6 Sistema de odorización	22
1.2 NORMATIVA DE APLICACIÓN	23
1.2.1 Estaciones de regulación y medición	23
1.2.2 Tuberías, válvulas y accesorios	23
1.2.3 Reguladores de presión de gas	24
1.2.4 Medidor volumétrico	24
1.2.5 Corrector volumétrico	24
1.2.6 Manómetros	24
1.2.7 Filtros	24
1.2.8 Espárragos y tuercas	24
1.2.9 Eléctricas	24
1.2.10 Instrumentación	25
1.2.11 Soldaduras	25
1.3 SOFTWARE RAPTOR	25
1.3.1 Características de Raptor	27
1.3.1.1 Aplicaciones de Raptor	28
2. MARCO TEORICO	29
2.1 ANALISIS CAUSA RAIZ [ACR]	29
2.1.1 Problemas basados en reglas	30
2.1.2 Problemas basados en eventos	30
2.1.3 El ignorar la definición del problema	30
2.1.4 El llenado de reportes y formatos	30
2.1.5 La utilización de narrativa y fábula	31
2.1.6 Procedimiento de la técnica RCA	31
2.1.6.1 Conformación de los equipos de trabajo	33
2.1.6.2 Características de los equipos de trabajo	33
2.1.6.3 Actividades que debe realizar el facilitador	34

2.1.6.4 Perfil del facilitador y áreas de conocimiento	34
2.1.6.5 Definición y jerarquización de los problemas	35
2.1.6.6 Ejemplo de definición de problemas	36
2.1.7 Definición y priorización de modos de fallos	37
2.1.7.1 Ejemplos de modos de fallos	37
2.1.8 Definición y validación de las hipótesis	39
2.1.8.1 Ejemplo de definición de las hipótesis	40
2.1.8.2 Definición de las causas raíces	40
2.1.8.3 Ejemplos de definición de causas raíces	41
2.1.9 Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas	42
2.1.9.1 Prevenir la recurrencia	42
2.1.9.2 Controlar	42
2.1.9.3 Satisfacer las metas y objetivos	42
2.1.9.4 Soluciones básicas	43
2.1.9.5 Soluciones complejas	43
2.1.10 Recomendaciones especiales	47
2.1.10.1 Cargar los datos de modos de fallos	47
2.1.10.2 Cuantificar de forma detallada	47
2.1.10.3 Proporcionar y consolidar la formación de grupos de trabajo	48
2.1.10.4 Un grupo de especialistas con identidad propia	48
2.1.10.5 Diseñar formatos estándares dentro del <i>software</i> de mantenimiento	48
2.1.10.6 Desarrollar dentro del sistema de gestión de mantenimiento	48
2.1.10.7 Aprovechar las experiencias y los resultados obtenidos de los ACR	49
2.1.10.8 Difundir la información generada por los resultados de los ACR	49
2.1.10.9 Desarrollar un programa de adiestramiento básico	49
2.1.10.10 Afianzar	49
2.2 ANÁLISIS COSTO RIESGO	49
2.2.1 Riesgo	52
2.2.2 Estimación del riesgo	53
2.2.2.1 Estimación de la probabilidad de fallas y / o confiabilidad	54
2.2.3 Formulación matemática del PGR	59
2.2.3.1 Método de estimación de la máxima probabilidad de ocurrencia (MPO)	60
2.2.3.2 Teorema de Bayes	60
2.2.4 Estimación de consecuencias	60
2.2.4.1 Modelo propuesto	60
2.2.4.2 Costos de reparación	61
2.2.4.3 Impacto ambiental e impacto en seguridad	61
2.2.5 El diagnóstico integral del proceso de confiabilidad	62

2.2.5.1 Inferir probabilísticamente	62
2.2.5.2 Identificar acciones concretas	62
2.2.5.3 Explorar las implicaciones económicas	62
2.3 ANÁLISIS COSTO DEL CICLO DE VIDA (ACCV)	62
2.3.1 Ciclo vida útil	64
2.3.1.1 Vida tecnológica	64
2.3.1.2 Vida útil	64
2.3.1.3 Vida económica	64
2.3.1.4 Período de vida útil equivalente	64
2.3.1.5 Período de vida útil diferente	64
2.3.2 Aspectos fundamentales del ACCV	64
2.3.2.1 Características de los costos	65
2.3.2.2 Tasas de interés	65
2.3.2.3 Valor presente (P) de un valor anualizado (A)	66
2.3.2.4 Valor presente simple (P) de un valor futuro (F)	66
2.3.2.5 Valor anualizado (A) de un valor presente (P)	67
3. RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS [ACR]	68
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL EVENTO	68
3.2 DESCRIPCIÓN DEL CITY GATE LA DORADA	68
3.2.1 Listado de equipos, estado mecánico y filtración	73
3.2.2 Turbine (ELSTER G 100 3"- 150# RF)	77
3.2.3 Esquema del proceso de calentamiento del CITY GATE Dorada	79
3.3 ANTECEDENTES	84
3.4 COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS	90
3.4.1 Mapa de hipótesis preliminar	93
3.4.2 Mapa de hipótesis consolidado	94
3.4.3 Validación de hipótesis	95
3.4.4 Conclusiones [ACR]	96
3.4.5 Plan de acción [ACR]	97
4. VALORACION COSTO-RIESGO-BENEFICIO	98
4.1 CIERRE CITY GATE LA DORADA. Situación actual	99
4.2 CIERRE CITY GATE LA DORADA. Situación futura	99
4.3 CITY GATE LA DORADA	100
5. ANÁLISIS COSTO CICLO DE VIDA (ACCV)	101
5.1 SITUACIÓN ACTUAL	101
5.2 SITUACIÓN INSTALACIÓN BIG JOE	103

6. CONCLUSIONES	107
7. RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFIA	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Priorización de modo de fallos	38
Tabla 2. Situación actual / eventos repetitivos en bomba P101	44
Tabla 3. Opción 1: rodamiento A	44
Tabla 4. Opción 2: rodamiento B	45
Tabla 5. Opción evaluada	46
Tabla 6. Opción evaluada: rodamiento tipo B	46
Tabla 7. Convenciones para la matriz de estado general	73
Tabla 8. Estado mecánico y filtración de equipos	73
Tabla 9. Estado mecánico y de medición de equipos	74
Tabla 10. Estado mecánico y regulación de equipos	75
Tabla 11. Espesores mínimo por diseño ASME B3103	76
Tabla 12. Diagnóstico de espesor en tubería	76
Tabla 13. Diagnóstico de ruido en accesorios y equipos	76
Tabla 14. Capacidades de las válvulas	78
Tabla 15. Capacidad de flujo en tuberías	78
Tabla 16. Capacidad de entrega actual y futura del <i>CITY GATE</i> Dorada	79
Tabla 17. Calculo de condiciones de proceso por <i>GRAHAM HELIFLOW</i>	80
Tabla 18. Especificaciones del calentador de agua	81
Tabla 19. Especificaciones del intercambiador de calor	82
Tabla 20. Análisis del polvillo	86
Tabla 21. Rangos RUT	87
Tabla 22. Deposición en gas natural	89
Tabla 23. Influencia del ácido sulfúrico	92
Tabla 24. Validación hipótesis	95
Tabla 25. Plan de acción <i>CITY GATE</i> la Dorada	97
Tabla 26. Costos unitarios	98
Tabla 27. Recursos utilizados	98
Tabla 28. Situación actual	99
Tabla 29. Situación futura	99
Tabla 30. Evaluación costo – riesgo - beneficio	100
Tabla 31. Resultado probabilidad media (1 fallas/ año)	104
Tabla 32. Alternativa (A) [ACCV]	105
Tabla 33. Alternativa (B) [ACCV]	106

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de regulación <i>CITY GATE</i>	16
Figura 2. Contenedor <i>CITY GATE</i> la Dorada	17
Figura 3. Sistema de filtración	18
Figura 4. Sistema de regulación	19
Figura 5. Sistema de medición	20
Figura 6. Válvula de seguridad	21
Figura 7. Sistema de calentamiento	22
Figura 8. Sistema de odorización	23
Figura 9. Diagrama de bloques complejos	26
Figura 10. Topología de una red tipo puente	27
Figura 11. Red avanzada	28
Figura 12. Los 4 pasos básicos en la solución de problemas	32
Figura 13. Pasos de la técnica ACR	32
Figura 14. Árbol de fallos	42
Figura 15. Procesos de validación y auditoría	47
Figura 16. Modelo costo riesgo	51
Figura 17. Probabilidad falla vs consecuencias	52
Figura 18. Proceso de diagnóstico integrado	53
Figura 19. Descomposición del indicador riesgo	54
Figura 20. Distribución sin solapamiento	56
Figura 21. Distribución asolapada	57
Figura 22. Modelo consecuencia de una falla	61
Figura 23. Características de los costos	65
Figura 24. Turbina ELSTER G100	70
Figura 25. Humedad, corrosión y deterioro Turbina ELSTER G100	70
Figura 26. Brazo interior	71
Figura 27. Válvula de <i>shut - off</i>	71
Figura 28. Otros lugares de la etapa de medición	72
Figura 29. Etapa de medición	72
Figura 30. Medidor	77
Figura 31. Proceso de calentamiento	80
Figura 32. Planimetría intercambiador de calor HELIFLOW	83
Figura 33. Mangas tipo <i>American - Meter</i>	84
Figura 34. Canastilla de las mangas de regulación	85
Figura 35. Azufre extraído de las válvulas axiales	85
Figura 36. Histórico temperatura de entrega <i>CITY GATE</i> la Dorada	87
Figura 37. Calentador acuatubular marca Graham	88

Figura 38. Regulador <i>Big Joe</i>	90
Figura 39. Formación de hidratos	91
Figura 40. Diagrama de bloques estado actual sistema de regulación	101
Figura 41. Resultado simulación probabilidad media	
Figura 42. Diagrama de bloques con etapa adicional de regulación	103

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN *CITY GATE* DORADA.*

AUTOR: FERNANDO TORO OVIEDO. **

PALABRAS CLAVE: Análisis de causa raíz, Factor causal, Árbol lógico de fallos.

DESCRIPCIÓN:

Esta monografía recopila las acciones desarrolladas en el marco de la metodología, Análisis de Causa Raíz (RCA) aplicada a la identificación de las causas raíces de los problemas en los instrumentos de regulación del *CITY GATE* la Dorada perteneciente al tramo de gasoducto Vasconia-Mariquita, esto con el fin de aplicar correctivos que los eliminen de forma definitiva. Desde el 2011 se han generado cinco (5) eventos asociados a los sistemas de regulación en las estaciones de entrega (*CITY GATE*), que pertenecen a este tramo de gasoducto; aproximadamente 298 km, con línea troncal de 18 pulgadas.

La técnica utilizada para el análisis de causa raíz (RCA) es el árbol lógico de fallas, con este procedimiento se encontró el factor causal origen del evento de daño en el sistema de regulación de gas natural en el *CITY GATE* la Dorada, como resultado surgen las acciones correctivas y las recomendaciones para la eliminación definitiva de los factores causales que producen la falla, con lo que se espera que el problema no se repita.

Para hacer seguimiento se diseña un plan de acción que contiene actividades preventivas, acciones de mejora e incrementos en el nivel de criticidad para el área de planeación de mantenimiento con el fin de ejercer un mayor control sobre los procedimientos sugeridos para la solución del problema.

*Monografía.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alejandro Díaz Ochoa.

SUMMARY

TITLE: FEASIBILITY ANALYSIS FOR REGULATION SYSTEM OPTIMIZATION
LA DORADA GATE CITY.*

AUTHOR: FERNANDO TORO OVIEDO. **

KEYWORDS: Root cause analysis, causal factor, logical fault tree.

DESCRIPTION:

This monograph collects the actions developed in the framework of the methodology, Root Cause Analysis (RCA) applied for the identification of the root causes of the problems in the regulatory instruments of the Dorada GATE CITY stretch of pipeline belonging to Vasconia-Mariquita this in order to implement the correctives that permit permanently delete these problems. Since 2011 it had been generated five (5) events associated with regulatory systems in the delivery stations (*CITY GATE*), belonging to this section of pipeline; about 298 km, with 18-inch trunk line.

The technique used for root cause analysis (RCA) is the logical fault tree, with this procedure the origin causal factor of the event of damage to the system of regulation of natural gas in the CITY GATE Dorada was found, arising as a result corrective actions and recommendations for the final disposal of the causal factors leading to failure, so it is expected that the problem does not recur.

To follow this methodology it is necessary an action plan which containing preventive activities, improvement actions and increases in the level of criticality for maintenance planning area in order to make greater control over the suggested procedures for the solution of the problem is designed.

*Monograph.

**School of Physic-Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization.
Director: Alejandro Díaz Ochoa.

INTRODUCCIÓN

Las empresas transportadoras de gas natural cuentan con un sistema de tuberías de alta presión, que garantizan la disponibilidad para el transporte de grandes volúmenes de gas natural hasta los sitios de entrega determinado por el cliente; estas cantidades están en el orden de los Millones de Pies Cúbicos Día (MPCD).

Para transferir los montos acordados, en los contratos de transporte al remitente; se deben acondicionar las presiones en los *CITY GATE* de entrega donde se hace regulación a dos etapas. Este valor de presión está estipulado como una condición contractual dado que las presiones en los puntos de salida son acordadas en los contratos; diferenciando la presión de operación normal, de la presión mínima aceptable para garantizar la calidad del servicio.

El cierre súbito de un *CITY GATE*, puede ocasionar pérdida temporal, parcial o total del suministro de gas natural a una población o zona geográfica determinada; de esta forma se afecta el normal desarrollo de las actividades de personas y empresas, ocasionando pérdidas económicas en toda la cadena de suministro.

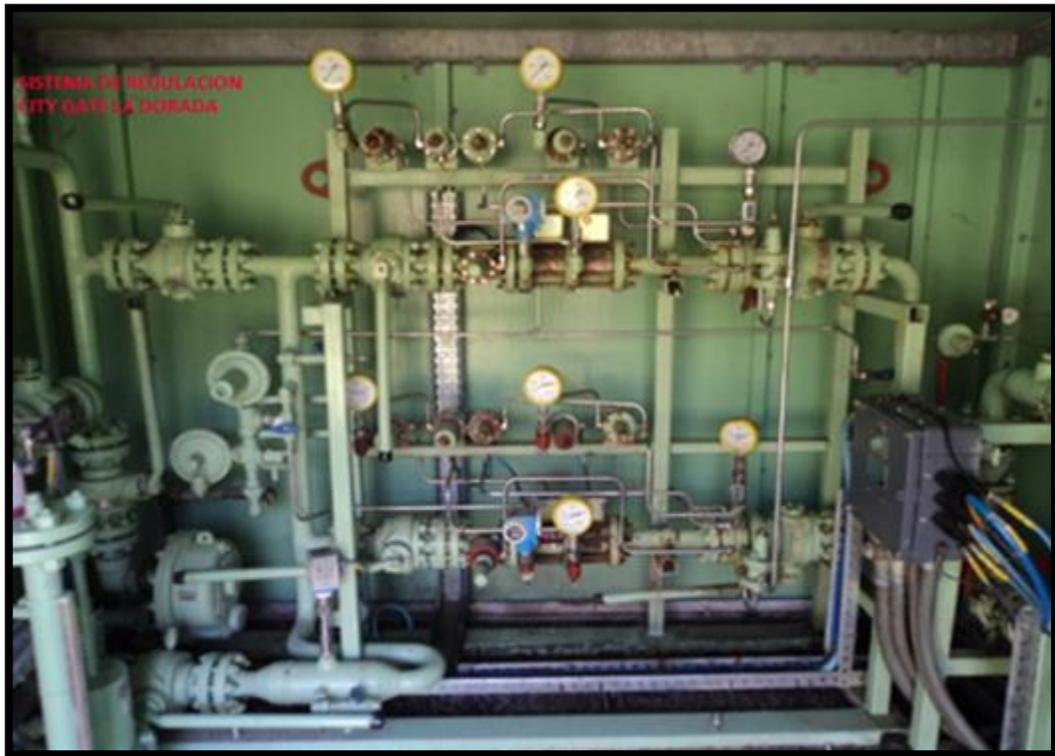
Es función del transportador mitigar los riesgos y prever planes de contingencia que minimicen el impacto; una forma es evaluar incidentes que presentan antecedentes con fallos funcionales comunes para determinar la causa raíz del suceso y tomar soluciones costo-efectivo que garanticen la continuidad del servicio; estas soluciones pueden ir desde un correctivo sistémico hasta el rediseño del sistema, con el fin de lograr los niveles de confiabilidad deseados.

El árbol lógico de fallas se emplea como parte de la metodología del análisis de causa raíz para la identificación del factor causal de la falla. La solución a la causa del problema debe evitar o reducir la recurrencia del fallo. Las posibles soluciones están soportadas en un análisis costo-riesgo-beneficio que justifica la implementación de actividades proactivas, encaminadas a aumentar la fiabilidad en los equipos de regulación en estaciones no asistidas.

1. ASPECTOS GENERALES

Un *CITY GATE*, se precisa como una estación reguladora de la cual se desprenden redes que conforman un sistema de distribución y a partir de la cual el distribuidor asume la custodia del gas, esta facilidad reduce la presión de transporte aproximadamente 1200 psi a aproximadamente 60 psi, presión de la línea del distribuidor quien a su vez le entrega al cliente final a aproximadamente 3 psi.¹

Figura 1. Sistema de Regulación *CITY GATE*



Fuente: Foto *CITY GATE* la Dorada.

Los *CITY GATE* están constituidos por los siguientes elementos:

- Contenedor para el sistema de filtración, regulación y medición.
- Sistema de filtración.
- Sistema de regulación.
- Sistema de medición.
- Sistema de calentamiento.
- Sistema de odorización.

¹ Nota del autor.

1.1 DESCRIPCION DE UN CITY GATE

1.1.1 Contenedor

Figura 2. Contenedor *CITY GATE*



Fuente: Foto *CITY GATE* Puerto Salgar.

Es la estructura metálica que contiene los sistemas de filtración, regulación y medición. En su interior se construye un bastidor metálico que soporta la reguladora, construido de manera tal que soporte los esfuerzos y el peso total de la estructura de la estación de regulación, sin que se generen flexiones, ni tenciones en la tubería o elementos de la misma durante su montaje y operación. Por lo general el bastidor está construido con perfil estructural en U en acero ASTM A-36 y se dimensiona acorde al peso que debe soportar. Los soportes se aíslan de la tubería mediante PVC.

1.1.2 Sistema de filtración. El sistema de filtración está constituido básicamente por un filtro separador horizontal, con sus válvulas e instrumentación respectiva.

Figura 3. Sistema de filtración



Fuente: Foto Sistema de filtración horizontal *CITY GATE* Puerto Salgar.

Es el elemento filtrante de partículas sólidas que ocasionan daños en los equipos ubicados aguas abajo, de igual forma, retienen condensado, presente en el gas que entrega el transportador. Estos líquidos se acumulan en dos recipientes verticales, los cuales están constituidos con dispositivos de drenaje direccionados hacia un tanque recolector de condensados ubicados fuera del contenedor.

1.1.3 Sistema de regulación. Este sistema lo conforman válvulas reguladoras, pilotadas, instrumentación asociada al sistema de regulación y válvulas de seguridad para bloqueo.

La función principal es disminuir la presión de transporte (aprox. 1200 psi) a condiciones aptas para la distribución (aprox.60 psi).

Este sistema de regulación de presión se realiza a dos etapas, con el fin de que el gas que se ha filtrado y calentado previamente, se reciba en dos brazos reguladores que funcionan: el primero en funcionamiento continuo y el segundo esta en reposo para prestar apoyo en los picos de consumo.

Figura 4. Sistema de regulación



Fuente: Foto Sistema de regulación *CITY GATE* Puerto Salgar.

La disposición de los instrumentos en los brazos de regulación se concibe para que uno trabaje y el otro permanezca en *stand-by*, de tal modo, que las válvulas piloto permiten que el segundo brazo asuma automáticamente parte de la carga cuando se presenta un pico de consumo lo que indica aumento en el flujo de gas, esta configuración evita que un brazo de regulación quede con sobrecarga.

Las válvula *shut off* configuradas por alta presión, se encuentran en cada brazo de regulación, su función es cerrar el brazo cuando se genera una presión por encima del *set point* de disparo, el cual, se establece en 60 psi. De igual forma, cada brazo cuenta con una válvula de seguridad, dicha válvula actúa por alta presión con el fin de preservar los equipos de amenazas por encima de los límites permisibles configurados.

El arreglo de dos válvulas piloto permite que la presión de gas sirva de control para la regulación y a su vez, sea la señal de consigna para controlar los brazos.

Las etapas de regulación y los pilotos se encuentran instrumentados y cuentan con válvulas de aislamiento para realizar mantenimientos periódicos.

1.1.4 Sistema de medición. Se compone por los medidores de flujo, computadores de flujo, instrumentación asociada y válvulas de bloqueo.

Figura 5. Sistema de medición



Fuente: Foto Sistema de medición *CITY GATE* Mariquita.

Por lo general se utilizan medidores de flujo como: desplazamiento positivo, turbina, coriolis, etc.

Cada sistema viene en una configuración tipo Z, la cual tiene como facilidad operar con un brazo en *stand by*, de igual manera, permite comparar la medición al poner los medidores en serie.

Cada sistema de medición tiene computador de flujo, el cual toma las señales eléctricas de los transmisores de presión y temperatura para realizar la corrección del flujo medido.

Figura 6. Válvula



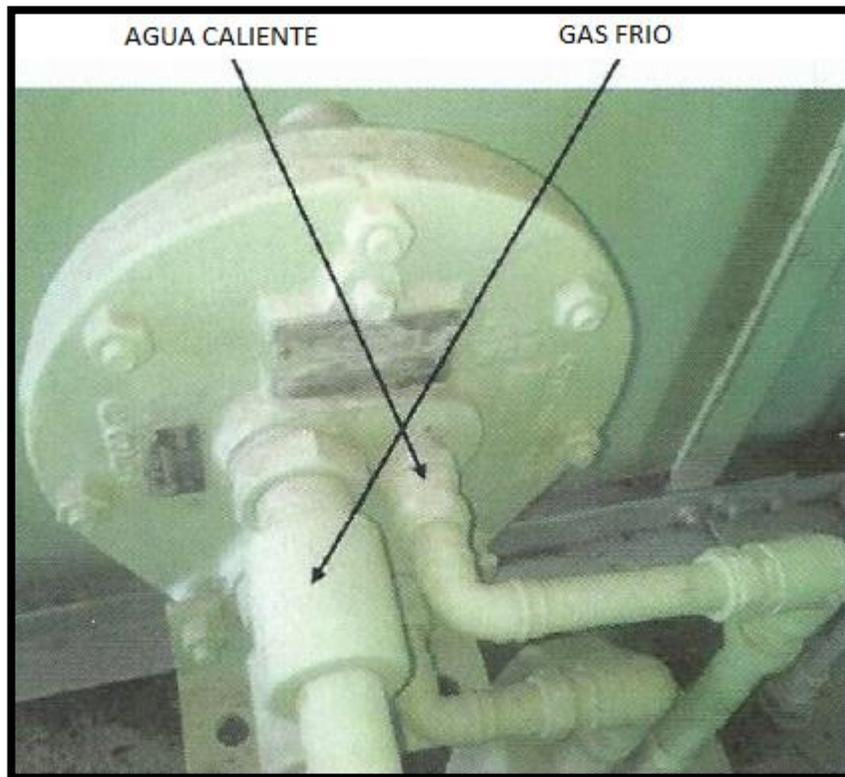
Fuente: Foto Válvula *Shut off* del sistema de medición del *CITY GATE* Puerto Salgar.

En la última etapa del sistema de medición, se encuentra una válvula *Shut off* por baja presión. Esta válvula se activa mecánicamente y se controla por un *switch* de presión pilotado en la mayoría de los casos.

1.1.5 Sistema de calentamiento. Está conformado por un calentador de agua con quemador de gas, sistema de bombeo para agua e intercambiador de calor en espiral.

El sistema de calentamiento adquiere parte del gas que entra al *CITY GATE* y lo regula para llevarlo a condiciones de quemado, y utiliza los gases de combustión para calentar agua que se bombea hacia el intercambiador de calor.

Figura 7. Sistema de calentamiento



Fuente: Foto del intercambiador de calor tipo espiral *CITY GATE* Puerto Salgar.

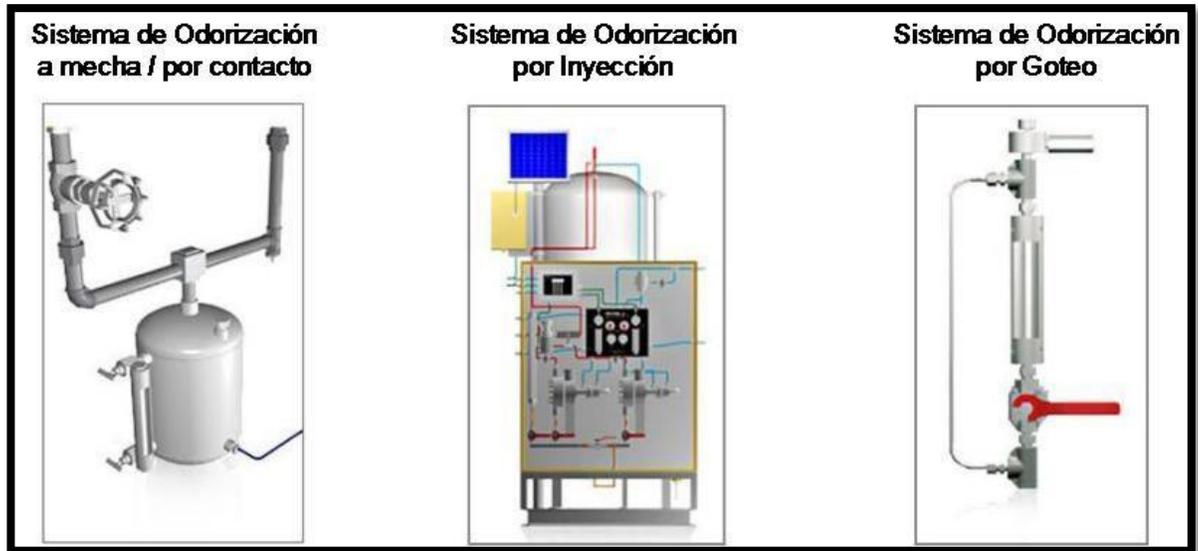
Con frecuencia el proceso de calentamiento se ubica antes de la etapa de regulación. Esta situación permite que al reducir la presión en los brazos de regulación, se impida el descenso de temperatura a valores muy bajos generando condensación del gas dentro de los tubos y en el exterior de estos, humedad y/o congelación.

1.1.6 Sistema de Odorización. El gas natural es incoloro, inodoro y carece de sabor en su estado natural, por estas razones no puede ser detectado, se le debe agregar un olor para alertar a las personas de su presencia en el eventual caso de una pérdida o fuga, los odorizantes más utilizados son: Metil-Etil-sulfuro, Terbutil-Mercaptanos y Tetrahydrothiophene.²

²NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Estaciones de carga y descarga de gas natural comprimido. NTC 5897. Bogotá, 2011. 16 p

Por razones de seguridad, el reconocimiento de olor es puesto a un 20% del límite explosivo inferior, esto da un factor cinco (5) de seguridad que evita la acumulación de gas en niveles peligrosos de tal modo que utilizando únicamente el sentido del olfato, las fugas de gas odorizado pueden detectarse antes que lleguen al límite explosivo inferior.

Figura 8. Sistemas de odorización



Fuente: Clases de equipos de odorización. Premac.blogspot.com

1.2 NORMATIVA DE APLICACIÓN

El diseño de ingeniería y construcción de estaciones de regulación de gas natural transportado por ducto deben contemplar la aplicación de códigos, normas y estándares a saber:³

1.2.1 Estaciones de regulación y medición. NTC 3949 Gasoductos. Estaciones de regulación de presión para redes de transporte y distribución de gas combustible.

- NTC 3728 Gasoductos. Redes de distribución urbana de gas.
- NTC 3838 Gasoductos. Presiones de operación permisible para el transporte, distribución y suministro de gases combustibles.

³ Nota del autor.

1.2.2 Tuberías, válvulas y accesorios. ANSI B 31.3 Tubería para la industria del petróleo.

- ANSI B 31.8 Transmisión y distribución de gas.
- ANSI B 16.5 Accesorios y tuberías bridas.
- ANSI B 16.9 Accesorios de acero para soldadura a tope.
- API 6D Válvulas, uniones y otros accesorios.
- NTC 4751 Válvulas industriales. Ensayos de presión de válvulas.
- NTC 4750 Válvulas metálicas para uso en sistemas de tuberías.
- Con bridas. Dimensiones de cara a cara y de centro a cara.

1.2.3 Reguladores de presión de gas. NTC 3293 Aparatos mecánicos. Reguladores de presión para aparatos domésticos que funcionan con gas.

- NTC 3727 Reguladores de presión para gas natural con dispositivo interno para alivio de sobrepresión.

1.2.4 Medidor volumétrico. NTC 4136 Medidores de gas tipo rotatorio. EN 12480 Medidores de desplazamiento rotatorio.

- AGA-ANSI B109.3 Medidores rotativos.

1.2.5 Corrector volumétrico. API 21.1 Estándar para medidores de gas electrónicos.

1.2.6 Manómetros. NTC 1420 Manómetros de tipo *Bourdon* para uso industrial.

1.2.7 Filtros. ASME Sección VIII división 1.

1.2.8 Espárragos y tuercas. ASTM A 193 Gr B7

- ASTM A 194 Gr 2H

1.2.9 Eléctricas. NTC 2050 Norma técnica colombiana.

1.2.10 Instrumentación. ANSI/ISA 5.1 Identificación y símbolos de instrumentación.

- ANSI/ISA 5.2 Diagramas lógicos binarios para operaciones de proceso.
- ANSI/ISA 5.3 Símbolos gráficos para control distribuido, sistemas lógicos y computarizados.
- ANSI/ISA 5.4 Diagramas de lazo de instrumentación.
- ANSI/ISA 5.5 Símbolos gráficos para visualización de procesos.
- API RP 550

1.2.11 Soldadura. NTC 2057 Código para soldar el procedimiento para soldar y la habilidad del soldador.

- ASME Sección IX *welding and brazing qualifications*.
- ASME Sección V *Nondestructive examination*.

1.3 SOFTWARE RAPTOR

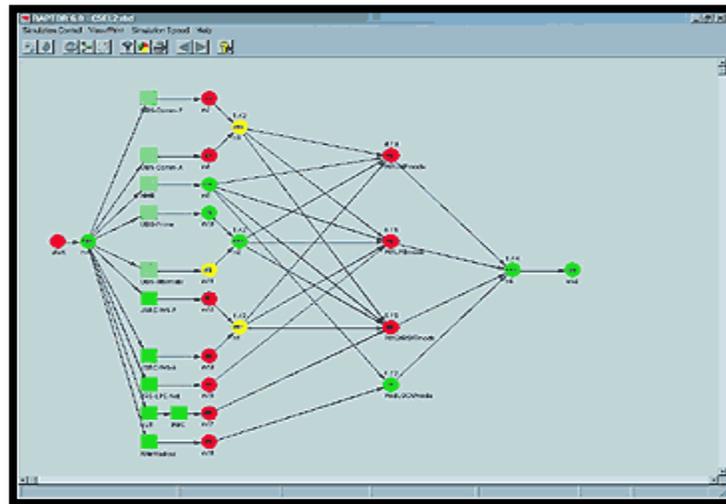
Raptor permite modelar rápidamente un sistema mediante la interface gráfica de usuario haciendo énfasis en las herramientas de análisis de confiabilidad.

Raptor, modela sistemas gráficamente, dibujando diagramas de bloques de confiabilidad (RBD) y describiendo la forma mediante la colocación de los componentes dentro del espacio de trabajo y la conexión de ellos con enlaces y nodos, las relaciones de serie-paralelo de los componentes que forman un sistema fácilmente pueden ser identificadas.

Describe cómo cada componente falla, utilizando una de las 16 distribuciones incorporadas, usted tiene una mayor flexibilidad que con simulaciones exponenciales tradicionales. Más opciones de logística de entrada, incluyen las necesidades de mano de obra, ahorradores de la información, y un tipo especial de redundancia llamada espera en frío.

Raptor, maneja sistemas complejos, es decir, sistemas que no pueden ser reducidos en serie o con construcciones paralelas. Un algoritmo genérico, desarrolla las ecuaciones específicas como funciones de caminos, y da ha Raptor el poder para analizar una variedad infinita de RBDs relativamente simples y extremadamente complejas.

Figura 9. Diagrama de bloques complejos

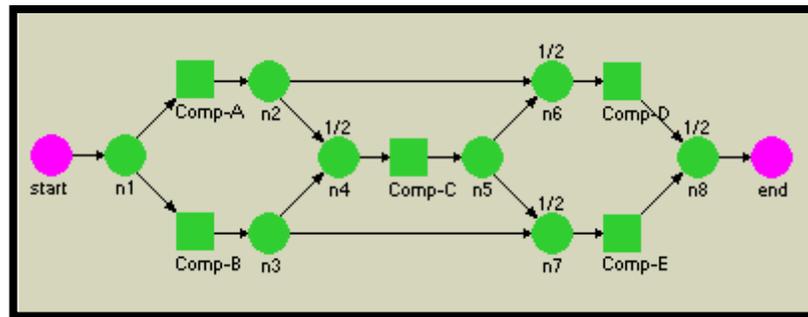


Fuente: reliability-safety-software.com/product/product-raptor.htm

Por ejemplo, el diagrama de bloques de confiabilidad que se muestra a continuación en la figura 10, está simulando el complejo topológico clásico de una red de tipo puente.

Los componentes (bloques) están enlazados con (flechas) y los nodos (círculos) están transmitiendo los efectos de fallo de un componente en el sistema; las estadísticas se recopilan para determinar los aspectos de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, capacidad y costo de este sistema.

Figura 10. Topología de una red tipo puente

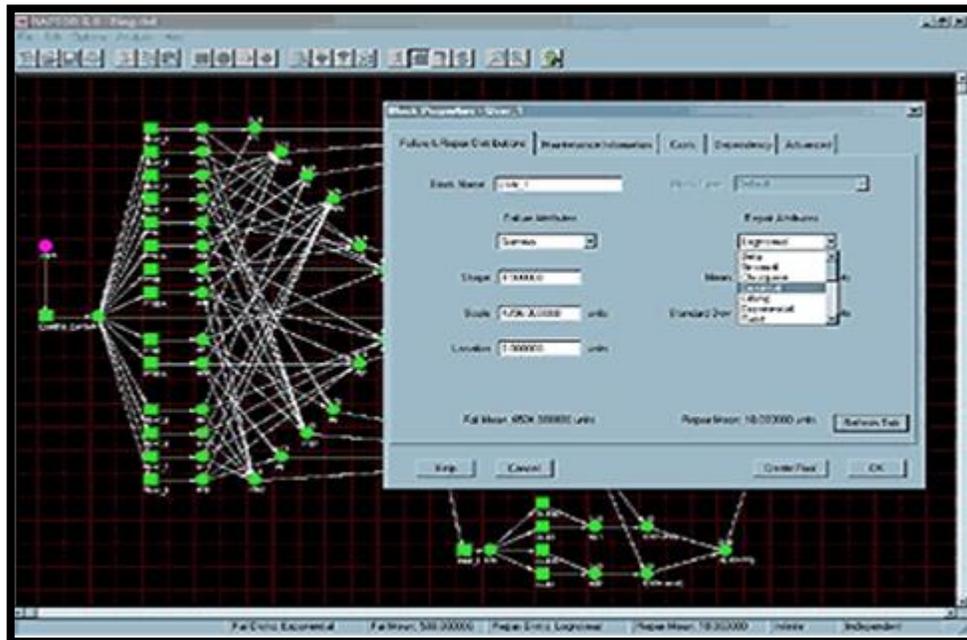


Fuente: reliability-safety-software.com/product/product-raptor.htm

1.3.1 Características de Raptor. Logística mejorada.

- El análisis de costo.
- Análisis de capacidad y de flujo.
- Análisis de eslabón débil (los componentes que causan el mayor número de fracasos).
- Simulaciones por fases en las que los componentes están en función del tiempo.
- Modelización de los componentes agotado.
- Interacción con archivos de biblioteca.
- Simulaciones paso a paso para facilitar la verificación de los esfuerzos de modelado.
- Estadísticas retrasadas y de recopilación (la gestión de los transitorios de modelado).

Figura 11. Red avanzada



Fuente: reliability-safety-software.com/product/product-raptor.htm

1.3.1.1 Aplicaciones del Raptor. Diseño de compensaciones.

- El análisis del costo ciclo de vida.
- Optimización de la logística.
- Capacidad vs RAM vs optimización de costos.
- Comercial *off – shelf* (COTS) compensaciones.
- La planificación de pruebas.
- Definición de requisitos.
- Predicción de confiabilidad.
- El análisis de sensibilidad.
- Proporciona la capacidad de tomar decisiones de diseño basado en el análisis racional.
- Permite la creación rápida de modelos de confiabilidad, disponibilidad y facilidad de mantenimiento para cualquier sistema
- Reduce el tiempo necesario para completar simulaciones de alta fidelidad de meses a minutos.
- Proporciona la capacidad de moldear cualquier configuración de confiabilidad.⁴

⁴ RAPTOR. [En línea]. Sitio Web: <http://www.reliability-safety-software.com/product/product-raptor.htm>

2. MARCO TEORICO

2.1 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR)

El ACR se fundamenta en la necesidad de resolver problemas, los cuales son generalmente entendidos como un suceso que se desea vencer.

En realidad, los problemas son enfrentados a través del control sobre las causas que los originan. En muchos casos no es extraño encontrar que las “mejores” soluciones son generalmente las que no han sido vistas y que después de una breve reflexión parecen obvias, lo que conduce a hacerse la siguiente pregunta: ¿por qué no se me ocurrió a mí? Es a partir de la pregunta anterior que se procede a explorar muchas de las soluciones efectivas que están en espera de ser “descubiertas” para un grupo particular de causas (a veces numerosos).

El proceso de descubrimiento requiere de un cambio de pensamiento donde se debe abandonar el anterior, a esto se la ha llamado “cambio de paradigma” el cual es el fundamento del ACR.

Existen diversas técnicas y autores que han abordado lo que hoy recibe el nombre de ACR, cuyo propósito ha sido el de buscar soluciones efectivas. Muchas personas intuitivamente ya atacan problemas con la filosofía de pensamiento que involucra ACR.

Las metodologías de ACR desarrolladas en la actualidad, ayudan a los analistas de problemas a orientarse, en los pasos a seguir y en las consideraciones que deben tomarse para la obtención de soluciones efectivas.

Es importante mencionar, que no existen dos problemas exactamente iguales, sin embargo, dentro de un marco de pasos generales que conservan cierta flexibilidad, se pueden establecer ciertas reglas comunes que permitan identificar las causas que los originan.

El éxito de la aplicación del ACR depende del esfuerzo de un equipo de trabajo y como tal requiere de cierta pericia para vencer los paradigmas que tradicionalmente se encuentran en los procesos de análisis de fallos.

Existen muchos tipos de problemas y muchas formas para resolverlos. En muchos casos los problemas han sido resueltos mediante la aplicación de reglas. Desafortunadamente, el mundo está basado en eventos y en muchos casos estos no siguen reglas.⁵

⁵ PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 80 p.

La imposición de reglas a problemas basados en eventos ha generado el espacio que hoy día ocupa la infame ley de Murphy. Sin embargo, la técnica de ACR ataca esa visión y reconoce que los problemas pueden agruparse en estas dos categorías:

2.1.1 Problemas basados en reglas. Como su nombre mismo lo indica, son aquellos basados en convenciones y reglas que dictan una respuesta correcta única, como por ejemplo: la suma de dos números ($2+2=4$), el “comerse” una luz roja (la regla establece que una persona que incurra en ello pudiera ser multada), tres “*strikes*” para hacer un “*out*” en “*baseball*”, procedimientos escritos que requieren de un cumplimiento, etc.

2.1.2 Problemas basados en eventos. Son aquellos que dependen de las leyes causa y efecto donde existe más de una solución, como por ejemplo: ¿cómo dirigirse a la casa de la abuela? (seguramente existe más de un camino, o vía (carro, autobús, avión, etc.)), ¿cuál es la solución a la desnutrición?, ¿cómo ganarse la vida?, ¿por qué fallo una bomba?, ¿cómo prevenir accidentes?, etc. ¿cómo ganarse la vida?, ¿por qué fallo una bomba?, ¿cómo prevenir accidentes?, etc.

Al ignorar las diferencias intrínsecas entre estas dos definiciones, se intenta resolver problemas basados en eventos con soluciones que únicamente aplican a los basados en reglas. Esta es una de las principales causas de la ineffectividad de soluciones implementadas. Ya tomado este punto, vale la pena mencionar algunas otras de las características comunes en la resolución de problemas de la actualidad que evitan que organizaciones e individuos busquen soluciones efectivas.

2.1.3 El ignorar la definición del problema. Como se verá más adelante, la definición del problema es un parámetro importante dentro del análisis y en general siempre que se presenta uno, se busca una solución inmediata sin detenerse en los eventos que los causaron con suficiente detalle.

2.1.4 El llenado de reportes y formatos. En el área técnica es de uso común la utilización de listas de chequeo, llenar espacios en blanco y categorizar causas. Esta actividad, no es en realidad particularmente mala, sino las características del formato, es decir, si éste no contempla todos los puntos que deben ser considerados en el análisis, la información requerida puede ser pasada por alto.

2.1.5 La utilización de narrativa y fábula. Esta es una práctica común que entorpece la búsqueda de información si se toman los relatos como hechos. Esto obedece a que la información en muchos casos no posee la calidad necesaria. En general y salvo específicas excepciones, los hechos son aquellos que pueden ser medidos y verificados. En el proceso de recolección las narrativas y fábulas son importantes como guías pero no como verdades hasta que puedan ser verificadas.

Si la información no puede ser verificada, entonces el análisis pudiera estar incompleto además de que pudiese ocasionar que la solución implementada no sea la correcta.

Para evitar lo anterior en acciones futuras se recomienda que se tomen las previsiones necesarias para generar el mecanismo que permita medir en caso de que ocurra nuevamente una eventualidad. En este caso vale la pena mencionar el paradigma de productividad:

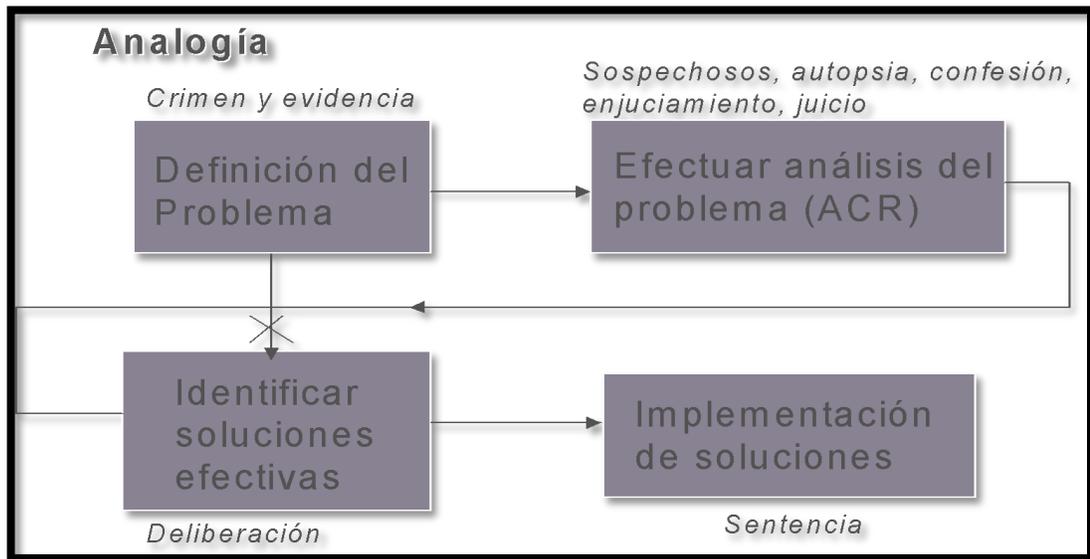
- Para mejorar productividad, se debe gerenciar,
- Para gerenciar efectivamente, se debe controlar,
- Para controlar consistentemente, se debe medir,
- Para medir con validez, se debe definir,
- Para definir precisamente, se debe cuantificar.

2.1.6 Procedimiento de la técnica RCA. Pasos básicos para el proceso de implantación de un análisis causa raíz:

- Definición del problema.
- Análisis del problema.
- Identificación de soluciones.
- Implementación de las soluciones.⁶

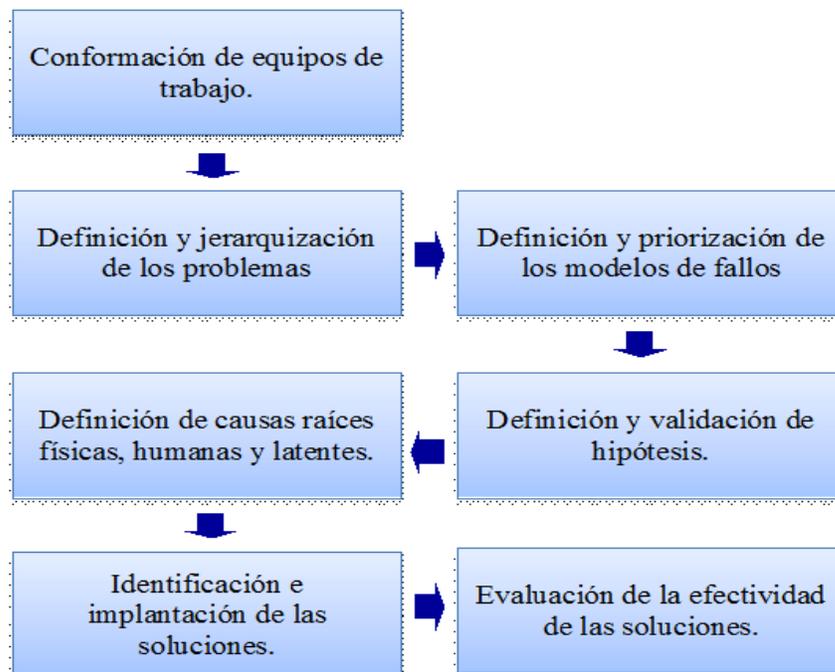
⁶ Ibid; 81 p.

Figura 12. Los cuatro pasos básicos en la solución de problemas



Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 82 p.

Figura 13. Pasos de la técnica ACR



Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 83 p.

En la figura 13 se muestra el paso generalmente seguido cuando se cree haber definido un problema (identificar soluciones sin un análisis detallado del evento).

Los cuatro pasos también pueden relacionarse con cuatro elementos presentes en un juicio los cuales guardan consecuencia y secuencia, es decir: un crimen y la evidencia, el proceso de análisis de la misma (juicio), la deliberación de jurado en función del análisis (soluciones) y la sentencia (implementación). En este caso es el equipo natural de trabajo (jurado) es quien delibera y argumenta en función de la información que tiene a la mano.

2.1.6.1 Conformación de los equipos de trabajo. Un Equipo Natural de Trabajo, se define dentro del contexto del ACR, como un conjunto de personas de diferentes funciones de la organización que trabajan juntas por un período de tiempo determinado en un clima de potenciación de energía, para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.

2.1.6.2 Características de los equipos de trabajo. *Alineación:* Cada miembro está comprometido con los acuerdos del equipo. Esto demanda que la misión y visión sean compartidas por todos. En este sentido la tendencia es sacarle provecho a los desacuerdos y conflictos para integrar los aportes de los miembros, a fin de lograr soluciones efectivas.

- *Coordinación:* Esta característica, implica que cada miembro del equipo teniendo roles y responsabilidades claras se apropia de los compromisos del equipo como si fueran las suyas individuales. De esta forma el trabajo individual se orienta al desempeño común del equipo. En este sentido, el liderazgo, la gerencia y el coaching, son habilidades de todos los miembros.

- *Comprensión:* La comprensión es un compromiso compartido. Esto requiere habilidad para distinguir entre “puntos de vista”, “interpretaciones” y “los hechos”, para así coordinar y divulgar el propio punto de vista y ayudar a los otros a considerarlo y considerar el punto de vista del otro. Cualquier miembro del equipo, conoce a los clientes, los suplidores, los procesos de trabajo y los resultados del equipo. Esto significa que los objetivos, metas e hitos son claros y compartidos.

- *Respeto:* Apreciar y sentir verdadero aprecio por el otro. Desarrollar y mejorar continuamente la habilidad de ver las cosas, como lo ve la otra persona “ponerse en los zapatos del otro”, pero sin perder la perspectiva de la objetividad de la realidad operacional. Preguntarse siempre: ¿Quién necesita participar en esta reunión y/o decisión? y luego preguntar ¿A quién es necesario informar respecto a los resultados?

- *Confianza*: Tener confianza en que los demás van a desempeñar sus responsabilidades de manera óptima. Confiar en que cada miembro del equipo buscará insumos requeridos para la toma de decisiones, consolidando la pro actividad individual para modelar este clima.⁷

2.1.6.3 Actividades que debe realizar el facilitador. Guiar al equipo de trabajo en la definición de los modos de fallos, las hipótesis, los niveles de causas y la definición de las soluciones:

- Ayudar a decidir a qué nivel debe ser realizado análisis de fallos.
- Ayudar a identificar los problemas que deben ser analizados bajo esta metodología (problemas críticos).
- Asegurar que las reuniones de trabajo sean conducidas de forma profesional y se lleven a cabo con fluidez y normalidad.
- Asegurar un verdadero consenso (entre operador y mantenimiento).
- Motivar al equipo de trabajo.
- Asegurar que toda la documentación a registrar durante el proceso de implantación sea llevada correctamente.

2.1.6.4 Perfil del facilitador y áreas de conocimiento. Amplia capacidad de análisis.

- Alto desarrollo de cualidades personales (liderazgo, credibilidad, seguridad y confianza).
- Habilidades para conducir reuniones de trabajo (facilidad para comunicarse).
- Teoría básica del ACR.
- Técnica para realizar un Análisis de Modos y Efectos de Fallos (AMEF).
- Técnica de evaluación y selección de actividades de mantenimiento (Árbol lógico de decisión).
- Técnicas de análisis estadístico (confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad).
- Técnicas de evaluación del riesgo / análisis coste riesgo beneficio.
- Herramientas computacionales.

⁷ Ibid; p. 83 -84

2.1.6.5 Definición y jerarquización de los problemas. La primera actividad a ser desarrollada por el equipo de trabajo, consiste en definir y jerarquizar los problemas existentes en el área a ser evaluada. Antes de abordar la definición del problema hay que reflexionar acerca de los siguientes puntos:

- ¿Qué es un problema?
- ¿Fallamos al definir los problemas?
- ¿Todos vemos el problema igual?
- ¿Hemos definido problemas en términos de *nuestra* realidad?
- ¿Tenemos experiencias y percepciones distintas?
- ¿Entendemos nuestra ignorancia y prejuicios?
- ¿Trabajamos en el problema equivocado?
- ¿Trabajamos en los síntomas o en las causas?

Para definir apropiadamente un problema el equipo de trabajo deberá responder de forma estructurada las siguientes preguntas:

- ¿Qué?: ¿Qué fue lo que ocurrió y sus síntomas?
- ¿Cuándo?: ¿Cuándo ocurrió?, aquí se incluyen las fechas y las frecuencias de recurrencia del evento.
- ¿Dónde?: ¿Dónde ocurrió el problema?, aquí se agrupan las instalaciones y permite visualizar si hay diversos problemas en una misma área.

- ¿Importancia?: Se describe el impacto y las consecuencias sobre el ambiente, las personas, pérdidas económicas, etc., del evento de fallo. Se recomienda cuantificar el Riesgo económico (Re), indicador que representa el impacto del problema en unidades monetarias por unidad de tiempo (por ejemplo \$/mes). El riesgo económico se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Re = FF \times C = \$/mes$$

Dónde;

FF = frecuencia de fallas, es el número de fallas ocurridas mensualmente (fallas/mes)

C = consecuencia económica de las fallas = ((LC (\$/Hora)*MTTR (Horas/falla)) + CD = (\$/falla) [Mano de Obra + Materiales] + SHA (\$/falla) [Impacto en seguridad salud y ambiente]

LC = lucro cesante (\$/hora)

MTTR = *mean time to repair* (horas/falla)

CD = costos directos (\$/falla)

SHA = seguridad, higiene y ambiente (\$/falla)

2.1.6.6 Ejemplo de definición de problemas. Qué: fallos de la Bomba P101 (vibraciones y alta temperatura)

- Cuándo: 28/07/1998 @ 4:32 pm (último fallo). Frecuencia de fallas (FF): 12 fallas en 1998, 1 falla/mes

- Dónde: Texas > Utilidades > Edificio 43 > Unidad de generación de electricidad > Sistema de bombas de enfriamiento área 44 > P101-44-235

- Impacto:

- Seguridad: Sin accidentes, potencialmente peligroso
- Ambiental: no viola reglamentos del Min. Ambiente, SHA = 0
- Producción: MTTR = 10 horas/falla, LC = 30000 \$/hr
- Mantenimiento: CD = 4000 \$/falla⁸

$$\text{Re} = 1 \text{ falla/mes} * [(10 \text{ horas/falla} * 30000 \text{ \$/hora}) + (4000 \text{ \$/falla})]$$
$$\text{Re} = 304000 \text{ \$/mes}$$

Las siguientes preguntas no deben efectuarse durante la definición del problema:

- ¿Cómo?: No aplica en la definición del problema sino en la definición de los modos de fallos.
- ¿Por qué?: No aplica en la definición sino en la definición de las hipótesis.
- ¿Quién?: El objetivo del análisis es la prevención y no la búsqueda de un culpable.

2.1.7 Definición y priorización de los modos de fallos. La sección anterior se ha referido a la definición de los problemas y el impacto de los mismos en su actual contexto operacional. Cada problema puede ser provocado por diferentes modos de fallos.⁹

Los modos de fallos se definen como los eventos físicos que generan el paro imprevisto. Para definir los modos de fallos, se debe responder la siguiente pregunta:

¿Cómo pueden ocurrir los paros imprevistos?

2.1.7.1 Ejemplo de modos de fallos. Definición del problema: fallos en Bomba centrífuga P101.

Modos de Fallo, ¿Cómo pueden ocurrir los paros en la Bomba P101?

- Daños en rodamientos (nivel de detalle: parte). (1)
- Daños en sellos (nivel de detalle: parte). (2)
- Impulsor trabado (nivel de detalle: parte). (3)
- Motor eléctrico quemado (nivel de detalle: equipo). (4)
- Fuga en Línea de succión (nivel de detalle: parte).

⁸ Ibid; p 85 – 86

⁹ Ibid; p. 86 - 87

Una vez identificados los modos de fallos, se procede a definir el nivel de criticidad de los mismos, utilizando la técnica de cuantificación del Riesgo (expresado en dinero/tiempo, \$/año):

RTA = riesgo total anualizado (M\$/año)

$$RTA = CAR + PAF \quad (1)$$

$$CAR = FF \times (CMO + CM) \quad (2)$$

$$PAF = FF \times PE \quad (3)$$

$$PE = TR \times IP \quad (4)$$

CAR: costes anuales de reparación (M\$/año)

PAF: penalización anual por evento de fallos (M\$/año)

FF: frecuencia de fallos (fallos/año)

CMO: costes mano obra (M\$)

CM: costes materiales (M\$)

TR: tiempo de reparación (horas,

IP: impacto producción (M\$/hora)

PE: penalización x evento fallo (M\$/fallo),

A continuación se presenta un ejemplo de priorización de modos de fallos:

Tabla 1. Priorización de modos de fallos

Modos de fallos	FF fallos/ año	CMO M\$	CM M\$	CAR M\$/ año	TR horas	IP M\$/ hora	PE M\$	PAF M\$/ año	RTA M\$/ año
1. Daños en rodamientos	13	2	15	221	16	1,5	24	312	533
2. Daños en sellos	10	1	10	110	10	2	20	200	310
3. Impulsor trabado	10	1	5	60	10	2	20	100	160
4. Motor eléctrico dañado	5	5	5	125	10	1	10	50	175
5. Fuga en línea de succión	8	4	5	72	8	1	8	64	136

Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 87p.

2.1.8 Definición y validación de las hipótesis. Una vez definidos los modos de fallos, el equipo de trabajo selecciona los de mayor impacto (priorizados en función del Riesgo, se recomienda utilizar el criterio Pareto, analizar los modos de fallas que cubran el 80% del riesgo total)) y se procede a identificar las diferentes hipótesis para cada modo de fallo a ser evaluado.¹⁰

Las hipótesis se definen como los posibles mecanismos que provocan los modos de fallo. Al ser verificada una Hipótesis, ésta se convierte normalmente en una causa raíz física (CRF). Para definir las hipótesis, se debe responder la siguiente pregunta:

¿Por qué ocurren los modos de fallos?

El resultado final de la etapa de definición de hipótesis, consiste en validar con hechos las hipótesis más probables y en descartar aquellas hipótesis inconsistentes. Durante el proceso de validación de las hipótesis se deben evaluar los siguientes aspectos (lista de verificación de hipótesis):

- Variables de operación (información del sistema automatizado de control, temperatura, presión, flujo, etc.)
- Historiales de mantenimiento
- Libros diarios de los eventos en cada turno
- Resultados de inspecciones (visuales, ensayos no destructivos, etc.)
- Resultados del laboratorio (químico y metalúrgico)
- Datos de vibraciones Especificaciones

¹⁰Ibíd.; 88 p.

- Información de Compras
- Procedimientos de Mantenimiento
- Procedimientos Operacionales
- Datos y Modificaciones sobre los Diseños
- Registros de Entrenamiento del personal

2.1.8.1 Ejemplo de definición de las hipótesis. Definición del problema: Fallos en Bomba centrífuga P101.

Modos de Fallo, ¿Cómo ocurrieron los paros en la Bomba P101?

- Daños en rodamientos (nivel de detalle: parte).

Hipótesis, ¿Por qué ocurrieron los fallos en los rodamientos?

- Desgaste acelerado
- Montaje y alineación defectuosa
- Mala selección del rodamiento
- Operación incorrecta

2.1.8.2 Definición de las Causas Raíces. Físicas, Humanas y Latentes.

Una vez identificadas las hipótesis, se definen las posibles causas raíces para cada una de las hipótesis validadas. Las causas raíces se pueden definir a tres niveles:

- Causa Raíz Física (CRF):

Aquellas que envuelven materiales o cosas tangibles.

- Causa Raíz Humana (CRH):

Aquellas que generan fallos debido a una intervención inapropiada de un ser humano.

- Causa Raíz Latente (CRL):

La falta o deficiencia en los sistemas gerenciales y administrativos (reglas, procedimientos, guías, etc.) o “normas culturales” que permiten que una fallo ocurra

Para definir los diferentes tipos de causas raíces, se debe responder la siguiente pregunta:

¿Por qué ocurrió la hipótesis planteada? Esta pregunta se debe orientar hacia los tres posibles niveles de causas citados anteriormente (CRF, CRH y CRL).

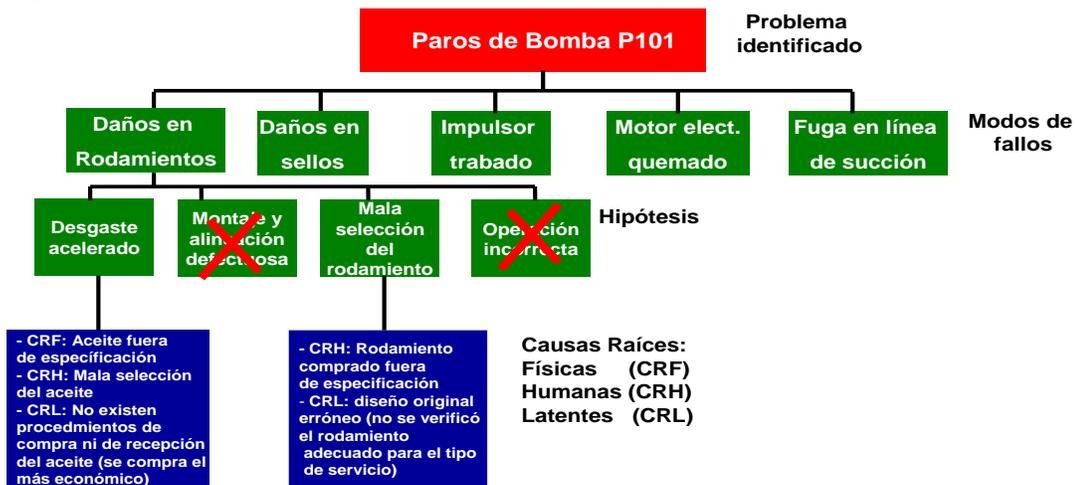
2.1.8.3 Ejemplo de definición de Causas Raíces. *Definición del problema:* Fallos en Bomba centrífuga P101.

Modos de Fallo: ¿Cómo ocurrieron los paros en la Bomba P101?

- Daños en rodamientos (nivel de detalle: parte).
- Hipótesis: ¿Por qué ocurrieron los fallos en los rodamientos?
 - Rodamiento presenta desgaste acelerado (hipótesis validada)
 - Montaje y alineación defectuosa (hipótesis descartada)
 - Mala selección del rodamiento (hipótesis validada)
 - Operación incorrecta (hipótesis descartada)
- *Causas Raíces:* ¿Por qué el rodamiento presento desgaste acelerado?
 - Aceite fuera de especificación (CRF)
 - Mala selección del aceite en el proceso de compra (CRH)
 - Ausencia de un procedimiento adecuado de compra y de recepción de aceite (no se verifica la procedencia del aceite, criterio utilizado, comprar el más económico)
- ¿Por qué el rodamiento se seleccionó de forma incorrecta?
 - Rodamiento comprado fuera de especificación (CRH)
 - Diseño original erróneo, no se verificó el rodamiento adecuado para el tipo de servicio (CRL)

A continuación se presenta de forma gráfica el árbol de fallos del ejemplo citado:

Figura14. Ejemplo de árbol de fallos estándar propuesto por la técnica



Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 90p

2.1.9 Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas. Las soluciones a un problema deben diseñarse para evitar o al menos reducir la recurrencia del problema analizado.

Por otro lado, la solución no sólo debe ayudar a mejorar la Confiabilidad del proceso, sino que a su vez debe justificarse en función de un Análisis Costo Riesgo Beneficio Riesgo. Las soluciones a proponer deben satisfacer los siguientes criterios:

2.1.9.1 Prevenir la recurrencia. Prevenir o mitigar el problema original

- Prevenir problemas similares
- No crear problemas adicionales o situaciones inaceptables (nuevos modos de fallos)

2.1.9.2 Controlar. El control puede ser la compañía, proveedor o cliente

2.1.9.3 Satisfacer las metas y objetivos. Los objetivos de la organización

- Los objetivos del grupo
- Sustentada en un análisis técnico económico

2.1.9.4 Soluciones básicas. En algunos análisis las recomendaciones para eliminar las causas raíces son muy sencillas y fáciles de implementar.

A continuación se cita un ejemplo de este tipo de soluciones:

- CRF: Torque de Apriete Inadecuado
- CRH: Inexistencia de un procedimiento adecuado
- CHL: Falta de adiestramiento y falta de promoción por parte de la organización para diseñar un procedimiento adecuado de apriete.

Solución: Adiestrar personal, diseñar y difundir un procedimiento adecuado de apriete.

2.1.9.5 Soluciones complejas. En algunos análisis, se identifican varias alternativas técnicas de soluciones, por lo cual es necesario determinar cuál de las posibles soluciones es la más rentable para la organización - Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB).

En este tipo de análisis, se recomienda cuantificar la situación actual y compararla con la situación futura - después del cambio propuesto. Se propone utilizar la metodología de Evaluación de Riesgo expresado en Costes Anuales Equivalentes.¹¹

A continuación se presenta un ejemplo de dicha metodología:

- Definición del problema: Fallos en Bomba centrífuga P101.
- Modos de Fallo: ¿Cómo ocurrieron los paros en la Bomba P101?
- Daños en rodamientos (nivel de detalle: parte).

- Hipótesis: ¿Por qué ocurrieron los fallos en los rodamientos?
- Mala selección del rodamiento (hipótesis validada)

- Causas raíces: ¿Por qué el rodamiento se seleccionó de forma incorrecta?
- Rodamiento comprado fuera de especificación (CRH)
- Diseño original erróneo, no se verificó el rodamiento adecuado para el tipo de servicio (CRL)

- Solución: se identificaron dos posibles opciones de reemplazo del rodamiento actual.

¹¹ Ibid; 91p.

Se presentan los resultados del Análisis Costo Riesgo Beneficio y la opción de mejora seleccionada:

Tabla 2. Situación Actual (Eventos repetitivos en bomba P101)

1.Frecuencia fallos	13	fallos / año
2.Costes Mano obra	2	M\$
3.Costes Materiales	15	M\$
4.Costes anuales reparar (2+3) x (1)	221	M\$/año
5.Tiempo de reparación	16	horas
6.Impacto producción	1,5	M\$/hora
7.Penalización evento(5x6)	24	M\$
8.Penalización anual x fallos (7x1)	312	M\$/año
Riesgo total anualizado: (4) + (8)	533	M\$/año

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos C. Parra, A. Crespo. 92 p.

Situación futura:

Paros bomba P101

Solución propuesta: Reemplazar sello actual.

Tabla 3. Opción 1: Rodamiento A.

1.Frecuencia fallos	2	fallos / año
2.Costes Mano obra	2	M\$
3.Costes Materiales	22	M\$
4.Costes anuales reparar (2+3) x (1)	44	M\$/año
5.Tiempo de reparación	16	horas
6.Impacto producción	1,5	M\$/hora
7.Penalización evento(5x6)	24	M\$
8.Penalización anual x fallos (7x1)	48	M\$/año
Riesgo total anualizado: (4) + (8)	92	M\$/año

Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 92 p.

Resumen de resultados (opción ganadora – Rodamiento Tipo B):
Paros bomba P101

Solución propuesta: Reemplazar rodamiento actual.

Tabla 4. Opción 2: Rodamiento B.

1.Frecuencia fallos	1	fallos / año
2.Costes Mano obra	2	M\$
3.Costes Materiales	30	M\$
4.Costes anuales reparar (2+3) x (1)	32	M\$/año
5.Tiempo de reparación	16	horas
6.Impacto producción	1,5	M\$/hora
7.Penalización evento(5x6)	24	M\$
8.Penalización anual x fallos (7x1)	24	M\$/año
Riesgo total anualizado: (4) + (8)	56	M\$/año

Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 93 p.

Resumen de resultados (opción ganadora – Rodamiento Tipo B):
Paros bomba P101

Solución propuesta: Reemplazar rodamiento actual.

Tabla 5. Opción Evaluada

Escenarios después del cambio:		
Rodamiento A:		
Costes anuales reparar	44	M\$/año
Penalización anual x fallos	48	M\$/año
Riesgo total esperado	92	M\$/año
Rodamiento B:		
Costes anuales reparar	32	M\$/año
Penalización anual x fallos	24	M\$/año
Riesgo total esperado:	56	M\$/año

Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 93 p.

Beneficios esperados después del cambio:

Bomba P101

Solución propuesta: Reemplazar rodamiento actual por el tipo B.

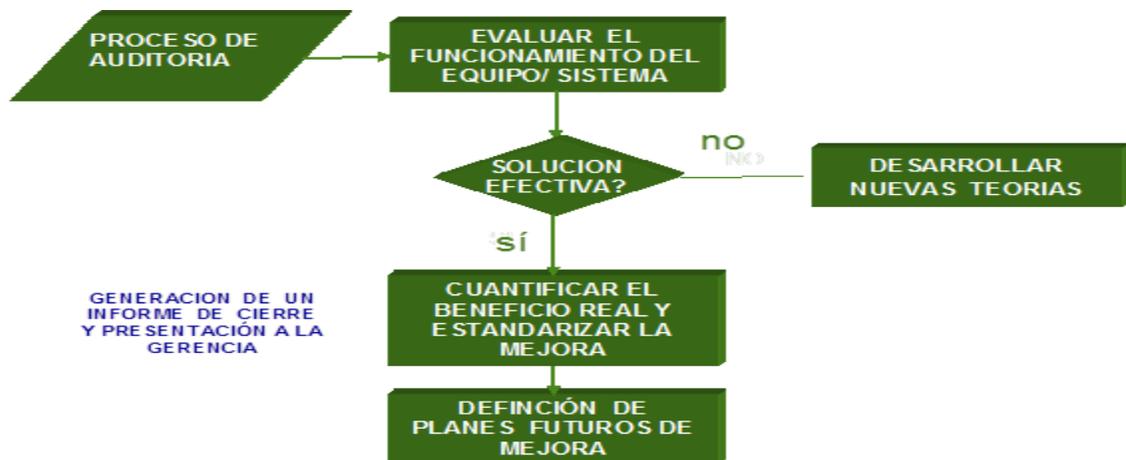
Tabla 6. Opción Evaluada: rodamiento tipo B

Situación actual:		
Costes anuales reparar	221	M\$/año
Penalización anual x fallos	312	M\$/año
Riesgo total :	533	M\$/año
Situación futura rodamiento tipo B:		
Costes anuales reparar	32	M\$/año
Penalización anual x fallos	24	M\$/año
Riesgo total esperado:	56	M\$/año
Beneficios del cambio:		
Costes de reparación	189	M\$/año
Penalización por fallos	288	M\$/año
Beneficios totales:	477	M\$/año

Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 93 p.

Finalmente, una vez que se haya implantado la solución, se propone medir el desempeño de la solución con el fin de estimar los valores exactos obtenidos y poder cuantificar el beneficio real del cambio. En esta parte se propone seguir como modelo el siguiente flujograma:

Figura 15. Proceso de validación y auditoría de las soluciones propuestas



Fuente: PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. 91 p.

2.1.10 Recomendaciones especiales. Asignar responsables para la ejecución de las recomendaciones propuestas (definir fechas de ejecución para cada una de las recomendaciones desarrolladas y establecer un plan de trabajo para implantar las recomendaciones en un período inferior a 6 meses).¹²

2.1.10.1 Cargar los datos de modos de fallos obtenidos a partir del análisis ACR en el sistema de gestión del Mantenimiento (codificar los modos de fallos e insertarlos dentro del software de gestión del mantenimiento).

2.1.10.2 Cuantificar de forma detallada, las mejoras obtenidas a partir de la ejecución de las recomendaciones generadas por el proceso de ACR. Se propone auditar los índices citados anteriormente: tiempo promedios operativos, tiempos promedio fuera de servicio, frecuencia de fallos y costos de indisponibilidad por fallos (calcular estos indicadores antes de la aplicación del ACR y compararlos con los valores a obtener después de implantadas las recomendaciones).

¹² PARRA MARQUEZ, Carlos Alberto. Asesoría Integral en Ingeniería de Confiabilidad. Bucaramanga, 2011. P. 35.

2.1.10.3 Propiciar y consolidar la formación de grupos de trabajo para la ejecución de ACR. Es importante recalcar, que el éxito de la implantación del ACR, depende fundamentalmente del recurso humano involucrado en los análisis de fallos, motivos por los cuales, hay que tener una especial atención en la formación de los grupos de trabajo y sobre todo en la participación del personal tanto de las áreas de mantenimiento, como de operaciones y de producción.

2.1.10.4 Un grupo de especialistas con identidad propia. En el área de Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad, este grupo, servirá de asesor y auditor interno de las actividades de optimización en el área de Confiabilidad.

Este personal revisaría el desempeño y la efectividad de los programas de mantenimiento; y adicionalmente podrían actuar de facilitadores en procesos de adiestramiento y aplicaciones pilotos de técnicas de Confiabilidad (al menos se debería dedicar una persona de forma exclusiva en el área de Ing. de Confiabilidad).

2.1.10.5 Diseñar formatos estándares dentro del *software* de mantenimiento. De tal forma que permitan registrar la siguiente información: modos de fallos y sus causas raíces (más importantes), tiempos promedios operativos, tiempos promedios fuera de servicio, impacto económico (costos directos de los fallos más el costo de penalización), utilizar como base del diseño de los formatos, el esquema de propuesto en la aplicaciones de ACR ejecutadas.

2.1.10.6 Desarrollar dentro del sistema de gestión del mantenimiento. Un modelo estándar de evaluación de criticidad de equipos junto con sus modos de fallos, basado en el indicador de "Riesgo" (frecuencia de fallos (fallos/año) x consecuencias (\$/fallos) = \$/año).

Este modelo debe ser aceptado por toda la organización y además debe ser el criterio que permita priorizar los procesos de: planificación, ejecución de las actividades de mantenimiento y definición de los repuestos críticos (herramientas comerciales tales como *ITEM Software*, *RELEX Software*, *Meridium*; o desarrollos propios, podrían ayudar a mejorar esta parte del proceso de gestión del mantenimiento).

2.1.10.7 Aprovechar las experiencias y los resultados obtenidos de los ACR, con el fin de crear una base de conocimientos compartida (propiciar el intercambio y la sinergia entre el personal de las distintas áreas de mantenimiento y operaciones

(reuniones técnicas de análisis de fallos), “no es necesario cometer los errores dos veces”.

2.1.10.8 Difundir la información generada por los resultados de los ACR. No limitarla sólo al personal de mantenimiento (aprovechar la información recopilada para la creación de la base de datos de los modos de fallos).

Adicionalmente, es recomendable, involucrar al personal de planificación y programación en las aplicaciones de ACR (con el fin de que adquieran conocimiento práctico de los diferentes modos de fallos).

2.1.10.9 Desarrollar un programa de adiestramiento básico. En el área de confiabilidad, en el cual se involucre al personal de campo tanto a operadores como mantenedores, no limitar el conocimiento de las técnicas de confiabilidad sólo al grupo de mantenimiento, es necesario involucrar al personal de operaciones, producción, proyectos y logística (compras).

2.1.10.10 Afianzar. El uso de las técnicas de Ingeniería de Confiabilidad y Mantenimiento, con el objeto de desarrollar un programa formal de optimización en esta área (en el corto plazo, es necesario consolidar el uso de las técnicas de RCA y para el mediano y largo plazo, auditar y revisar los programas de mantenimiento de los equipos críticos con metodologías como el RCM y las Técnicas de Análisis Costo Riesgo Beneficio.¹³

2.2 ANÁLISIS COSTO RIESGO

En años recientes, grandes corporaciones especialmente del sector de hidrocarburos y de la industria de procesos, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “Costo Riesgo”, debido a que el mismo, permite comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño. Es decir, el modelo permite saber: “cuanto obtengo por lo que gasto”.

El análisis “Costo-Riesgo” resulta particularmente útil para decidir en escenarios con intereses en conflicto, como el escenario “Operación – Mantenimiento”, en el cual, el operador requiere que el equipo o proceso opere en forma continua para garantizar máxima producción, y simultáneamente, el mantenedor requiere que el

¹³ Ibid; p. 36.

proceso se detenga con cierta frecuencia para poder mantener y ganar confiabilidad en el mismo.

El modelo Costo-Riesgo es el indicado para resolver el conflicto previamente mencionado, dado que permite determinar el nivel óptimo de riesgo y la cantidad adecuada de mantenimiento, para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.

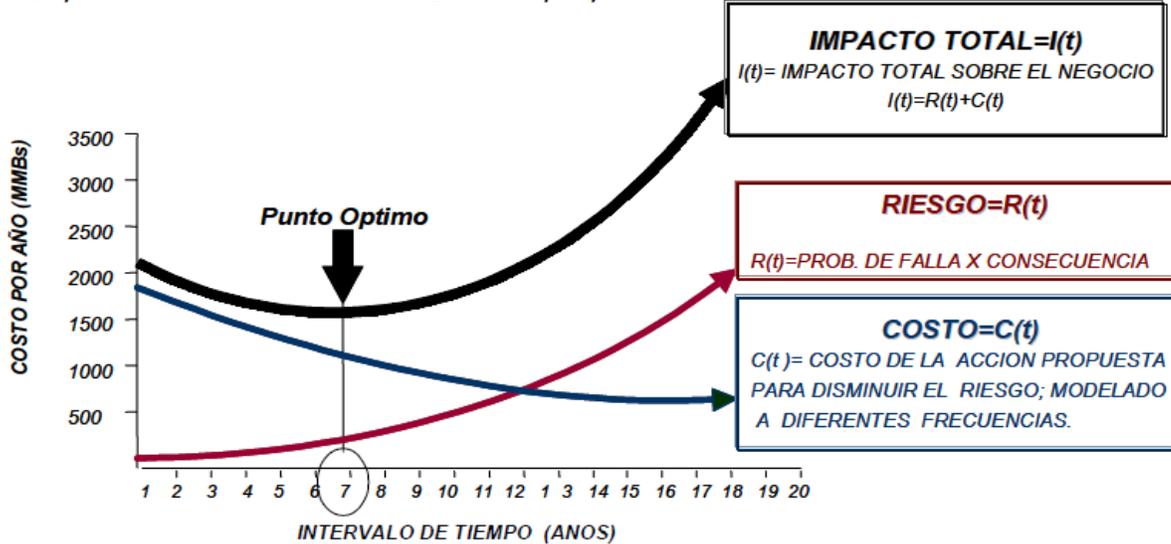
La figura 16 muestra gráficamente el modelo mencionado, y en el mismo pueden destacarse tres curvas que varían en el tiempo:

La curva del nivel de riesgo (riesgo = probabilidad de falla x consecuencia), asociado a diferentes periodos de tiempo o frecuencias de mantenimiento.

La curva de los costos de mantenimiento, en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de mantenimiento propuesta.¹⁴

¹⁴ MEDARDO Yáñez, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. "Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento". p 1-15. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

Figura 16. Modelo Costo-Riesgo



Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 3 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

La curva de impacto total, que resulta de la suma punto a punto de la curva de riesgos y la curva de los costos de mantenimiento.

El “mínimo” de esta curva, representa la frecuencia para la cual la suma de los costos de la política de mantenimiento con el nivel de riesgo asociado a esta política son mínimos; es decir, hay el “mínimo impacto posible en el negocio” Este mínimo está ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia óptima para la realización de la actividad de mantenimiento.

Un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar demasiado dinero”.

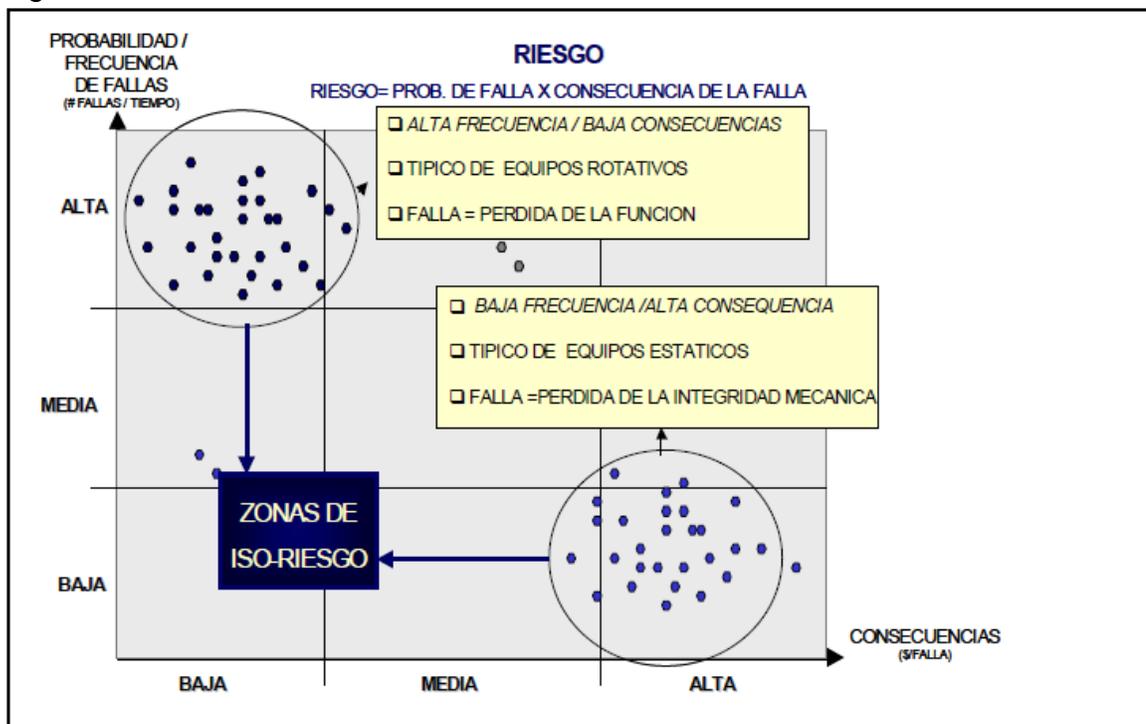
La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o modelaje de la curva del riesgo, ya que la misma requiere la estimación de la probabilidad de falla (y su variación con el tiempo), y las consecuencias. En la próxima sección, se detallan las herramientas para lograr el correcto modelaje y estimación del riesgo.

2.2.1 Riesgo. Un indicador para el Diagnóstico Integrado. El riesgo $R(t)$, base fundamental del modelo de decisión descrito en la sección anterior, es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables consecuencia de la probable ocurrencia de un evento no deseado o falla”, y comúnmente se expresa en unidades monetarias. Matemáticamente, el riesgo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo}(t) = \text{Probabilidad de Falla}(t) \times \text{Consecuencias}$$

El análisis de la ecuación del riesgo, permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos rotativos, que normalmente presentan alta frecuencia de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia.

Figura 17. Probabilidad de falla vs consecuencias



Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 3 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

El riesgo, se comporta como una balanza, que permite pesar la influencia de ambas magnitudes (Probabilidad de Falla y Consecuencia de la Falla) en una decisión particular.

El mantenimiento moderno, sustentado en la Ingeniería de Confiabilidad, requiere de un cuidadoso proceso de diagnóstico de equipos y sistemas. El diagnóstico, basado en el “riesgo”, puede entenderse entonces como un proceso que busca caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de equipos y sistemas.

Para el logro de un diagnóstico integrado, el riesgo debe calcularse usando toda la información disponible; es decir, debe incluir el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos. De esta forma, se podrán identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio medular.

Figura 18. Proceso de diagnóstico integrado

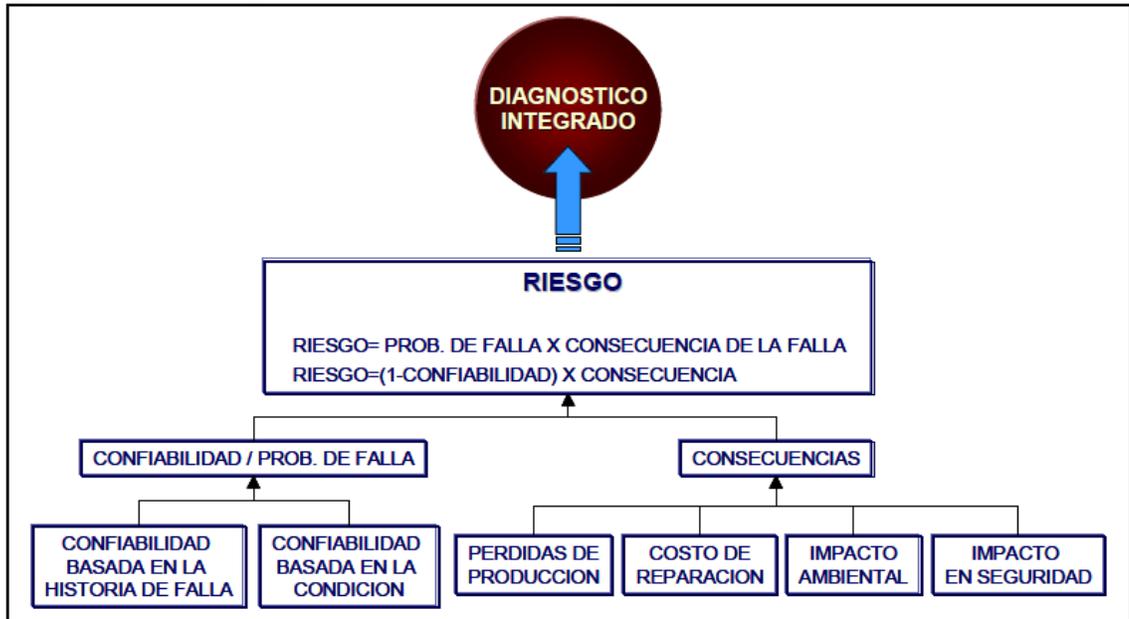


Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 4 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

2.2.2 Estimación de Riesgo. El cálculo del riesgo, involucra la estimación de la Probabilidad de Fallas y/o la Confiabilidad, (Confiabilidad = 1 – Probabilidad de Fallas), y de las Consecuencias. La figura 19 muestra la descomposición del indicador “riesgo” en sus componentes fundamentales.

En ella se muestra claramente que para calcular riesgo, deben establecerse dos (2) vías, una para el cálculo de la confiabilidad y/o la probabilidad de fallas, en base a la historia de fallas o en base a la condición; y otra para el cálculo de las consecuencias.

Figura 19. Descomposición del indicador riesgo



Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 5 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

2.2.2.1 Estimación de la Probabilidad de Fallas y/o la Confiabilidad. Para la estimación de la confiabilidad o la probabilidad de fallas, existen dos métodos que dependen del tipo de data disponible; estos son:

- *Estimación Basada en Datos de Condición:* altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico."
- *Estimación Basada en el Historial de Fallas:* recomendable para equipos dinámicos, los cuales por su alta frecuencia de fallas, normalmente permiten el almacenamiento de un historial de fallas que hace posible el análisis estadístico.

– *Estimación de Confiabilidad Basada en Condición*: el análisis tradicional de confiabilidad, basado en el análisis estadístico del tiempo para la falla, ha sido exitosamente utilizado para mejorar el mantenimiento preventivo y traer los equipos y sistemas hasta los actuales niveles de desempeño.

Sin embargo, buscando la mejora continua de sus procesos, en las tres últimas décadas, algunas industrias han hecho grandes esfuerzos en la recolección de data diferente a la data de falla, a través de programas de monitoreo de la condición (mantenimiento predictivo) con la finalidad de optimizar las frecuencias de mantenimiento de sus equipos y tomar acciones proactivas para evitar la ocurrencia de la falla.

La mencionada data de condición, ha sido usada principalmente en forma determinística, es decir, para hacer diagnósticos puntuales, debido a la falta de una adecuada metodología de análisis probabilística. En esta sección se establecen las bases conceptuales para el cálculo de confiabilidad y probabilidad de falla de equipos basados en el dato de condición. La columna vertebral de este método es el análisis Carga-Resistencia.

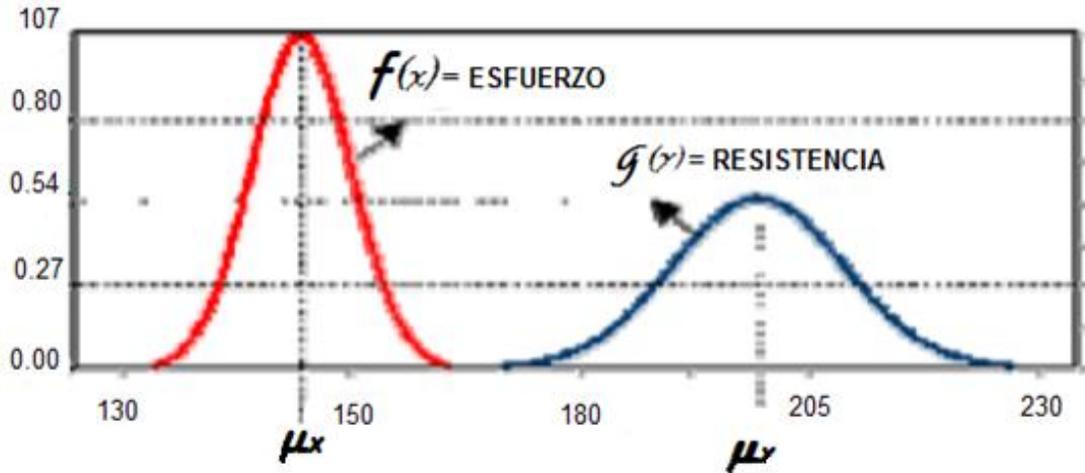
– *Análisis Carga-Resistencia*: El análisis Carga-Resistencia tiene como premisa el hecho de que las fallas son el resultado de una situación donde la carga aplicada excede la resistencia. Carga y Resistencia son usados en el sentido más amplio de la palabra; es decir, la carga pudiera ser la presión de operación, mientras la máxima presión de operación permisible sería la resistencia. Similar análisis se hace para cualquier otro parámetro relevante de la condición como vibración para equipos dinámicos, o reducción de espesor para el caso de equipos estáticos.

En todos los casos existirá un valor actual de la condición que se monitorea, el cual representará la carga, y un valor límite de la condición que representara la resistencia. Esta última normalmente está regulada por normas y estándares de la ingeniería.

Contrario a la creencia general, en la mayoría de los casos ni la carga ni la resistencia son valores fijos, por el contrario, sus valores son estadísticamente distribuidos. Cada distribución tiene su valor medio, denotado por μY para la carga y μX para la resistencia y sus desviaciones estándar σY y σX respectivamente. Esto es ilustrado en la figura 20.¹⁵

¹⁵ Ibid; 6 p.

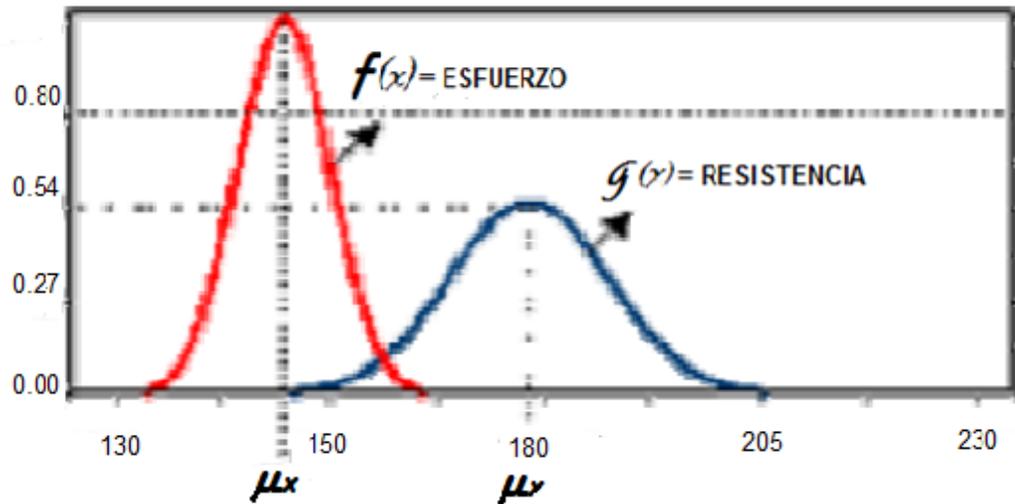
Figura 20. Distribución sin solapamiento



Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 6 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

Cuando la distribución de la condición medida o monitoreada en el equipo tiene algún solape con la distribución de la condición límite o criterio de rechazo, en ese momento existe probabilidad de falla. Esta situación es mostrada en la figura 21.

Figura 21. Distribución solapada



Fuente: MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 6 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

La confiabilidad de un elemento bajo la aplicación de una carga es la probabilidad de que su resistencia exceda la carga. Dicha confiabilidad puede calcularse con la siguiente expresión: Confiabilidad = Probabilidad (Resistencia > Carga).

$$\text{Confiabilidad} = \Phi \left(\frac{\mu_Y - \mu_X}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right) \quad \text{Probabilidad de Falla: } 1 - \Phi \left(\frac{\mu_Y - \mu_X}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right)$$

Donde μ_Y y μ_X son las medias de las distribuciones de la resistencia o criterio límite y el esfuerzo o condición monitoreada respectivamente, y σ_Y y σ_X las respectivas desviaciones estándar.

NOTA: El operador “ Φ ”, indica que con el resultado obtenido de la ecuación entre paréntesis, debe buscarse el valor de probabilidad correspondiente en una tabla de la distribución normal.¹⁶

¹⁶ Ibid; 6 p.

– Estimación de la confiabilidad basada en la condición. Un parámetro de condición (PC) es cualquier variable física que revele información acerca de las características de desempeño de un equipo o componente. Un Parámetro Relevante de Condición (PRC) es un parámetro cuyo valor numérico caracteriza y cuantifica la condición de un equipo o componente en cualquier instante de su vida operativa.

Para que un PC sea un PRC, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Caracterizar la condición del equipo.
- Ajustar su valor continuamente durante su vida operativa.
- Describir numéricamente la condición del equipo o componente.

Un buen ejemplo de un PRC es el espesor de pared “E”, el cual es comúnmente usado en la industria petrolera para caracterizar el proceso de deterioro debido al fenómeno Erosión-Corrosión en tuberías en general y en algunos recipientes a presión. Otros PRC famosos en la industria del gas y del petróleo son:

- Nivel de Vibración (Equipos Dinámicos)
- Partículas Metálicas disueltas en el aceite (Equipos Dinámicos)
- Velocidad de Declinación (Pozos y Yacimientos)
- Presión Estática de Fondo (Yacimientos)

– Predicción del Número de Fallas Basado en el Historial de Fallas. En este punto, se presenta la metodología y la plataforma matemática para predecir la disponibilidad en sistemas reparables, a través del tratamiento estadístico de su historial de fallas y reparaciones.

En otras palabras, los equipos son caracterizados usando su distribución probabilística del “tiempo para fallar” y el “tiempo para reparar”. Este tipo de análisis es particularmente valioso para equipos dinámicos, los cuales tienen una frecuencia de falla relativamente alta. Normalmente, la data de fallas y reparaciones está disponible.

Para equipos reparables existen cinco posibles estados en los que ellos pueden quedar, una vez reparados después de una falla:

- Tan bueno como nuevo.(1)
- Tan malo como antes de fallar.(2)
- Mejor que antes de fallar pero peor que cuando estaba nuevo. Mejor que nuevo.(3)
- Mejor que nuevo.(4)
- Peor que antes de fallar.(5)

Los modelos probabilísticos tradicionalmente usados en análisis de confiabilidad, se basan en los estados (1) y (2) (estados límites), sin tomar en cuenta los estados (3), (4) y (5) a pesar de que el estado (3) es más realista en la práctica.

La razón para esto radica en la dificultad de desarrollar una solución matemática para modelar este estado.

Este trabajo muestra el modelo probabilístico desarrollado, el cual se denomina “Proceso Generalizado de Restauración” (PGR). Este modelo elimina las limitaciones antes mencionadas porque toma en cuenta todos los posibles estados de un equipo después de una reparación.

Esto da como resultado una nueva plataforma conceptual para análisis de confiabilidad en equipos reparables, la cual se ajusta en mayor grado a lo que sucede en la realidad, eliminando las desviaciones derivadas del uso de los análisis tradicionales, especialmente en cuanto a la predicción del número esperado de fallas y el tiempo para la próxima falla.

2.2.3 Formulación Matemática del PGR. Las ecuaciones básicas del PGR tienen su base en distribuciones probabilísticas de *Weibull* condicionales, y son las siguientes:

$$F(t_i) = 1 - e \left[\left(\frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad \text{Prob. de Falla}$$

$$c(t_i) = e \left[\left(\frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad \text{Confiabilidad}$$

A partir de estas ecuaciones básicas y de la data de fallas [(ti)=tiempos de operación entre fallas sucesivas] se calculan los parámetros “ α ”, “ β ” y “ q ”, cuyo significado es:

α :”parámetro de escala”

β : ”parámetro de forma”

q : ”parámetro de efectividad de la reparación”. Este parámetro puede interpretarse, según su valor, de la siguiente forma:

$q = 0$ tan bueno como nuevo

$0 < q < 1$ mejor que como estaba, pero peor que cuando era nuevo

$q = 1$ tan malo como estaba

$q < 0$ mejor que nuevo

$q > 1$ peor que como estaba

Para obtener los parámetros con este método existen dos alternativas dependiendo del momento de ejecución del análisis.

2.2.3.1 Método de estimación de la Máxima Probabilidad de Ocurrencia (MPO), para aquellos casos en los cuales hay suficiente data disponible para el ciclo en análisis.

2.2.3.2 Teorema de Bayes para aquellos casos en los que no hay suficiente data disponible del ciclo en análisis.

2.2.4 Estimación de Consecuencias. En esta sección se presenta una metodología para estimar las consecuencias totales que resultan de la falla de un equipo y/o sistema. El modelo básico que soporta el trabajo aquí propuesto es el de “Impacto Total en el Negocio” desarrollado por *John Woodhouse*.¹⁷

2.2.4.1 Modelo Propuesto. El modelo divide las consecuencias asociadas con una falla particular en cuatro grandes categorías: Pérdidas de producción, costos de reparación, impacto ambiental e impacto en seguridad.

- Pérdida de Producción. En este paso, las pérdidas de producción debido a tiempo fuera de servicio son estimadas usando la siguiente ecuación: PERDIDA DE PRODUCCIÓN = PP * RF * TTR.

¹⁷ WOODHOUSE, John, “Managing Industrial Risk”, Chapman and Hall, Oxford, UK, 1993.

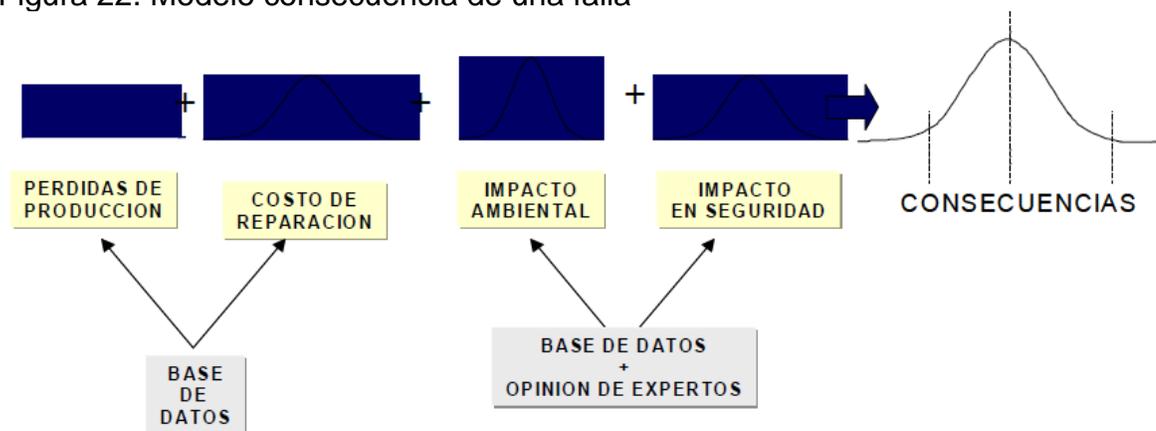
Donde PP es el precio del producto (\$/Unid), RF es la reducción de flujo (Unid/Hr) y TTR, el tiempo para reparar (Hrs). La variabilidad del costo del producto se incluye con la asunción de una distribución normal.

- Reducción de flujo: La reducción puede ser total o parcial, dependiendo de otros factores tales como diseño, redundancias, cargas compartidas o stand by y/o severidad de la falla (crítica o degradación). Para representar todos los posibles valores de esta reducción se definió una distribución normal.
- Tiempo de reparación: En lo que respecta al tiempo de reparación, es su valor promedio (MTTR) el considerado para representar la distribución de esta variable.

2.2.4.2 Costos de reparación. La distribución de los costos de reparación debe incluir el espectro de todos los posibles costos, los cuales varían dependiendo de la severidad de la falla. Durante los ciclos de vida (tiempo entre *overhauls*), estos costos tienden hacia una distribución normal.

2.2.4.3 Impacto Ambiental e Impacto en Seguridad. Las distribuciones de estos impactos, en la mayoría de los casos, son difíciles de construir, pues no es fácil encontrar datos y fundamentalmente requieren ser construidas en base a la opinión de expertos.

Figura 22. Modelo consecuencia de una falla



Fuente: MEDARDO Yáñez, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. "Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento". 12 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

2.2.5 El Diagnóstico Integral en el Proceso de Confiabilidad. Como se ha estado describiendo en este trabajo, el diagnóstico integral es un proceso que implica el uso de avanzadas técnicas de cálculo para predecir fallas y eventos no deseados e inferir sus consecuencias; es decir, permite estimar el riesgo siguiendo el esquema...de la figura 19...y también permite el uso de modelos de decisión como el Modelo Costo Riesgo explicado...en el numeral 2.2... Hasta este punto, se ha descrito brevemente las técnicas de la Ingeniería de Confiabilidad que permiten hacer estos cálculos.

El proceso conocido como “Confiabilidad Operacional”; es un enfoque metodológico donde el diagnóstico integrado se combina con otras metodologías tradicionales del área de confiabilidad, tales como: Análisis de Modos y Efectos de Fallas, Análisis Causa Raíz e Inspección Basada en Riesgo, entre otras; con la finalidad de:

2.2.5.1 Inferir probabilísticamente. Todos los escenarios de producción factibles, a través de la predicción de los periodos de operación normal y de ocurrencia de eventos o escenarios no deseados, basados la configuración de los sistemas, la confiabilidad de sus componentes y la filosofía de mantenimiento.

2.2.5.2 Identificar acciones concretas. Para minimizar y/o mitigar la ocurrencia de estas fallas o eventos no deseados y llevar el riesgo a niveles tolerables.

2.2.5.3 Explorar las implicaciones económicas. De cada escenario de riesgo posible y diseñar planes y estrategias óptimas para el manejo del negocio.¹⁸

2.3 ANÁLISIS COSTO DEL CICLO DE VIDA (ACCV)

Entre los años de 1992 y 1994, el investigador *Wood Ward* (1997), de la Escuela de Negocios de la Universidad de *Staffordshire* (Inglaterra, Gran Bretaña), desarrolló una línea de investigación, en la cual incluye aspectos básicos de análisis del factor Fiabilidad y su impacto sobre los Costes de Ciclo de Vida.

¹⁸ MEDARDO Yáñez, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. 13 p. Reliability and Risk Management S.A. 2011. Sitio web: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

En el año de 1992, dos investigadores de la Universidad de Virginia, *Wolter Fabrycky* y *B.S. Blanchard*, desarrollan un modelo de ACCV. En el cual incluyen un proceso estructurado para calcular los costes de Confiabilidad a partir de la estimación de valores constantes de fallos por año (tasa de fallos constante).

En el año 1998, los ingenieros *David Williams* y *Robert Scott* de la firma consultora *RM-Reliability Group*, desarrollan un modelo de ACCV basado en la Distribución de *Weibull* para estimar la frecuencia de fallos y el impacto de los Costes de Confiabilidad.

A finales de 1999, el grupo asesor *The Woodhouse Partnership* participa en el Proyecto Europeo EUREKA, específicamente dentro de la línea de investigación denominada MACRO (*Maintenance Cost/Risk Optimisation 'MACRO' Project*) y desarrollan un *software* comercial de ACCV denominado *APT Lifespan* el cual se define de forma clara en *Riddell et al (2001)* y *Woodhouse (1999)*, que incluye la evaluación de la frecuencia de fallos, utilizando distribuciones probabilísticas.

Posteriormente, en el año 2001 en conjunto la Universidad *Robert Gordon*, *The Woodhouse Partnership* y el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP), ponen a prueba este modelo, evaluando los Costes Totales de Ciclo de Vida de 56 sistemas de compresión de gas, utilizados para la extracción del petróleo pesado del Distrito San Tomé (Venezuela) y presentan los resultados de este análisis.

En los últimos años, el área de investigación relacionada con el análisis de Costes en el Ciclo de Vida, ha continuado su desarrollo, tanto a nivel académico como a nivel industrial. Es importante mencionar la existencia de otras metodologías que han venido surgiendo en el área de ACCV, tales como: Análisis de Costes de Ciclo de Vida e Impacto Ambiental, Análisis de Costes Totales de Activos de Producción, Modelo de Costes Basado en Actividades, entre otras.

Estas metodologías tienen sus características particulares, aunque con respecto al proceso de estimación del impacto de los costes por eventos de fallos, las mismas, proponen análisis de Confiabilidad normalmente basados en tasa de fallos constantes.

La metodología ACCV, puede definirse como un proceso sistemático de evaluación de distintos activos (vías alternativas de acción) que considera de forma simultánea aspectos *económicos* y *de Confiabilidad*, con el propósito de cuantificar el impacto de los costes a lo largo del ciclo de vida de los activos (\$/año), y de esta forma, poder seleccionar el activo que aporte los *mayores beneficios* al proceso de producción.¹⁹

¹⁹ PARRA, Carlos. Memorias. Seminario Riesgo, LCC y Confiabilidad. Bucaramanga. 2011. Sitio web: www.confabilidadoperacional.com

2.3.1 Ciclo vida útil. La vida de un sistema (proceso, elemento, componente, equipo) es definida en términos semejantes a la vida humana, como el promedio de años en el cual se espera que el sistema funcione.

2.3.1.1 Vida Tecnológica: número de años esperados de operación hasta que la tecnología causa obsolescencia en el sistema.

2.3.1.2 Vida útil: número de años esperados durante los cuales el sistema cumplirá sus funciones dentro de los estándares de operación de diseño establecidos.

2.3.1.3 Vida económica: número de años estimados en los cuales el sistema genera los menores costos (mayores ganancias) dentro del proceso de producción.

2.3.1.4 Período de Vida Útil equivalente: en el caso de que las alternativas a evaluar, tengan la misma expectativa de vida económica, el período de análisis de los costos es similar. Este escenario es el más sencillo y común para los ACCV.

2.3.1.5 Período de Vida Útil diferentes: en el caso de que las alternativas a evaluar, tengan diferentes expectativas de vidas económicas, es posible seleccionar el período de análisis de los costos como un múltiplo de los períodos a ser evaluados.

Por ejemplo, en el caso de dos opciones, en los cuales se hayan definido como período de vida útil 8 y 12 años respectivamente, el posible período de análisis sería de 24 años, ya que en este período se podrían evaluar los costos totales de las dos alternativas y analizar en un mismo escenario la comparación entre las dos alternativas.

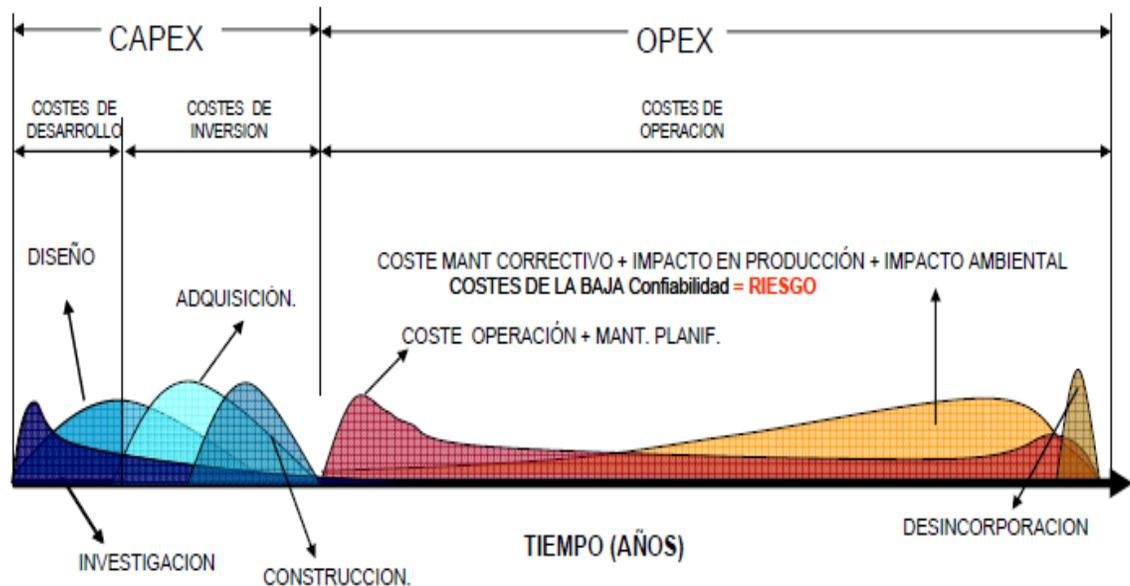
2.3.2 Aspectos fundamentales del ACCV. La metodología ACCV, puede definirse como un proceso sistemático de evaluación de distintos activos (o vías alternativas de acción) que considera de forma simultánea aspectos económicos y de Confiabilidad, con el propósito de cuantificar el impacto de los costes a lo largo del ciclo de vida de los activos (\$/año), y de esta forma, poder seleccionar el activo que aporte los mayores beneficios al proceso de producción.

Esta metodología permite calcular el ciclo de vida de los activos y comparar diferentes opciones con el fin de identificar cual es el mejor.

Para realizar un ACCV es necesario considerar los siguientes conceptos:

2.3.2.1 Características de los costos.

Figura 23. Características de los costos



Fuente: PARRA, Carlos. Memorias seminario Riesgo, LCC y Confiabilidad. Bucaramanga. 2011. Sitio web: www.confiabilidadoperacional.com

En la figura 23 podemos observar que los CAPEX (gastos de capital o inversión), estos representan la cantidad de dinero gastado en la adquisición o mejora de los bienes de capital de la empresa, con el fin de mantener un producto o servicio que le dé continuidad al negocio. Los OPEX (gastos operativos) se refieren a los costos asociados al mantenimiento de equipos, gastos de combustible, y otros gastos de funcionamiento necesarios para la operación del negocio.

2.3.2.2 Tasa de interés. La tasa de interés representa el valor del dinero en el tiempo. Esta se define como la tasa nominal de incremento en el valor del dinero en el tiempo.

Este proceso en el que el dinero adquiere valor e incrementa en cantidad sobre un periodo de tiempo específico (años), es lo que se conoce como el valor del dinero en el tiempo, ejemplo a una tasa anual de 7% anual, 100 pesos en un año serán 107 pesos.

Para la tasa de descuento y los métodos para determinarla, no hay un método único aceptado a nivel mundial, por lo cual, las estimaciones de la tasa de descuento varían entre las diferentes organizaciones. La selección de la tasa de descuento es una decisión propia en las organizaciones públicas y privadas.

2.3.2.3 Valor presente (P) de un valor anualizado (A). Dado un valor anualizado (A), calcular un valor presente (P).

$$P = A \times VPA \quad VPA = \frac{(1+i)^t - 1}{i \cdot (1+i)^t}$$

Ejemplo:

CO= Costos operacionales.

A= \$ 10000/Año, i=10%, t=15 años

$$P = 10000 * \frac{(1+0.1)^{15} - 1}{0.1 \cdot (1+0.1)^{15}}$$

$$P = 76060.69$$

2.3.2.4 Valor presente simple (P) de un valor futuro (F). Dado un valor futuro (F), calcular un valor (P).

$$P = F * VP$$

$$VP = \frac{1}{(1+i)^t}$$

Ejemplo:

CMM= costos de mantenimiento mayor.

F=\$100000, para t=5 años y para t=10 años, i=10%

t = 5 años

$$P = 100000 * \frac{1}{(1 + 0.1)^5}$$

$$P = 62092.13$$

$$t = 10 \text{ años}$$

$$P = 100000 * \frac{1}{(1 + 0.1)^{10}}$$

$$P = 38554.32$$

2.3.2.5 Valor anualizado (A) de un valor presente (P). Dado un valor presente (P), Calcular su valor (A).

$$A = P * PPA$$

$$PPA = \frac{i * (1 + i)^t}{(1 + i)^t - 1}$$

Ejemplo:

Costos totales en valor presente de un activo x:

P= \$ 1076162.59, representa el valor presente de todos los costos esperados en un ciclo de vida de 15 años y una tasa de descuento de 10%.

$$A = 1076162.59 \frac{0.1 * (1 + 0.1)^{15}}{(1 + 0.1)^{15} - 1}$$

A = 141487.16 Representa el valor equivalente anual de todos los costos esperados para un ciclo de vida de 15 años y una tasa de descuento de 10%.²⁰

²⁰ PARRA, Carlos. Memorias seminario Riesgo, LCC y Confiabilidad. Bucaramanga. 2011. Sitio web: www.confiabilidadoperacional.com

3. RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS [ACR]

3.1 IDENTIFICACION DEL EVENTO

- **QUE**

Suspensión del servicio de entrega de gas natural por cierre del *CITY GATE* La Dorada.

- **CUANDO:**

06 de mayo de 2013 @ 05:30 horas

- **DONDE:**

CITY GATE La Dorada

- **IMPACTO SEGURIDAD (COL \$):**

No se presenta ningún evento asociado a la seguridad de personal.

- **IMPACTO MEDIO AMBIENTE (COL\$):**

No se evidencia ningún impacto relacionado.

- **LUCRO CESANTE (COL \$):**

Estimado en \$ 1480000.

- **COSTOS DIRECTOS (COL \$):**

Estimado en \$ 2775000

- **FRECUENCIA DE FALLOS:**

Eventos ocurridos desde el 2011 equivalente a 2 eventos /año (CG Dorada, Puerto Salgar, Puerto Boyacá)

- **RIESGO ECONÓMICO POTENCIAL [FRECUENCIA X CONSECUENCIA] (COL \$/AÑO): \$ 8510000 COL \$/ AÑO.²¹**

3.2 DESCRIPCIÓN DEL *CITY GATE* LA DORADA

- El primer sistema que atraviesa el gas al ingresar al *CITY GATE* La Dorada es el de filtración y su operación es convencional. El filtro – separador horizontal es de 2” – 600# a la entrada y en 2” – 600# para la salida.

²¹ Nota del Autor.

Cuenta con medición de presión y temperatura a la entrada, sin embargo, no se tiene un manómetro dedicado en el cuerpo del filtro.

El *by – pass* del filtro – separador es en tubería de 2” – 600# y las conexiones con la etapa de regulación es en 2”- 600#.

Para esta localidad, el sistema de calentamiento y el intercambiador se encuentra operando de forma apropiada y todo el flujo se hace pasar por el intercambiador de calor.

Algunos de los equipos o instrumentos que se observaron deteriorados son los indicadores de nivel y puede que las trampas de condensados. El diferencial de presión para esta localidad se encuentra funcional pero un poco deteriorado.

- El segundo sistema que atraviesa el gas durante su recorrido por el *CITY GATE* de la Dorada es el de regulación.

La tecnología usada para medición es Turbina, además, la mayoría de conexiones son en 2”- 150# aunque el tamaño del medidor es en 3”- 150#.

En general los instrumentos y equipos de esta etapa se encuentran en buenas condiciones. Sin embargo, la turbina modelo ELSTER G100 se observa bastante deteriorada aunque es funcional y la misma situación se tiene para las válvulas, en especial la de *shut – off* por baja.

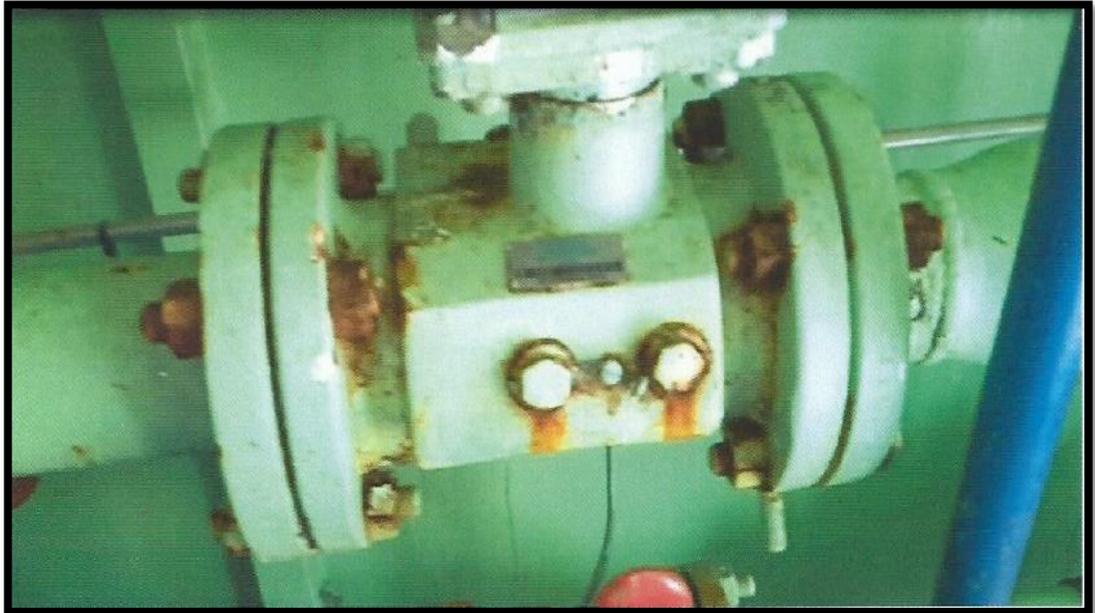
Se respeta la filosofía de funcionamiento que consiste en tener un brazo operativo y otro en *stand – by*.

Se observa presencia de humedad en la tubería y equipos de medición, lo anterior deja rastros de corrosión en equipos y tubería.²²

A continuación se presentan algunas imágenes de referencia de lo comentado anteriormente.

²² Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-008.P 23

Figura 24. Turbina ELSTER G100



Fuente: Foto: medidor ELSTER G100 CITY GATE la Dorada.

Figura 25. Humedad, corrosión y deterioro Turbina ELSTER G100



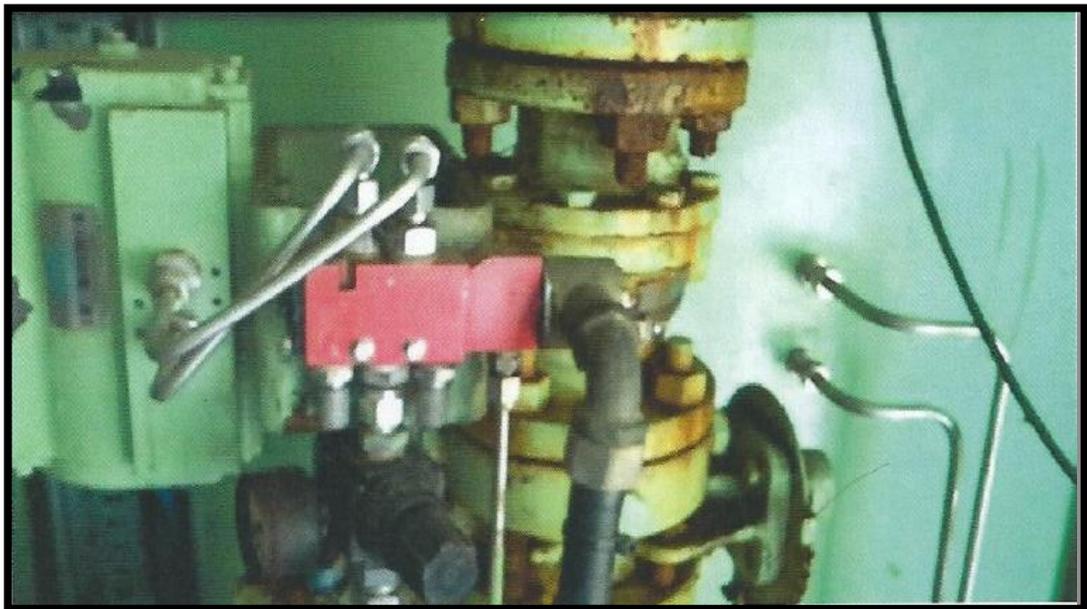
Fuente: Foto Registro turbina ELSTER G100 CITY GATE la Dorada.

Figura 26. Brazo inferior



Fuente: Foto brazo inferior de medición *CITY GATE* la Dorada.

Figura 27. Válvula de *shut – off*.



Fuente: Foto Válvula *SHUT-OFF* por baja *CITY GATE* la Dorada.

Figura 28. Otros lugares de la etapa de medición



Fuente: Foto *BY PASS* sistema de medición *CITY GATE* la Dorada.

Figura 29. Etapa de medición



Fuente: Foto brida etapa de medición *CITY GATE* la Dorada.

En la figura 29 se observa presencia de humedad y corrosión en otros lugares de la etapa de medición.

3.2.1 Listado de equipos, estado mecánico y filtración

Tabla 7. Convenciones para la matriz de estado general

CONVENCIONES DE ESTADO MECANICO				
ESTADO MECÁNICO	Bueno	Deteriorado	No instalado	Desconocido
ESTADO OPERATIVO	Funcional	No funcional	Defectuoso	Desconocido

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-002. P 4.

Tabla 8. Estado mecánico y filtración de equipos

CITY GATE LA DORADA (SISTEMA DE FILTRACION)					
EQUIPO	MARCA	MODELO	TAMAÑO	ESTADO MECANICO	ESTADO OPERATIVO
Main isolating valves	TK Valve	Ball	2"-600# RF	BUENO	FUNCIONAL
Insulating joints	Mecanica segrino	P050100	2"-600#	BUENO	FUNCIONAL
Level Gauges /switches (filter+ separator)	intra-Automation GmbH	ITA 10	3/4" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pressure switch	SOR	934	1/2" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Horizontal (filter+separador)	Peerless EU	24-106	8,5/8"D*75"ST 2"*2"-600# RF	BUENO	FUNCIONAL
DP Gauge/switch	IGA	Mod 150	1/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
Ball float traps	Armstrong Machine Works	2413 HLS	1/2 NPT Orifice 5/64	BUENO	FUNCIONAL
Heat Exchanger	Graham	Heliflow 954C-14S	1 1/4"*1 1/4" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Temperature indicator/Transmitter	Endress and hauser	TMT137	3/4" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pressure indicator/Transmitter	Endress and hauser	PMP731	1/2" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pipes and fittings	N/A	N/A	2" SCH 80	BUENO	FUNCIONAL

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-002. P 5.

Tabla 9. Estado mecánico y de medición de equipos

CITY GATE LA DORADA (SISTEMA DE MEDICION)					
EQUIPO	MARCA	MODELO	TAMAÑO	ESTADO MECANICO	ESTADO OPERATIVO
Main Isolating Valve	TK Valve	Ball	2" 150# RF	BUENO	FUNCIONAL
Shut off valves (LOW)	TK Valve	Ball	2" 150# RF	BUENO	FUNCIONAL
Neumatic Actuator	Bettis	RP Series	N/A	BUENO	FUNCIONAL
Pressure Pilot	Bettis	Pressurematic P-AR2200C	N/A	BUENO	FUNCIONAL
Pressure switch Actuator	Bettis	Bettis Switch 3R Series	N/A	BUENO	FUNCIONAL
Pressure Gauges	USG	Helicoid 100mm botton entry 1/2" NPT	1/2" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Turbine Flow Meter	Dresser	G160	3"150#RF	BUENO	FUNCIONAL
Turbine Flow Meter	Elster	G100	3"150#RF	BUENO	FUNCIONAL
Flow Computer	Eagle Research Corp.	AE5000	N/A	BUENO	FUNCIONAL
Odoriser	N/A	N/A	N/A	BUENO	FUNCIONAL
Pressure Switchs	SOR	934	1/2" NPT	BUENO	FUNCIONAL
RTD	N/A	PT100	3/4" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pressure Indicator/ Transmitters	Endress and Hauser	PMP731	1/2" NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pipes and Fittings	N/A	N/A	2"&3" SCH 80	BUENO	FUNCIONAL

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-003. P 5.

Tabla 10. Estado mecánico y regulación de equipos

CITY GATE LA DORADA (SISTEMA DE REGULACION)					
EQUIPO	MARCA	MODELO	TAMAÑO	ESTADO MECANICO	ESTADO OPERATIVO
Main Isolating Valve	TK Valve	Ball	2" 600#RF	BUENO	FUNCIONAL
Shut off valves (High)	Intromet	IPS-H	2" 600#RF	BUENO	FUNCIONAL
Presure Gauges	Bristol Babcock	Helicoid 100mm			
	USG	botton entry	1/2 NPT	BUENO	FUNCIONAL
1st/2nd Main Stage Axial flow Valves	American Meter	H7	2" 600#RF	BUENO	FUNCIONAL
1st/2nd Main Stage Stabilizer Pilots	IGA	ZSC 138	1/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
1st/2nd Main Stage Control Pilots		ZSC 320 100	1/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
Main Override Pilot		ZSC 100	1/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
Load Limit/Relief Regulator valves		Z 150	1/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
1st Boiler Regulator Valve		HPR	1/4 NPT ORIFICE 1/8	BUENO	FUNCIONAL
2nd Stage Boiler Regulator Valve		1843B	1/4 NPT ORIFICE 1/8*3/16	BUENO	FUNCIONAL
Boiler Fuel Relief Valve		Norgren	Series V06	1/4 NPT	BUENO
Temperature Indicator/Transmitter	Endress and hauser	TMT 137	3/4 NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pressure Indicator/Transmitter	Endress and hauser	PMP 731	1/2 NPT	BUENO	FUNCIONAL
Pipes and Fittings	N/A	N/A	2" SCH80	BUENO	FUNCIONAL

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-004. P 5.

Tabla 11. Espesores mínimos por diseño ASME B31.3

PARAMETROS	VALOR	TAMAÑO TUBERIA	ESPESOR MIN PERM.
Corrosión Permisible	0.1 in	1" SCH 80	0.1099in = 2.792mm
Resistencia material de tubería, API 5L GRADO B	60000 psi	2" SCH 80	0.1198in = 3.044mm
		3" SCH 80	0.1298in = 3.296mm
Presión de diseño	1200 psi	4" SCH 80	0.1397in = 3.54mm
Coefficiente, Y	0.4		
Factor Junta Soldada, W	1		
Factor de Calidad, E	1		

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-005. P 2.

$$t = \frac{PD}{2(SEW + PY)}$$

Tabla 12. Diagnóstico de espesores en tubería

CITY GATE LA DORADA				
DN	SCH.NOM	ESP.NOM	ESP.MIN.MEDIDO	OBSERVACIONES
2"	SCH.80	5,54 mm	3,3 mm	Estado de Tubería OK
3"	SCH.80	7,62 mm	5,6 mm	Estado de Tubería OK
4"	SCH.80	8,56 mm	9,3 mm	Estado de Tubería OK
8"	SCH.80	12,7 mm	9,3 mm	Estado de Tubería OK

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-005. P 3.

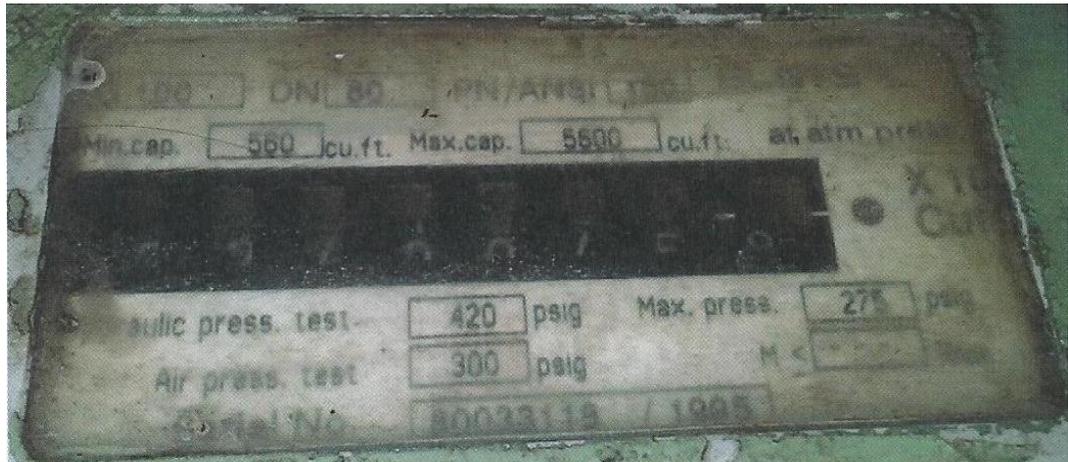
Tabla 13. Diagnóstico de ruido en accesorios y equipos

CITY GATE LA DORSDA		
ETAPA	MAX.RUIDO	OBSERVACIONES
FILTRACION	84 [dB]	Dentro de Tolerancias
REGULACION	91 [dB]	Dentro de Tolerancias
MEDICION	84 [dB]	Dentro de Tolerancias

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-006. P 2.

3.2.2 Turbine / ELSTER G 100 (3"- 150# RF). De acuerdo a la placa del medidor se tiene la siguiente información:

Figura 30. Medidor



Fuente: Foto Medidor ELSTER *CITY GATE* la Dorada.

En resumen tenemos las siguientes condiciones máximas que soporta el modelo actual del medidor:

- Flujo máximo actual = 5600 ACFH
- Flujo mínimo actual = 560 ACFH
- Presión máxima = 275 psi
- Presión mínima = 14.65 atm
- Temperatura máxima = 65°C
- Temperatura mínima = -25°C

En el *CITY GATE* la Dorada donde se usa este medidor, las condiciones de operación por lo general son:

- Temperatura medición = 25 - 15°C
- Presión de medición = 60 – 65 psig

Lo anterior se traduce en los siguientes flujos a condiciones estándar:

- Flujo máximo nominal = 28269 SCFH
- Flujo mínimo nominal = 2827 SCFH²³

²³ Nota del autor.

Para las válvulas de regulación convencional, se tienen orificios de 3/16" y 3/32", por lo tanto, las capacidades estimadas son:

Tabla 14. Capacidades de las válvulas

CALCULO REGULADOR 040		CALCULO REGULADOR 040	
ORIFICIO	3/16"	ORIFICIO	3/16"
K	30,3	K	30,3
P1[Bar Ab]	56,19	P1[Bar Ab]	14,81
P2[Bar Ab]	14,81	P2[Bar Ab]	5,15
851,22 m ³ /h		224,32 m ³ /h	
FLUJO MAX	30061 SCFH	FLUJO MAX	7922 SCFH
CALCULO REGULADOR Z		CALCULO REGULADOR Z	
ORIFICIO	3/32"	ORIFICIO	3/32"
K	7,6	K	7,6
P1[Bar Ab]	45,84	P1[Bar Ab]	28,6
P2[Bar Ab]	28,6	P2[Bar Ab]	5,15
851,22 m ³ /h		851,22 m ³ /h	
FLUJO MAX	30061 SCFH	FLUJO MAX	30061 SCFH

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-007. P 15.

- Tubería: La capacidad de flujo volumétrica en la tubería queda determinada por la velocidad erosiva, de la cual se tomara aproximadamente el 50% como permisible para la operación continua.

La velocidad erosiva se deduce con la densidad de acuerdo a su ubicación en el proceso (presión y temperatura) y lo recomendado en el API RP 14 E.

Tabla 15. Capacidad de flujo en tuberías

	TAMAÑO DE TUBERIA	DENSIDAD ACTUAL [Lb/ft ³]	VELOCIDAD EROSIVA [ft/s]	VELOCIDAD PERMISIBLE [ft/s]	FLUJO VOL. ACTUAL [ACFH]	FLUJO VOL. ACTUAL [SCFH]
CITY GATE LA DORADA	1 1/4" SCH 80 @ 880 PSI and 30 °C	3,61	79	39	1251	87389
	2" SCH 80 @ 880 PSI and 30 °C	3,61	79	39	2879	201113
	3" SCH 80 @ 880 PSI and 30 °C	0,27	289	144	23760	123048

Fuente: ECI-TGI-1-MEC-DOC-007. P 17.

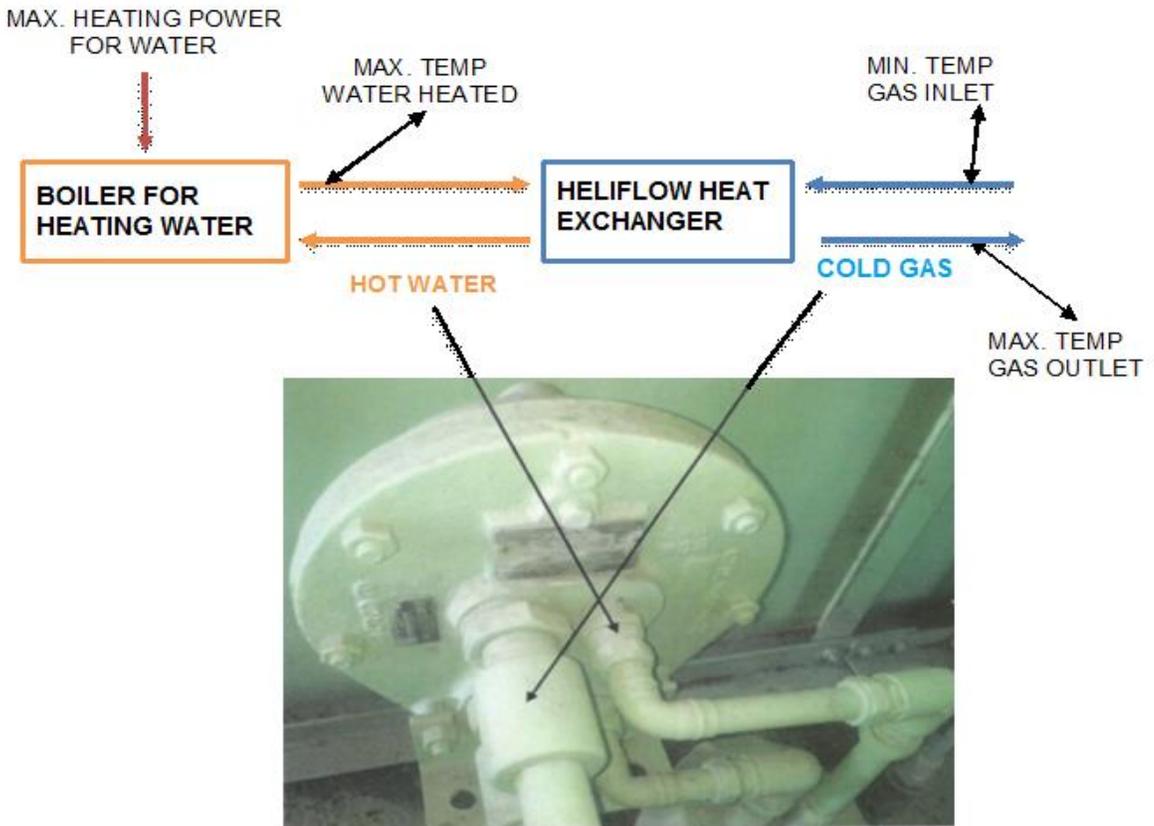
Tabla16. Capacidad entrega actual y futura *CITY GATE* la Dorada

	SITEMA	EQUIPO CRITICO	PRESION DE OPERACIÓN MAXIMA[PSI]	CAPACIDAD DE FLUJO MAXIMO POR EQUIPO[SCFH]	FLUJO TOTAL ACTUAL [SCFH]	FLUJO TOTAL FUTURO 2018 [SCFH]
CITY GATE LA DORADA	FILTRACIÓN	FILTRO	1440	Q_10 psi Diferencial	Pico=45369 prom=20417	Pico=66250 Prom=22083
	REGULACIÓN	1ra Etapa válvula axial	1440	557000		
		2da Etapa válvula axial	1440	227000/165000		
	MEDICIÓN	Turbina Medidor G160	360	44570		
		Turbina Medidor G100	360	28269		
	CALENTAMIENTO	Calentador 1/4"	360	87389		
		Intercambiador de Calor	1440			
	TUBERIA	Tubería 2" SCH 80	1440	201113		
Tubería 3" SCH 80		1440	123048			

Fuente: Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-008 p 3

3.2.3 Esquema del proceso de calentamiento del *CITY GATE* la Dorada

Figura 31. Proceso de calentamiento



Fuente: Foto Intercambiador *CITY GATE* la Dorada.

Tabla 17. Calculo de condiciones de proceso por *GRAHAM HELIFLOW*.

Rendimiento del intercambiador de calor en condiciones críticas							
Estación	Modelo HELIFLOW	Máxima potencia de calentamiento para el agua	Máximo flujo de agua	Máximo flujo de gas	Máxima temperatura de calentamiento para el agua	Mínima temperatura del gas a la entrada	Máxima temperatura salida del gas
La Dorada	9S4C-14S	50 KW	3m ³ /h	44600 SCFH	60-90 °C	20 °C	52,5/78,5 °C

Fuente: Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-009. P 3.

Tabla 18. Especificaciones del calentador de agua

Domomatic®	KTx	50	65	84	
Symbol dopuszczzenia typoszeregu		08-226-248			
Maksymalne obciążenie cieplne	kW	53	70	90	
Nominalna moc cieplna	kW	49	65	84	
Zakres mocy	kW	37—49	50—65	65—84	
Sprawność kotła*	%	93			
Strata kominowa*	%	6,5			
Straty postojowe*	%	0,45	0,37	0,31	
Maksymalna dopuszczalna temperatura kotła	°C	100			
Maksymalna nastawialna temperatura zasilania	°C	90			
Opór po stronie wodnej ($\Delta t=20$ K)	mbar	30	53	83	
Dopuszczalne nadciśnienie robocze	bar	3			
Pojemność wodna	litrów	105	135	172	
Pojemność komory spalania	l	81	102	128	
Średnica komory spalania (wkład komory spalania)	mm	250			
Długość komory spalania	mm	650	820	1030	
Pojemność po stronie spalin	l	90	115	146	
Opór po stronie spalin	Pa/mbar	9/0,09	14/0,14	20/0,2	
Podłączenie elektryczne	V~/Hz/A	230/50/10			
Pobór mocy min./max.	VA	2/450			
Rodzaj ochrony (DIN 40050)		IP 20			
Rozstaw stóp regulowanych	T1	mm	540	710	920
Długość kotła	T3	mm	840	1010	1220
Długość kotła z kotłierzami	T4	mm	875	1045	1255
Przyłącze zasilające / powrotne	DN	40			
Ciężar z opakowaniem	kg	220	265	320	
Wartości obliczeniowe do zaprojektowania komina					
Zawartość CO ₂	Vol. %	13			
Temperatura spalin	°C	170			
Natężenie przepływu spalin	kg/h	82,8	108	138	
Natężenie przepływu spalin	g/s	23	30	38	
Zapotrzebowanie ciągu	Pa	5	5	5	
* Wartości obowiązują dla mocy nominalnej, zawartości CO ₂ 13 %, temperatury pomieszczenia 20°C					

Fuente: www.dedietrich.pl/content/.../KTx%2050-84.pdf

Tabla 19. Especificaciones del intercambiador de calor

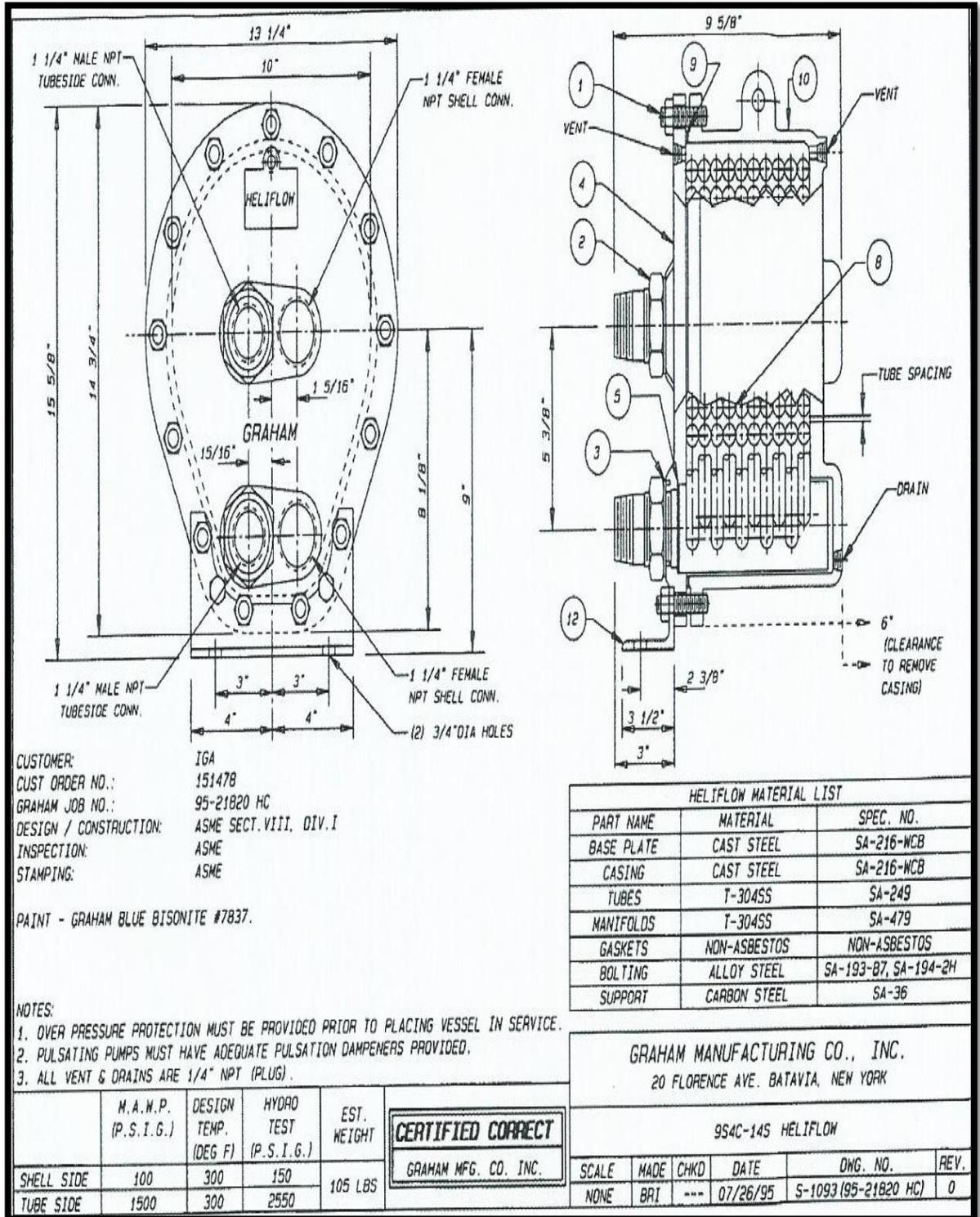


ENGINEERING DATA, Sizes 3-10 to 45-20LL

Size	Number of Coils	Surface Sq. Feet	Tube Diam. Inches	Coil Spacing Inches	Coil Length Feet	Free Shell Area Sq. Inches	Size	Shell Equiv. Flow Length Feet	Con-nections Casing Coil	GPM at Velocity of 10 FPS		
										Casing	Coil - BWG	
											16	18
3-10	3	1.06	1/2	3/2	2.71	.302	3-10	3.0	1/2	9.4	10.0	11.9
4-10	4	1.44	3/8	1/8	3.67	.309	4-10	5.35	1/2	9.6	5.9	7.5
8-10	8	2.56	1/4	1/8	4.92	.358	8-10	5.7	1/2	11.1	2.8	4.5
4-12	4	2.75	1/2	1/8	5.25	.466	4-12	6.5	1 1/4	14.5	13.4	15.8
6-12	6	4.13	1/2	1/8	5.25	.699	6-12	6.5	1 1/4	21.8	20.1	23.7
8-12	8	4.40	3/8	1/8	5.51	.618	8-12	7.9	1 1/4	19.3	11.7	15.0
12-12	12	6.31	1/4	1/8	8.11	.537	12-12	9.4	1 1/4	16.8	4.3	6.8
9-14S	9	9.63	1/2	1/8	8.16	1.04	9-14S	9.75	1 1/4	32.8	30.1	35.5
12-14S	12	11.6	3/8	1/8	9.90	.93	12-14S	11.5	1 1/4	29.0	17.6	22.5
18-14S	18	11.5	1/4	3/16	9.77	1.08	18-14S	11.5	1 1/4	33.8	6.4	10.2
12-14L	12	13.0	3/8	1/8	6.6	1.94	12-14L	8.25	1 1/4	61.0	72.1	82.0
15-14L	15	16.0	1/2	1/8	8.16	1.75	15-14L	9.75	1 1/4	56.4	50.2	59.3
20-14L	20	19.4	3/8	1/8	9.90	1.55	20-14L	11.5	1 1/4	48.3	29.3	37.4
30-14L	30	19.2	1/4	3/16	9.77	1.8	30-14L	11.5	1 1/4	56.9	10.7	17.0
30-14LL	30	32.08	1/2	1/8	8.16	3.50	30-14LL	9.75	1 1/4	109.0	100.0	118.0
9-16S	9	12.7	1/2	1/8	10.88	1.04	9-16S	13.0	2	32.8	30.1	35.5
12-16S	12	17.4	3/8	1/8	14.79	.93	12-16S	15.5	2	29.0	17.6	22.5
18-16S	18	17.66	1/4	3/16	15.06	1.08	18-16S	17.5	2	33.8	6.4	10.2
10-16L	10	15.9	3/4	3/16	8.12	2.62	10-16L	9.7	2	81.5	94.3	104.0
12-16L	12	16.6	3/8	3/16	8.46	2.42	12-16L	11.6	2	75.5	72.1	82.0
15-16L	15	20.9	1/2	3/16	10.62	2.23	15-16L	12.75	2	69.5	50.2	59.3
20-16L	20	21.5	3/8	1/4	10.98	2.48	20-16L	13.1	2	77.4	29.3	37.4
30-16L	30	29.5	1/4	3/16	15.06	1.80	30-16L	17.3	2	56.9	10.7	17.0
30-16LL	30	41.72	1/2	3/16	8.46	4.45	30-16LL	11.6	2	139.0	100.0	118.0
10-18S	10	19.4	3/4	1/4	9.92	3.09	10-18S	12.3	2 1/2	96.3	94.3	104.0
12-18S	12	24.0	3/8	1/4	12.20	2.88	12-18S	14.5	2 1/2	89.7	72.1	82.0
15-18S	15	24.5	1/2	1/4	12.4	2.68	15-18S	14.9	2 1/2	83.5	50.2	59.3
20-18S	20	25.2	3/8	3/16	12.87	2.95	20-18S	15.5	2 1/2	92.0	29.3	37.4
20-18L	20	39.2	3/4	1/4	9.87	6.16	20-18L	12.3	2 1/2	193.0	188.0	208.0
24-18L	24	48.0	3/8	1/4	12.20	5.76	24-18L	14.5	2 1/2	180.0	145.0	163.0
30-18L	30	48.9	1/2	1/4	12.38	5.37	30-18L	14.9	2 1/2	168.0	101.0	119.0
45-18LL	45	73.02	1/2	1/4	12.38	8.03	45-18LL	14.9	2 1/2	250.0	150.0	178.0
10-20S	10	27.0	3/4	1/4	13.78	3.09	10-20S	17.1	2 1/2	96.3	94.3	104.0
12-20S	12	31.3	3/8	1/4	15.93	2.88	12-20S	18.95	2 1/2	89.7	72.1	82.0
15-20S	15	31.9	1/2	1/4	16.25	2.68	15-20S	19.5	2 1/2	83.5	50.2	59.3
20-20S	20	32.2	3/8	3/16	16.42	2.95	20-20S	16.6	2 1/2	92.0	29.3	37.4
20-20L	20	54.0	3/4	1/4	13.78	6.16	20-20L	17.1	2 1/2	193.0	188.0	208.0
24-20L	24	62.6	3/8	1/4	15.93	5.76	24-20L	18.95	2 1/2	180.0	145.0	163.0
30-20L	30	63.8	1/2	1/4	16.25	5.37	30-20L	19.5	2 1/2	168.0	101.0	119.0
45-20LL	45	95.72	1/2	1/4	16.25	8.03	45-20LL	19.5	2 1/2	250.0	150.0	178.0

Fuente: <http://www.graham-mfg.com/heliflow-data-sheets>

Figura 32. Planimetría intercambiador de calor HELIFLOW



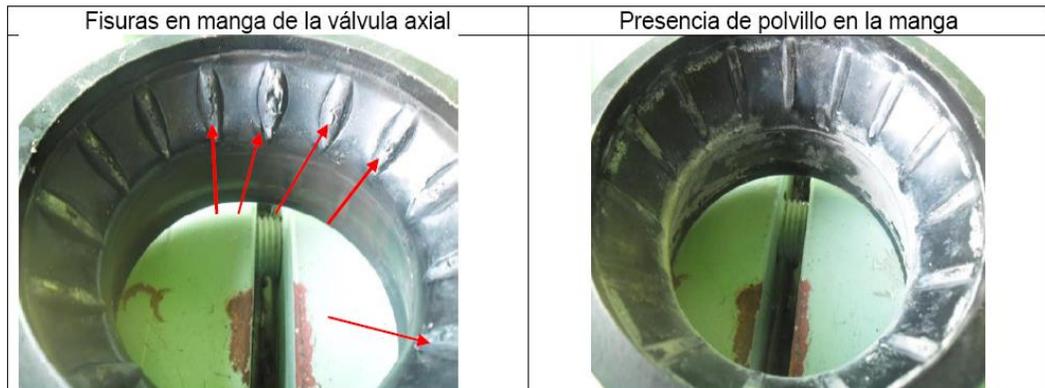
Fuente: <http://www.graham-mfg.com/heliflow-data-sheets>

3.3 ANTECEDENTES

A continuación se resumirán algunos de los antecedentes más importantes:

- El *CITY GATE* la Dorada, lleva en funcionamiento más de 17 años con modificaciones menores para repotenciarlo.
- Tramo Vasconia – Mariquita instalado como gasoducto a finales del año 1995.
- Se han presentado cinco fallas asociadas al sistema de regulación desde el año 2011.
- Las fallas afectan de manera exclusiva las mangas de las válvulas axiales, que funcionan como reguladores de presión y sus respectivos pilotos.
- Una de las fallas consiste en fisuras de las mangas axiales, posiblemente por alto diferencial de presión y presencia de partículas sólidas.
- Inspección y cambio de elementos consumibles de regulación dentro del PDT realizada cada 12 meses.
- Se han presentado eventos similares en el *CITY GATE* de Chiquinquirá del Distrito 3.

Figura 33. Mangas tipo American – Meter



Fuente: fotos Manga American-meter *CITY GATE* la Dorada. Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010.P 3.

- La otra falla consiste en el taponamiento de los pilotos, dando como resultado la inhabilitación de la regulación y activación de las válvulas de corte.
- Se ha identificado que el agente relacionado a las fallas anteriores son partículas de un material amarillento en estado sólido (polvillo).²⁴

²⁴ Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010.P 3.

Figura 34. Canastillas de las mangas de regulación



Fuente: Foto Válvula axial *CITY GATE* la Dorada. Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010.P 3.

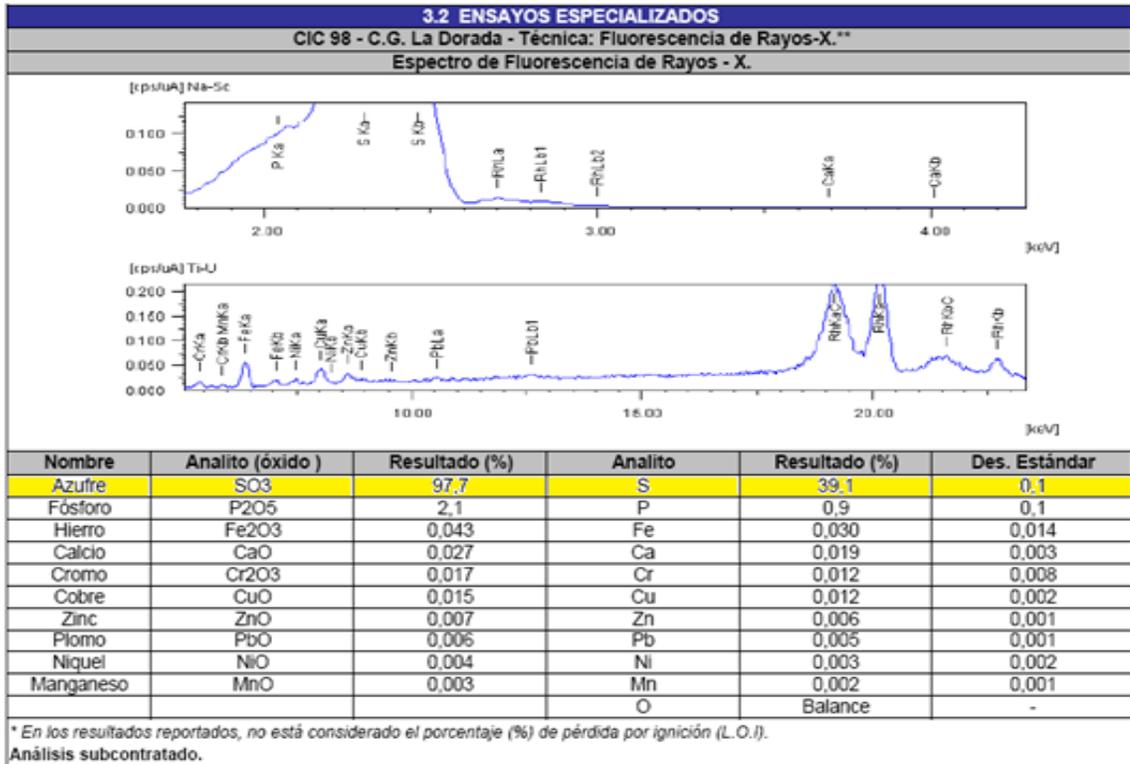
- Se hace un análisis químico para determinar los componentes de dicho polvillo y se identifica que el principal componente es de azufre.

Figura 35. Azufre extraído de las válvulas axiales



Fuente: Foto de la muestra de Azufre encontrado en la manga de la válvula axial. *CITY GATE* la Dorada. Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010.P 3.

Tabla 20. Análisis del polvillo



Fuente: Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010 p 4.

Se evidencia que el 97% corresponde a azufre.

- Se confirma que las temperaturas de entrega, contenido de azufre y H₂S están dentro de los rangos solicitados por el RUT.

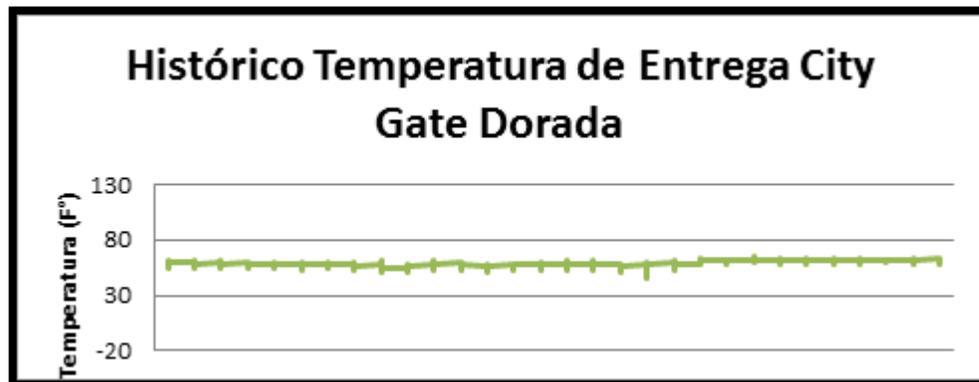
Tabla 21. Rangos RUT

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema inglés
Maximo poder calorifico bruto [CHV]	42,8 MJ/m ³	1,150 BTU/ft ³
Minimo poder calorifico bruto [CHV]	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de liquido	Libre de Liquidos	Libre de Liquidos
Contenido total de H2S máximo	6 mg/m ³	0,25 grano/100PCS
Contenido Total de Azufre máximo	23 mg/m ³	1,0 grano/100PCS
Contenido de CO2 máximo en % de volumen	2%	2%
Contenido de N2 máximo en % de Volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % Volumen	9%	5%
Contenido de oxigeno máximo en % de volomen	0,10%	0,10%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6,0 grano/MPCS
Temperatura de entrega máxima	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7,2°C	45°F
Contenido máximo de polvos y materiales en suspensión	1,6 mg/m ³	100 grano/1000 PC

Fuente: Documento CREG-017 8 de Marzo de 2007 Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte. P 8.

- Se evidencia que la temperatura de entrega del CITY GATE la Dorada se encuentra conforme a solicitud del RUT.

Figura 36. Histórico temperatura de entrega CITY GATE la Dorada



Fuente: histórico de temperatura computador de flujo EAGLE CITY GATE la Dorada.

- Según la tendencia por condición de temperatura, aparentemente se infiere correcto funcionamiento del calentador.

Figura 37. Calentador acuatubular marca Graham



Fuente: Foto calentador Acuatubular *CITY GATE* la Dorada.

- Se presenta la hipótesis de que la formación del azufre sucede por un fenómeno llamado sublimación inversa, que se puede presentar en el gas cuando se induce grandes caídas de presión y se generan bajas temperaturas propicias para su formación.

Tabla 22. Deposición en gas natural

Elemental sulphur deposition in natural gas transmission and distribution networks

Pierre Cézac^a, Jean-Paul Serin^{a,*}, Jean-Michel Reneaume^a,
Jacques Mercadier^a, Gérard Mouton^b

^aLaboratoire de Thermique, Energétique et Procédés, Ecole Nationale Supérieure en Génie des Technologies Industrielle, Université de Pau et des Pays de l'Adour, BP 7511, 64075 Pau Cedex, France

^bTotal Infrastructures Gaz France, Direction Opérations, Services Supports Techniques-Méthodes, 7 rue de la Linère, 64140 Billère, France

Received 25 April 2007; received in revised form 8 November 2007; accepted 9 November 2007

Abstract

Deposition of elemental sulphur in natural gas transmission line systems has been reported on only in recent times. The most common location is immediately downstream of a point of significant pressure reduction. A necessary step to eliminate solid sulphur deposition is to understand the deposit mechanism. Two mechanisms appear possible: condensate formation and desublimation of sulphur vapours. To study the plausible paths of solid sulphur formation, we established a thermodynamic model. The constitutive equations are classically the chemical and physical equilibriums, partial mass balances and energy balance. We chose the Peng Robinson equation of state to describe the phase behaviour. Mixing rules are conventional: quadratic for a and linear for b with one binary interaction coefficient. Desublimation seems to be the most plausible mechanism to explain the solid sulphur formation. Pressure reduction implies temperature reduction, which reinforces solid formation. A solution to minimize the solid sulphur deposition seems to be heating the gas stream immediately before pressure reduction.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Modelling; Solid-gas equilibrium; Natural gas; Sulphur; Pressure drop

the sulphur deposit formation. The higher the pressure drop, the lower the downstream temperature and the higher the sulphur desublimation.

La deposición de sulfuros puede ser ocasionada por la desublimación del gas.

La desublimación depende directamente de la caída de presión y del calentamiento del gas.

Fuente: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844607004378>

- Lo anterior lleva a reducir la frecuencia de los mantenimientos preventivos a 4 meses e inspecciones cada 2 meses.
- Se implementa una etapa de regulación previa en la estación donde se presenta el fenómeno sublimación inversa, utilizando un regulador *Big Joe*.

Figura 38. Regulador *Big Joe*



Fuente:<http://www.appliedcontrolequipment.com/equipment/control-valveregulators/products-control-valveregulators/regulators/pressure-reducing/direct-operated/>

- Aun con lo implementado anteriormente, se confirma la reincidencia de dicha falla por el mismo agente identificado.

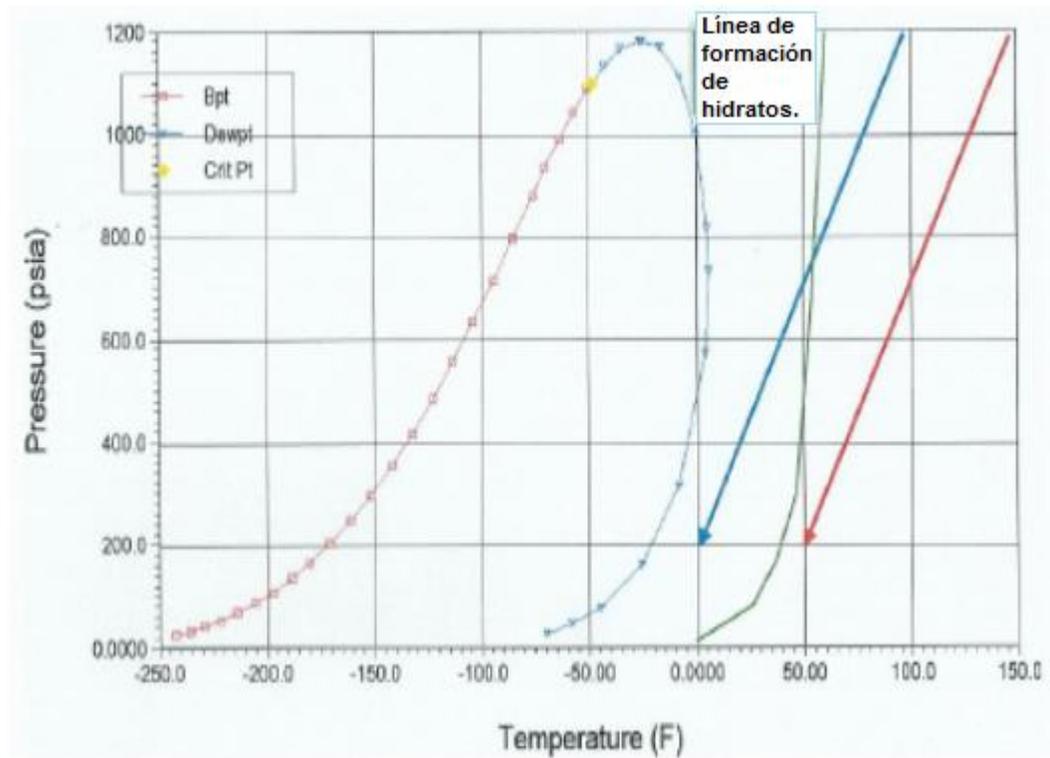
3.4 COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS

De acuerdo a lo investigado, se reafirma la hipótesis de que el fenómeno que afecta al *CITY GATE* tiene que ver con la sublimación inversa del azufre. Para lo cual se resume a continuación el mecanismo y características para su formación:

- El mecanismo para la formación del Azufre no requiere que se presente condensados en el gas.

Hay ausencia de condensado aun si el sistema de calentamiento se encuentra fuera de funcionamiento y según el análisis químico tampoco se observa presencia de hidratos:

Figura 39. Formación de hidratos



Fuente: Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010 P 9

- Para la formación del azufre por sublimación inversa se tiene como referencia que las condiciones propicias son temperaturas por debajo de 25°C, especialmente antes de caídas de presión mayores a 600 psi.

Tabla 23. Influencia del Ácido Sulfúrico, Dióxido de Carbono y compuestos pesados en la formación de azufre.

Influence of the H ₂ S Composition on solid sulphur formation for a typical pressure drop from 5 to 0,5 MPa-gas A/gas F				
Uptream temperature [fixed][k]	Downstream temperature [calculated][K]		Solid sulphur distribution [calculated][mass%]	
	Gas A	Gas F	Gas A	Gas F
280	250	250	99,79	99,78
290	262,4	262,4	97,91	97,88
300	274,4	274,5	83,3	83,25
310	286,3	286,3	0	0
320	298	298	0	0
Influence of the CO ₂ Composition on solid sulphur formation for a typical pressure drop from 5 to 0,5 MPa-gas B/gas E				
Uptream temperature [fixed][k]	Downstream temperature [calculated][K]		Solid sulphur distribution [calculated][mass%]	
	Gas B	Gas E	Gas B	Gas E
280	252,4	249,9	98,93	99,8
290	264,5	262,2	96,97	97,98
300	276,4	274,3	77,4	83,81
310	288	286,2	0	0
320	299,5	297,9	0	0
Influence of the Composition of the heavy compounds on solid sulphur formation for a typical pressure drop from 5 to 0,5 MPa-gas B/gas C				
Uptream temperature [fixed][k]	Downstream temperature [calculated][K]		Solid sulphur distribution [calculated][mass%]	
	Gas B	Gas C	Gas B	Gas C
280	252,4	246,5	98,93	99,9
290	264,5	259,3	96,97	98,79
300	276,4	271,7	77,4	89,27
310	288	283,9	0	24,09
320	299,5	295,8	0	0

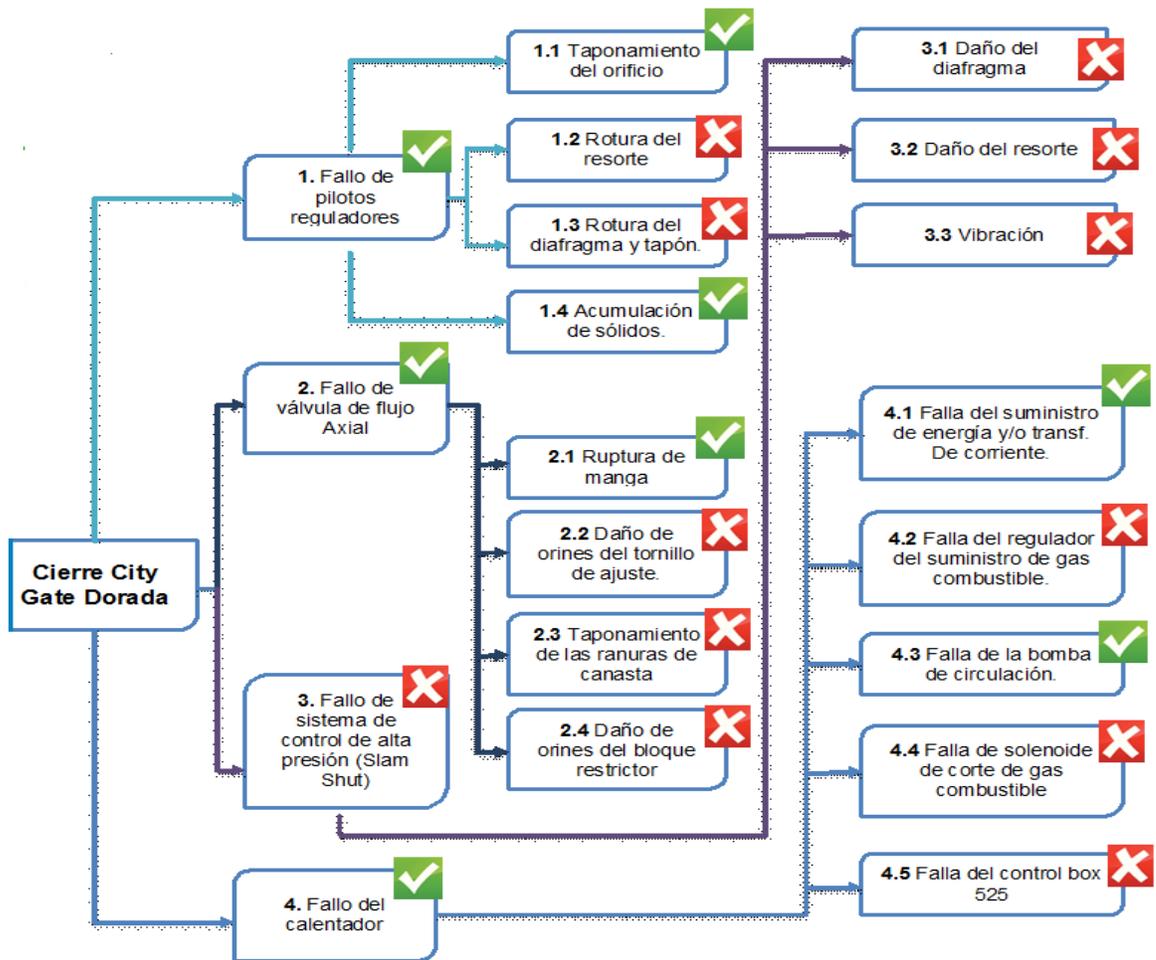
Fuente: Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010. P10.

- Los límites definidos por el RUT para contenidos de azufre libre y H₂S, si las condiciones de sublimación inversa son propicias, se puede tener tasas de formación de azufre solida de aproximadamente 0.0012 mg/Nm³.

Lo anterior es producto de lo consultado con los autores del artículo, *Jean – Paul Serin & Pierre Cézac*.

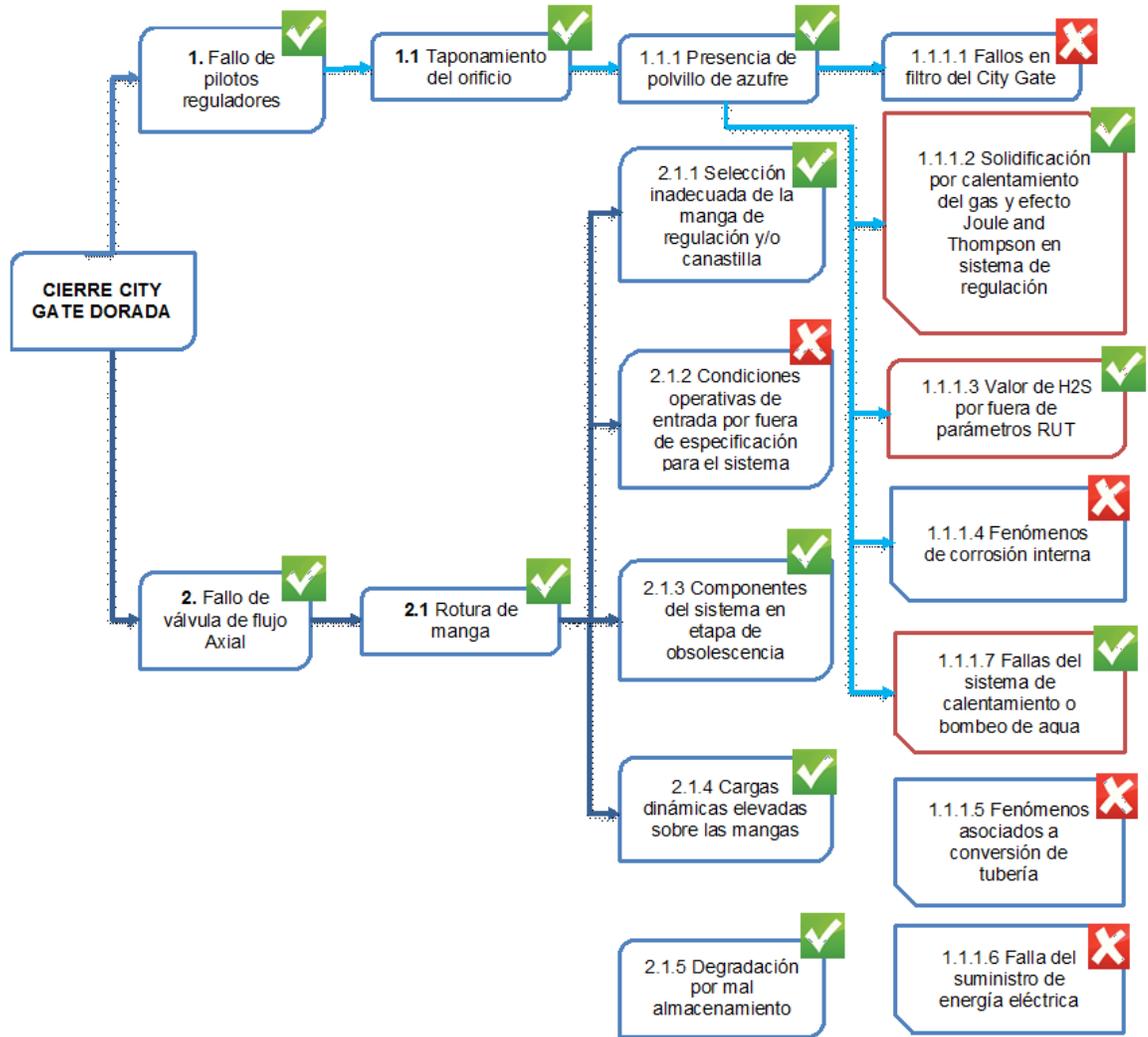
- Por lo tanto, se puede inferir que si se utiliza un mayor número de etapas de regulación se podría limitar la caída de temperatura a bajos valores. Sin embargo, esto podría repercutir en la capacidad de flujo volumétrico y aun dependeríamos de la capacidad y confiabilidad del sistema de calentamiento.²⁵

3.4.1 Mapa de hipótesis Preliminar



²⁵ Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010. P10

3.4.2 Mapa de hipótesis Consolidado.



3.4.3 Validación de hipótesis.

Tabla 24. Validación hipótesis

Hipótesis	Argumentación	validación
1.1.1.1 Fallo en el sistema de filtración	No existe evidencia de polvillo o algún tipo de fallo dentro del filtro Peerless.	Descartado
1.1.1.2 Solidificación por calentamiento del gas y efecto joule and Thompson en el sistema de regulación	Se valida según lo referenciado en el paper Elemental sulphur deposition in natural gas transmission and distribution networks Pierre C´ezac a, Jean-Paul Serin a,*, Jean-Michel Reneaumea, Jacques Mercadier a, G´erard Moutonb	Validado
1.1.1.3 Valor de H ₂ S fuera de parámetros RUT	Se observan valores de H ₂ S dentro del límite permitido por el RUT del gasoducto Cusiana-La Belleza.	Descartado
1.1.1.4 Fenómeno de corrosión interna	Se descarta a través del área de integridad que exista algún proceso de corrosión interna activa que pudiese ocasionar la generación de polvillo de azufre, y los espesores están dentro de parámetros de diseño ASME B31,3.	Descartado
1.1.1.5 Falla del sistema de calentamiento o bombeo de agua	El sistema de calentamiento del CITY GATE LA DORADA que sin presentar un flujo pico, la temperatura a la que se esta calentando el flujo total son bajas. De tal modo que no solo la potencia de calentamiento, si no también la eficiencia de los intercambiadores que puede verse afectada por las condiciones ambientales y bajos flujos.	Validado
1.1.1.6 Fenómenos asociados a conversión de Tubería	No se evidencian fenómenos asociados a conversión de tubería, el gasoducto nació inicialmente como tal no tiene ninguna relación con alguna conversión previa.	Descartado
1.1.1.7 Falla del suministro de energía eléctrica	No existe evidencia de perdida de suministro eléctrico durante el evento de cierre del CITY GATE LA DORADA	Descartado
2.1.1 Selección inadecuada de la manga de regulación y/o canastilla.	Existencia de un efecto erosivo sobre la manga generado por la velocidad del gas y tipo de canastilla.	Validado
2.1.2 Condiciones operativas por fuera de especificación para el sistema.	Los componentes principales del City Gate aparentemente cumplen con las especificaciones operativas del gas que se maneja actualmente.	Descartado
2.1.3 Componentes del sistema en etapa de obsolescencia.	No se cuenta con datos de tiempo de vida esperado por diseño para los componentes del City Gate; sin embargo los CG llevan aproximadamente 17 años en servicio.	Probable
2.1.4 Cargas dinámicas elevadas sobre las mangas.	Existencia de un efecto erosivo sobre la manga generado por la velocidad del gas y tipo de canastilla, teniendo en cuenta el flujo horario y la diferencia de presión, el efecto se acentúa mas en el primer regulador axial del brazo.	Validado
2.1.5 Degradación por mal almacenamiento.	El material Buna-N de las mangas de 2x300 y 2x600 tiene una vida útil de almacenamiento de 2 años. Las mangas tienen una rotación menor a este tiempo.	Descartado

3.4.4 Conclusiones [ACR]. La falla en las mangas de regulación del *CITY GATE* la Dorada se debe a dos factores: Resistencia del material de las mangas y formación de partículas de azufre.

- La resistencia del material de las mangas de regulación es afectada por cargas cíclicas y los diferenciales elevados de presión a los cuales son sometidas. De igual manera se puede ver afectada por la composición del gas, que es rica en componentes pesados, característica del gas producido en Cusiana, lo que ocasiona presencia de elementos sólidos que se pueden condensar por sublimación inversa del azufre, el cual puede generar taponamiento en las mangas de regulación.
- Para minimizar el impacto de las cargas cíclicas sobre las mangas de regulación, se recomienda implementar una etapa adicional de regulación antes del *CITY GATE*, mediante el uso de un regulador *Big Joe*, esta práctica ha resultado exitosa en *CITY GATES* como: Chiquinquirá después de un evento donde las cargas cíclicas influyeron en el cierre súbito de este *CITY GATE*.
- Dentro de los beneficios que ofrece el regulador los *Big Joe* esta la ayuda que produce al reducir la caída de temperatura entre las mangas de regulación, de igual manera puede beneficiar el sistema de calentamiento, manteniendo la potencia requerida, siempre y cuando, el regulador *Big Joe* se implemente aguas arriba del *CITY GATE* para permitir un calentamiento homogéneo del gas, luego de la regulación con dicho dispositivo.
- La presencia de partículas de azufre es un fenómeno ligado a la caída de temperatura y presión, no teniendo relación alguna con la formación de condensados. De igual manera se demuestra la importancia de confiabilidad del sistema de calentamiento y bombeo de agua, si estos sistemas colapsan se generan condiciones propicias para generar azufre y el gas quedaría dentro de la zona de formación de hidratos, lo cual también puede ser perjudicial.

La confiabilidad del sistema de calentamiento queda condicionada a la disponibilidad de energía eléctrica, capacidad de recirculación del agua y eficiencia del intercambiador de calor.²⁶

²⁶ Informe técnico ECI-TGI-1-MEC-DOC-010.P 21.

3.4.5 Plan de acción [ACR].

Tabla 25. Plan de acción *CITY GATE* la Dorada

Plan de acción	Área responsable	Fecha	Estado
1. Incrementar frecuencia de mantenimiento preventivo.	Confiabilidad	jun-13	Ejecutado
2. Redefinir nivel de criticidad para planeacion.	Confiabilidad	jun-13	Ejecutado
3. Realizar limpieza del gasoducto de 12" ramal termodorada.	Integridad	jun-13	Ejecutado
4. Realizar seguimiento mediante muestreo fisico quimico del gas que ingresa al ramal termodorada.	Integridad	jun-13	Ejecutado
5. Realizar analisis costo ciclo de vida para determinar la biabilidad para la instalacion de una etapa adicional de regulacion a la entrada del <i>CITY GATE</i> la Dorada.	Confiabilidad	jun-13	Ejecutado
6. Realizar muestreo de la temperatuta del gas a la entrada del intercambiador de calor y a la silida del sitema de medicion.	Mantenimiento	jun-13	Ejecutado
7. Implementar canastillas al 100% en la primera etapa de regulacion	Mantenimiento	jun-13	Ejecutado
8. Programar reunion con personal de American Meter.	Confiabilidad	jun-13	Ejecutado

4. VALORACIÓN COSTO-RIESGO-BENEFICIO

El Enfoque Costo-riesgo-beneficio pretende preservar la función de los equipos a partir de estrategias de mantenimiento que permitan minimizar el riesgo que genera los modos de falla dentro del entorno operativo con el fin de maximizar la rentabilidad del negocio.

Tabla 26. Costos unitarios.

Costos Generales		
Concepto	Unidad	Valor
Repuestos e insumos mantenimiento	COL\$	\$ 1.200.000,00
Costos alquiler camioneta	COL\$/Hora	\$ 50.000,00
Gasolina	COL\$/Hora	\$ 25.000,00
Costo peajes	COL\$/Hora	\$ 6.500,00
Salario promedio mecánico-instrumentista	COL\$/Hora	\$ 30.000,00
TRM 06/05/2013	COL\$	\$ 1.850,00
Costo Kpc	USD	\$ 5,00
Costo lucro cesante	USD	\$ 255,00
Penalización	USD	\$ 500,00

Tabla 27. Recursos utilizados.

Tiempos y Cantidad de recursos utilizados en la emergencia		
Concepto	Unidad	Cantidad
Transporte desde la base	Horas	3
Numero de peajes	Unidad	2
Personal requerido	Unidad	2
Tiempo requerido por mantenimiento	Horas	1,5
Lucro cesante	Horas	3
Flujo CG La DORADA	Kpc/Hora	17

4.1 CIERRE CITY GATE LA DORADA. Situación actual.

- **Evento:** Daño en las mangas de regulación.

Tabla 28. Situación actual

1.Frecuencia de fallos		2	Fallos/Años
2.Costos mano de obra	\$	270.000,00	COL\$
3.Costos de materiales	\$	2.400.000,00	COL\$
4. Costos anuales para reparar	\$	5.340.000,00	COL\$/Año
5.Tiempo de reparacion		3	Horas
6.impacto produccion	\$	471.750,00	COL\$/Año
7.Penalizacion del evento	\$	1.415.250,00	COL\$
8.Penalizacion anual por fallos	\$	2.830.500,00	COL\$/Año
9.Riesgo total anualizado	\$	8.170.500,00	COL\$/Año

4.2 CIERRE CITY GATE LA DORADA. Situación Futura.

- **Solución propuesta:** Aumento frecuencia inspección.
- **Evento:** Daño en las mangas de regulación.

Tabla 29. Situación futura

1.Frecuencia de fallos		1	Fallos/Años
2.Costos mano de obra	\$	1.080.000,00	COL\$
3.Costos de materiales	\$	4.800.000,00	COL\$
4. Costos anuales para reparar	\$	5.880.000,00	COL\$/Año
5.Tiempo de reparacion		1,5	Horas
6.impacto produccion	\$	235.875,00	COL\$/Año
7.Penalizacion del evento	\$	353.812,50	COL\$
8.Penalizacion anual por fallos	\$	353.812,50	COL\$/Año
9.Riesgo total anualizado	\$	6.233.812,50	COL\$/Año

4.3 CITY GATE LA DORADA.

Análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB).

Tabla 30. Evaluación costo – riesgo - beneficio

Situacion Actual		
Costos anuales para reparar	\$ 5.340.000,00	COL\$/Año
Penalización anual por fallos	\$ 2.830.500,00	COL\$/Año
Riesgo total anualizado	\$ 8.170.500,00	COL\$/Año
Situacion Futura		
Costos anuales para reparar	\$ 5.880.000,00	COL\$/Año
Penalización anual por fallos	\$ 353.812,50	COL\$/Año
Riesgo total anualizado	\$ 6.233.812,50	COL\$/Año
Beneficio de implementar el cambio		
Costos anuales para reparar	\$ 540.000,00	COL\$/Año
Penalización anual por fallos	\$ 2.476.687,50	COL\$/Año
Beneficios totales	\$ 3.016.687,50	COL\$/Año

Mediante el análisis costo-riesgo-beneficio se evalúa la condición actual que presenta el *CITY GATE* la Dorada donde la frecuencia de mantenimiento está estipulada en un (1)/ Año Vs el incremento de las frecuencias a Cuatro (4)/Años.

Observamos que los beneficios esperados por año tendrán el siguiente comportamiento, costos anuales para reparar disminuyen en un 10% siendo estos, los menos significativos debido al aumento de las frecuencias de mantenimiento.

Con respecto a la penalización anual por fallos; vemos una disminución en un 88% lo que indica que es el factor determinante para el incremento en la frecuencia de mantenimiento disminuyendo los costos por penalización, todo esto nos lleva a tener un beneficio total de un 37%.

A pesar que el costo anual del mantenimiento preventivo aumenta, resulta beneficioso incrementar las frecuencias de inspección preventiva sobre las mangas de regulación a cada tres (3) meses dentro del módulo de mantenimiento en el sistema integrado de gestión, según análisis Costo-Riesgo-Beneficio.²⁷

²⁷ Nota del autor.

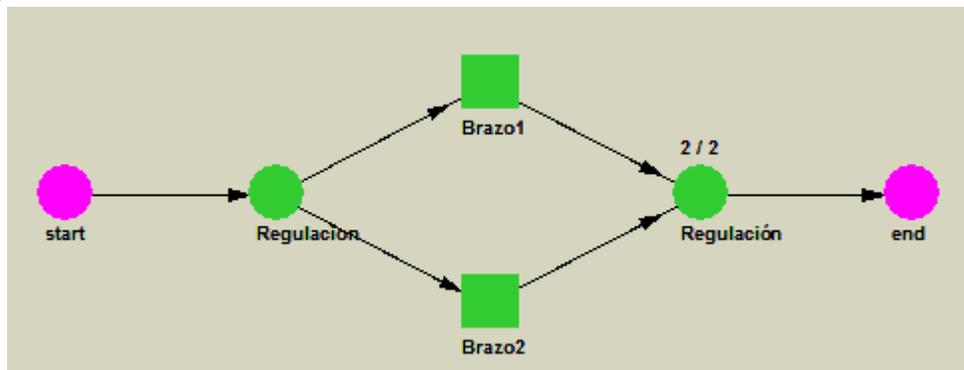
5. ANÁLISIS COSTO CICLO DE VIDA (ACCV)

Mediante la herramienta software Raptor 6 se modela la situación actual y futura con el fin de comparar la incidencia de fallos en un periodo de 5 años, con el fin de demostrar que con la instalación de una etapa de regulación adicional, se puede disminuir los costos asociados a penalidades por incumplimiento en el servicio de transporte, a raíz del cierre del *CITY GATE* la Dorada por daño en las mangas de regulación.

5.1 SITUACIÓN ACTUAL

- PROB. PROMEDIO FALLA:
2 Fallas/Año
- LUCRO CESANTE (COL \$):
Estimado en \$ 1.480.000.
- COSTOS DIRECTOS (COL \$):
Estimado en \$ 2.830.500.
- RIESGO ECONÓMICO POTENCIAL [FRECUENCIA X CONSECUENCIA]
(COL \$/AÑO): \$ 8.170.000.

Figura 40. Diagrama de bloques estado actual sistema regulación *CITY GATE* La Dorada



Fuente: Software Raptor 7.

En el diagrama de flujo se observa el modelo de la situación actual del *CITY GATE* la Dorada, donde se visualizan dos etapas de regulación en configuración tipo Z, una (1) a la entrada del sistema y la segunda (2) a la salida del sistema, también se visualizan dos (2) brazos de medición en paralelo.²⁸

Figura 41. Resultados Simulación probabilidad media (2 fallas/año)

Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Availability	0.997696279	0.998794375	0.999481062	0.000397076
MTBDE	2184.954852	4668.616176	8755.445623	1506.679432
MDT	3.788242	5.115190	7.609693	0.679525
MTBM	2184.954852	4668.616176	8755.445623	1506.679432
MRT	1.788242	3.115190	5.609693	0.679525
GreenPercent	99.769628	99.879438	99.948106	0.039708
YellowPercent	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
RedPercent	0.051894	0.120562	0.230372	0.039708
System Failures	5	10.360000	20	3.325810

PROB. MEDIA 10 FALLAS EN 5 AÑOS

Fuente: Software Raptor 7.

La simulación muestra que la probabilidad media es de diez (10) fallos, en cinco (5) años con un tiempo medio entre fallos de 4669 horas.

El mínimo de fallos esperado es de cinco (5) fallos, en un periodo de cinco (5) años, con un mínimo de tiempo medio entre fallos de 2185 horas.

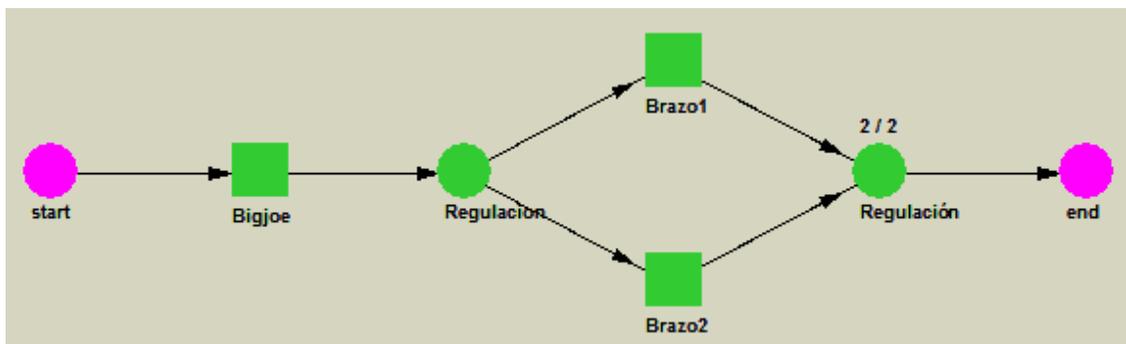
El máximo de fallos sería de veinte (20) fallos, en un periodo de cinco (5) años con un máximo de tiempo medio entre fallos de 8755 horas.

²⁸ Nota del autor

5.2 SITUACIÓN INSTALACIÓN *BIG JOE*

- PROB. PROMEDIO FALLA: 1 Fallas/Año
- LUCRO CESANTE (COL \$):
Estimado en \$ 1.415.250.
- COSTOS DIRECTOS (COL \$):
Estimado en \$ 2.830.500.
- RIESGO ECONÓMICO POTENCIAL [FRECUENCIA X CONSECUENCIA]
(COL \$/AÑO): \$ 4.255.000.

Figura 42. Diagrama de bloques con etapa adicional de regulación (*Big Joe*) sistema regulación *CITY GATE* La Dorada



Fuente: Software Raptor 7.

En el diagrama de flujo se observa un bloque adicional que representa la etapa adicional de regulación con *BIG JOE*, también se visualizan dos etapas de regulación en configuración tipo Z, una (1) a la entrada del sistema y la segunda (2) a la salida del sistema; también se visualizan dos (2) brazos de medición en paralelo.

Tabla 31. Resultados Simulación probabilidad media (1 fallas/año)

Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Availability	0.998867092	0.999443865	0.999896579	0.000246408
MTBDE	3646.238603	9354.551291	43795.470172	5209.965334
MDT	2.391233	4.285722	7.311949	0.876380
MTBM	3646.238603	9354.551291	43795.470172	5209.965334
MRT	1.191233	2.921434	5.811949	0.846881
GreenPercent	99.886709	99.944387	99.989658	0.024641
YellowPercent	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
RedPercent	0.010342	0.055613	0.113291	0.024641
System Failures	1	5.690000	12	2.372805

PROB. MEDIA 5 FALLAS EN 5 AÑOS

Fuente: Software Raptor 7.

La simulación muestra que la probabilidad media es de seis (6) fallos, en cinco (5) años con un tiempo medio entre fallos de 4669 horas

El mínimo de fallos esperado es de uno (1) fallo, en un periodo de cinco (5) años con un mínimo de tiempo medio entre fallos de 3646 horas.

El máximo de fallos seria de doce (12) fallos, en un periodo de cinco (5) años con un máximo de tiempo medio entre fallos de 43795 horas.

Tabla 32. Alternativa (A) [ACCV]

Alternativa A 'Situación Actual'	Total años (n) =		5
	interes (i) =		12%
	Tipos de Costos	Valor (COL\$)	Valor Presente
	Costos iniciales Adquisición	\$ -	\$ -
	O&M	\$ 2.670.000,00	\$ 9.624.752,46
	Costos baja Fiabilidad	\$ 5.340.000,00	\$ 19.249.504,92
	Elementos Consumibles	\$ 2.400.000,00	\$ 8.651.462,89
	Total de Costos en Valor Presente		\$ 37.525.720,27
	Costo Anual equivalente total		\$ 10.410.000,00
	% costos de Fiabilidad		51%

En el desarrollo de la tabla 32, se emplean los valores discriminados en la descripción de la situación actual donde los costos estimados por penalidad impactan en el desarrollo de la operación de transporte de gas, por la suspensión del servicio. Para *CITY GATE'S* las frecuencias de mantenimiento estaban estipuladas en un (1)/año donde se cargan costos de elementos consumibles.

En la tabla 32 se presenta los costos actuales, Donde la fiabilidad representa el 51% del total de los costos en valor presente, los costos por operación y mantenimiento representan el 26% del total de los costos en valor presente y los elementos consumibles el 23 % del total de los costos en valor presente.

El costo anual equivalente represente el valor de todos los costos esperados para un costo de ciclo de vida de cinco (5) años y una tasa de descuento del 12%.

El total de costos en valor presente representa todos los costos esperados en un ciclo de vida de cinco (5) años y una tasa de descuentos de 12%.

Tabla 33. Alternativa (B) [ACCV]

Alternativa B 'Regulación con BigJoe'	Total años (n) =		5
	interes (i) =		12%
	Tipos de Costos	Valor (COL\$)	Valor Presente
	Costos iniciales Adquisición	\$ 7.400.000,00	\$ 7.400.000,00
	O&M	\$ 1.335.000,00	\$ 4.812.376,23
	Costos baja Fiabilidad	\$ 2.670.000,00	\$ 9.624.752,46
	Elementos Consumibles	\$ 1.200.000,00	\$ 4.325.731,44
	Total de Costos en Valor Presente		\$ 26.162.860,13
	Costo Anual equivalente total		\$ 7.257.832,02
	% costos de Fiabilidad		37%

En la tabla 33 se presenta los costos estimados que se logran con la instalación de una etapa de regulación adicional, donde la inversión inicial representa el 28% del total de los costos en valor presente.

La fiabilidad representa el 37% del total de los costos en valor presente, los costos por operación y mantenimiento representan el 18% del total de los costos en valor presente y los elementos consumibles el 17% del total de los costos en valor presente.

Se evidencia una disminución considerable en los costos por baja fiabilidad lo que valida la instalación de una etapa adicional de regulación con *BIG JOE*.²⁹

²⁹ Nota del autor.

6. CONCLUSIONES

- Mediante la utilización de la metodología análisis causa raíz (ACR) se encuentra como origen del cierre del *CITY GATE* la Dorada, en primera instancia la sobrecarga cíclica producto del diferencial de presión a la entrada de la primera etapa de regulación, en segunda instancia los depósitos de sulfuros producidos por el fenómeno de desublimación del gas, producto de la caída de presión y del calentamiento deficiente del gas, producen taponamiento de los pilotos del sistema.
- Se identifica el aumento de la frecuencia de mantenimiento como una solución efectiva y mediante el análisis costo-riesgo-beneficio se determina la disminución de los costos, por baja fiabilidad y el aumento de la disponibilidad del sistema de regulación del *CITY GATE* la Dorada.
- Se utiliza el análisis costo ciclo de vida para Comparar el estado actual del sistema y la implementación de una etapa adicional de regulación con *BIG JOE*, el estudio se evalúa en función de los costos por fiabilidad donde se evidencia una disminución en un 14%.
- La instalación del dispositivo de regulación permite disminuir el diferencial de presión en las mangas, incrementando su vida útil y disminuye la probabilidad de aparición de polvillo de azufre.
- El aumento en la frecuencia de mantenimiento permite hacer seguimiento a la solución implementada, esto con el fin de replicar la facilidad en las demás estaciones del gasoducto Vasconia-Mariquita.

7. RECOMENDACIONES

- Es conveniente evaluar la confiabilidad del sistema de calentamiento, dado que está condicionada a la disponibilidad de energía eléctrica, una solución en las estaciones no asistidas sin suministro eléctrico comercial es la ampliación en la potencia instalada del sistema fotovoltaico que soporta la estación.
- Con la instalación de la etapa adicional de regulación con *BIG JOE* se mitiga la formación de partículas de azufre. Para atacar la otra condición que propicia la formación de sulfuros; resulta ventajoso ajustar la capacidad de recirculación de agua y la eficiencia de los intercambiadores de calor, dado que las temperaturas promedio del gas son pobres.
- Se requiere valorar el uso de calentadores de gas para pilotos, con el fin de evitar el uso de suministro eléctrico; dado que la calidad del servicio en algunas zonas fluctúa, situación que no permite entregar una potencia de calentamiento homogénea.

BIBLIOGRAFIA

APPLIED CONTROL. Direct Operated Regulators, Fisher. Sitio web: <http://www.appliedcontrolequipment.com/equipment/control-valveregulators/products-control-valveregulators/regulators/pressure-reducing/direct-operated/>

CÉZAC, Pierre. SERIN, Jean-Paul. Article: Elemental sulphur deposition in natural gas transmission and distribution networks.2007. Sitio web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844607004378>

CREG-017. Documento. Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte. 8 de Marzo de 2007. 8 p.

DE DIETRICH. Katalog produktów. Domomatic. Sitio web: www.dedietrich.pl/content/.../KTx%2050-84.pdf

ECI-TGI-1-MEC-DOC-008 – 010. Informe técnico. 2014. p 1 -21.

GONZALEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. Cuarta edición. Fundación Confemetal. Madrid 2012. Capitulo cuatro, Técnicas organizativas del mantenimiento avanzado, P 94 – 108.

GRAHAM. Engineering answers, Heliflow. Sitio web: <http://www.graham-mfg.com/heliflow-data-sheets>

MEDARDO YÁÑEZ, José L. GÓMEZ DE LA VEGA, Hernando. “Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”. Reliability and Risk Management S.A. P 1-15. Internet: <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Estaciones de carga y descarga de gas natural comprimido. NTC 5897. Bogotá, 2011. 16 p

PARRA MARQUEZ, Carlos Alberto. Asesoría Integral en Ingeniería de Confiabilidad. Bucaramanga, 2011. P 35 – 36.

PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Sevilla: Ingeman, 2012. P.79-113.

PARRA, Carlos. Memorias seminario Riesgo, LCC y Confiabilidad. Bucaramanga. 2011. Sitio web: www.confabilidadoperacional.com

RAPTOR. [En línea]. Sitio Web: <http://www.reliability-safety-software.com/product/product-raptor.htm>

WOODHOUSEN, John, “Managing Industrial Risk”, Chapman and Hall, Oxford, UK, 1993.