



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**“EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ UTILIZADO COMO  
HERRAMIENTA EN LA EVALUACIÓN DE EVENTOS NO  
DESEADOS EN INSTALACIONES DE UNA REFINERÍA”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

**MARYCRUZ ALFARO ANTOR**

**GILBERTO ARANDA DOMÍNGUEZ**

DIRECTOR:

**I.Q RENÉ DE LA MORA MEDINA**

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2014



## **DEDICATORIAS**

### ***Marycruz Alfaro Antor:***

*Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis metas.*

*Con todo mi amor y cariño a mis padres Sr. Jorge Alfaro y Sra. Flora Antor, que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y por todo su apoyo y amor brindado en el transcurso de este camino, pilares en mi formación como persona. ¡Gracias!*

*A mi hermana Georgina a la cual quiero mucho, por la unión que siempre ha imperado y porque en los momentos difíciles estuvo a mi lado, pero también en los momentos de alegrías.*

*A mis abuelos Sr. Asunción Antor y tSra. Esperanza Hernández, gracias a su sabiduría influyeron en mi la madurez para lograr los objetivos en la vida.*

*Por tu paciencia, comprensión y amor, que me inspiraste a ser mejor, a mi novio Gilberto Aranda.*

## ***Gilberto Aranda Domínguez:***

*Gracias dios por permitir vivir este momento. Con dedicación especial a mis padres Sr. Gilberto Aranda y Sra. Sara Domínguez porque de ellos me inspiro para seguir adelante, por todo el apoyo que me han brindado en todos estos años, este es un logro de ustedes y no me queda más que decir que los admiro y los amo, muchas gracias por todo su esfuerzo.*

*A mis hermanos Rosalba, Verónica y Daniel, este logro se los dedico porque siempre pienso en ustedes los quiero.*

*A la persona que me ha acompañado estos últimos años, porque me motivas para seguir adelante y a no rendirme para mi novia Marycruz Alfaro te amo.*

*A la familia Alfaro Antor por darme la confianza y el apoyo para lograr esta meta muchas gracias I.Q Jorge Alberto Alfaro, I.Q Flora Antor y Georgina Alfaro.*

*A mis sobrinos Diego, Mario y Lucero, espero verlos cumpliendo sus sueños al igual que yo lo estoy haciendo.*

*También dedico este trabajo a mis cuñados René y Violeta, a mi primo Jorge y mi familia en general gracias por su apoyo.*

*Finalmente quiero dedicárselo a todas esas personas que ya no están conmigo pero siempre los llevo en mi corazón en especial para ti Mario Andrés (†) donde quiera que estés.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Primeramente agradecer a la vida por darnos la valiosa oportunidad de pertenecer a la carrera de Ingeniería Química. También a nuestra máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad De Estudios Superiores Zaragoza por formar parte de ellas.*

*Agradecemos sinceramente a los honorables miembros del jurado:*

*I.Q Gonzalo Rafael Coello García*

*I.Q Arturo Enrique Méndez Gutiérrez*

*M. en C. Ana Lilia Maldonado Arellano*

*I.Q Delfino Galicia Ramírez*

*Por la revisión y comentarios realizados para el término de este trabajo.*

*En especial agradecimiento al I.Q René de la Mora Medina por su apoyo y conocimientos aportados en nuestro desarrollo profesional y durante la elaboración de este trabajo, además de brindarnos su excelente amistad.*

*Finalmente agradecemos a todas aquellas personas que nos apoyaron a lo largo de nuestro crecimiento personal y profesional y que de alguna manera ayudaron en la culminación de este trabajo muchas gracias.*

## CONTENIDO

ÍNDICE.....	I
RESUMEN.....	III
OBJETIVOS.....	V
INTRODUCCIÓN.....	VI
<b>CAPÍTULO I GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
I.1. ANTECEDENTES.....	2
I.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIÓN DE LOS PROCESOS QUE CONSTITUYEN UNA REFINERÍA.....	3
I.2.1. <i>CÓMO FUNCIONA UNA REFINERÍA.....</i>	<i>5</i>
I.3. PELIGROS Y RIESGOS POTENCIALES EN INSTALACIONES DE UNA REFINERÍA.....	14
I.4. PRINCIPIOS GENERALES DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR).....	17
I.5. PRINCIPAL USO DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DENTRO DE UNA REFINERÍA.....	18
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
II.1. ¿QUÉ ES EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ?.....	21
II.2. EL ACR COMO HERRAMIENTA DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	22
II.2.1. <i>EL ENFOQUE Y LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ACR.....</i>	<i>24</i>
II.3. CONCEPTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR).....	26
II.4. CATEGORIAS DE LAS CAUSAS RAÍZ.....	28
II.5 DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS.....	29
II.5.1. <i>TEORÍA DE FALLAS.....</i>	<i>29</i>
II.5.1.1. <i>PROGRAMA DE DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS.....</i>	<i>30</i>
II.5.2. <i>ACR MÉTODO CUALITATIVO PARA EL ANÁLISIS DE FALLAS.....</i>	<i>30</i>
II.5.3 <i>TIPOS DE FALLAS.....</i>	<i>31</i>
II.6. ACCIDENTES E INCIDENTES.....	33
II.6.1. <i>INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE ACCIDENTES E INCIDENTES.....</i>	<i>33</i>
II.6.2. <i>ELEMENTOS DE LOS ACCIDENTES E INCIDENTES.....</i>	<i>34</i>
II.6.3. <i>CAUSAS DE LOS ACCIDENTES E INCIDENTES.....</i>	<i>34</i>
II.6.4 <i>DINÁMICA DE UN ACCIDENTE.....</i>	<i>36</i>
II.7. IMPORTANCIA E IMPACTO LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL ACR.....	37
<b>CAPÍTULO III HERRAMIENTAS DE AYUDA PARA EL DESARROLLO DEL ACR .....</b>	<b>40</b>
III.1. INTRODUCCIÓN A LAS HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DEL ACR.....	41
III.2. ANÁLISIS DE ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS.....	41
III.2.1 <i>METODOLOGÍA DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS (ÁRBOL DE FALLA).....</i>	<i>42</i>
III.2.2. <i>DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS.....</i>	<i>44</i>
III.3. ÁRBOL DE OMISIONES Y RIESGO ADMINISTRATIVOS (MORT).....	46
III.3.1 <i>ENFOQUE GENERAL DEL MORT.....</i>	<i>46</i>
III.3.2. <i>ESTRUCTURA MORT.....</i>	<i>48</i>
III.4. HERRAMIENTA KEPNER-TREGOE PARA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y TOMA DE DECISIONES.....	50
III.4.1. <i>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA EN LA HERRAMIENTA KEPNER-TREGOE.....</i>	<i>52</i>
III.4.1.1. <i>DESCRIBIR EL PROBLEMA.....</i>	<i>52</i>
III.4.1.2 <i>DETERMINAR LAS CAUSAS POSIBLES.....</i>	<i>53</i>
III.5. “5” PORQUÉS PARA RESOLVER PROBLEMAS.....	53
III.5.1. <i>CÓMO UTILIZAR LOS 5 PORQUÉS.....</i>	<i>54</i>



III.5.2 EL DOMINIO DE LOS 5 PORQUÉS .....	55
III.6. DIAGRAMA DE ISHIKAWA O “ESPINA DE PESCADO” .....	56
III.6.1 CREACIÓN DEL DIAGRAMA ISHIKAWA “ESPINA DE PESCADO” .....	58
III.7. ANÁLISIS DE EVENTOS Y FACTORES CAUSALES .....	59
III.7.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA .....	60
III.7.2 CRITERIOS PARA LA DESCRIPCIÓN DE EVENTOS Y CONDICIONES .....	61
III.7.3. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA .....	62
III.8. ANÁLISIS DE BARRERAS.....	63
III.8.1 CONSTRUCCIÓN DE UNA HOJA DE TRABAJO PARA EL ANÁLISIS DE BARRERAS .....	65
III.8.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BARRERAS.....	66
III.9. ANÁLISIS CAUSA-EFECTO.....	66
III.10. RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE USO EN EL ACR ...	68
<b>CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR) .....</b>	<b>70</b>
IV.1. CRITERIOS PARA INICIAR UN ACR .....	71
IV.2. CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO .....	72
IV.3. PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA ACR .....	74
IV.3.1. IDENTIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL EVENTO (FASE I).....	75
IV.3.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL EVENTO A INVESTIGAR.....	76
IV.3.1.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	76
IV.3.2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL EVENTO (FASE II).....	78
IV.3.3. DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS (FASE III) .....	80
IV.3.4. COMUNICACIÓN DE RESULTADOS (FASE IV).....	81
IV.3.5 IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO (FASE V).....	81
<b>CAPÍTULO V APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR.....</b>	<b>83</b>
V.1 CASO DE ANÁLISIS A BOMBA DE FONDOS DE LA TORRE FRACCIONADORA (GA-111A/B/C) UBICADA EN LA PLANTA DE ALQUILACIÓN .....	84
V.1.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA DONDE SE ENCUENTRA EL EVENTO.....	84
V.2. UBICACIÓN DEL EVENTO NO DESEADO EN LA PLANTA DE ALQUILACIÓN.....	89
V.3. EQUIPO DE TRABAJO.....	90
V.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR.....	91
V.4.1. FASE I RECOPIANDO E IDENTIFICANDO INFORMACIÓN DEL SUCESO QUE ORIGINÓ LA FUGA Y EL INCENDIO .....	91
V.5. FASE II EVALUACIÓN Y ANÁLISIS MEDIANTE LA HERRAMIENTA DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS .....	93
V.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA.....	93
V.6. FASE III TOMA DE DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS DEL EVENTO .....	99
V.7. FASE IV COMUNICACIÓN DE RESULTADOS .....	100
V.8. FASE V CONTROL, SEGUIMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS ACCIONES TOMADAS .....	101
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>102</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS.....</b>	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>109</b>



## RESUMEN

La finalidad del trabajo de esta tesis es dar a conocer la metodología del Análisis Causa Raíz (ACR) utilizada comúnmente en la evaluación de eventualidades que causan problemas en instalaciones de tipo industrial, en este caso una refinería, ya que por sus componentes, tipos de insumos que maneja así como los productos que en ella se generan, siempre existirán riesgos de cualquier índole.

El ACR se enfoca en la resolución de problemas a través de la identificación y corrección de las causas raíz de los eventos, en lugar de tratar los síntomas que surjan de un problema. Al concentrarse en la corrección de la causa raíz, se previene la repetición del evento.

Existen varias medidas efectivas (métodos) que abordan las causas raíz de un problema, por lo tanto ACR es un proceso reiterativo y una herramienta para la mejora continua. Esta metodología es usada normalmente en forma reactiva para identificar la causa de un evento, para revelar problemas y resolverlos, el análisis se realiza después de ocurrido el evento.

Con un buen entendimiento de los ACR, permite que la metodología sea preventiva y a la vez permite pronosticar eventos probables antes de que sucedan. El análisis de causa raíz no es una metodología simple y definida; hay muchas herramientas, procesos y filosofías a la hora de realizar un ACR.

Sin embargo, existen varios abordajes de amplia definición o corrientes que pueden identificarse por su tratamiento sencillo o su campo de origen: basados en la seguridad, basados en la producción, basados en los procesos, basados en las fallas, y basados en los sistemas.

El presente trabajo se ha integrado de la siguiente forma con el fin de incluir todos los elementos necesarios que conforman el desarrollo de un ACR y la interpretación del mismo.

**Capítulo I-** En este capítulo veremos de una forma general aspectos básicos en cuanto a elementos que conforman una refinería y también principios en los cuales se basa el análisis causa raíz.

**Capítulo II-** Se mostrara un panorama conceptual y definiciones las cuales se ven involucradas para el desarrollo del ACR. Estos conceptos dan referencia a elementos dentro de la misma metodología dando una visión mucho más amplio para ir abordando y así poder entrar de lleno a entender el ACR.

**Capítulo III-** Se explicarán a manera de resumen cada una de las herramientas empleadas para el desarrollo del ACR, describiendo cada una de éstas y el procedimiento a seguir para poder comprender su uso.



**Capítulo IV-** Se tratarán criterios para el desarrollo del ACR, para lo cual se ha dividido la metodología a seguir por fases, las cuales van desde la identificación del evento, conformación de un equipo de trabajo, recopilación de información hasta la implementación, etapas esenciales en la puesta en marcha de una investigación de ACR.

**Capítulo V-** Finalmente a manera de ejemplo se describirá la aplicación práctica del ACR a un problema dado empleando una de las herramientas descritas en el Capítulo IV, desarrollando y estructurando dicho procedimiento con la finalidad de cumplir con los objetivos que quedaron planteados al comienzo de este trabajo.

## OBJETIVOS

### I. General.

- ❖ Describir la Metodología del Análisis Causa Raíz (ACR) como herramienta estratégica en la evaluación de eventos no deseados.

### II. Específicos.

- Presentar un marco teórico de la evaluación de riesgos mediante el uso del ACR.
- Definir que es la técnica del Análisis Causa Raíz (ACR).
- Presentar las diferentes herramientas utilizadas para llevar a cabo el desarrollo del ACR.
- Exponer un caso de estudio que muestre la aplicación de la metodología ACR.



## INTRODUCCIÓN

Un evento no deseado está definido, como; cualquier anomalía que cause una desviación de los planes de producción, afectando las instalaciones industriales. Debido a la importancia de investigar y reportar eventos no deseados radica en el hecho de que, aun cuando no se haya producido una pérdida, esta ocurrencia indica que existen desviaciones y por consiguiente hay que llevar a cabo las acciones que sean necesarias para evitar la generación de pérdidas.

Ya que en el país existen plantas de refinación y debido a la naturaleza de los productos y equipos que se manejan en cada una de ellas, las necesidades propias de la operación y las condiciones extremas en las que se trabajan, los incidentes que suceden pueden provocar la pérdida de vidas, daños cuantiosos a la propiedad y/o impactos ambientales considerables.

Paralelamente la tecnología en seguridad de procesos e industria en general también ha ido aumentando, pero factores imponderables propios del ser humano o de la naturaleza pueden hacer que se generen eventos no deseados (fallas, incidentes o accidentes), razón por la cual se han diseñado técnicas de análisis de accidentes que permitan someter a control los diferentes procesos productivos. De ahí que el análisis causa raíz (ACR) se debe tomar en cuenta como un elemento de ayuda para cualquier profesional de ingeniería química.

Cuando sucede un evento significativo, se debe realizar un ACR detallado para entender los factores causales específicos y sistémicos y estar en posibilidad de minimizar la posibilidad de reincidencia de eventos similares. La metodología del ACR, es una respuesta adecuada y conforme al concepto de control de pérdidas, es necesario tener presente todos aquellos eventos y sucesos que ocasionan pérdidas. En vista de las posibles consecuencias de los incidentes de alto perfil en la industria del petróleo se ve afectada tanto en el ámbito público como en el ámbito comercial. Este hecho obliga a que el ACR se realice de manera sistémica y objetiva, empleando las mejores herramientas.

Los incidentes de alto perfil tienden a involucrar múltiples eventos, decisiones y circunstancias interrelacionados que se pueden señalar como posibles causas a diferentes niveles y que por ende complican el proceso ACR. Por lo general, el desglose detallado de un accidente revela varias categorías causales que se enfoca en la identificación de raíces físicas, humanas y latentes que indujeron al problema real.

Además de que el Análisis Causa Raíz (ACR) es una metodología de confiabilidad operacional que emplea un conjunto de técnicas o procesos, para identificar factores casuales de falla. Es decir, el origen de un problema definido, relacionado con el personal, los procesos, las tecnologías, y la organización, con el objetivo de identificar actividades o acciones rentables que los eliminen.

# CAPÍTULO I

# GENERALIDADES

## I.1. ANTECEDENTES

Parece que cuanto más conocemos sobre el mundo en el que vivimos, más aprendemos sobre los peligros existentes, los avances tecnológicos nos permiten ser conscientes de los posibles desastres que podrían ocurrir, esta conciencia de riesgo provoca que, cada vez haya más interés en mitigarlo o gestionarlo mediante diferentes tipos de análisis. El análisis de causa raíz no es una metodología única que sea bien definida, hay muchas herramientas diferentes, procesos y filosofías para el ACR. Sin embargo, la mayoría de estos se pueden clasificar en cinco "ideologías" que se nombran según su origen:

- ACR basado en la seguridad: del análisis de accidentes y la seguridad ocupacional y la salud.
- ACR basada en la producción: su origen es el ámbito del control de calidad de manufactura industrial.
- ACR basado en el proceso: es básicamente una continuación del ACR basado en la producción, pero con un alcance que se ha ampliado para incluir los procesos de negocio.
- ACR basado en la falla: tiene sus raíces en la práctica de análisis de fallas como los usados en ingeniería y mantenimiento.
- ACR basado en los sistemas: ha surgido como una mezcla de las escuelas anteriores, con ideas tomadas de ámbitos como la gestión de cambios, gestión de riesgos y análisis de sistemas.

En las industrias, y en especial las empresas de petróleo y gas, se ha tratado de llegar a un punto óptimo a través del uso de metodologías y herramientas para el análisis de las causas que producían los errores con el objetivo de poder desarrollar sistemas más seguros, este estudio de análisis de errores también llamado (ACR), empleado para investigar accidentes industriales graves, se inició desde los años 70's, estos métodos tuvieron especial impacto en la industria nuclear y en la aviación.

Es importante mencionar a Frederick W. Taylor uno de los grandes innovadores que incursionó en el estudio del tiempo y movimiento en las tareas, Taylor uso del método científico para definir la "forma óptima" cómo llevar a cabo el trabajo; dividiendo cada tarea, procesos en sus elementos más importantes con la ayuda de un reloj, cronómetro y obtuvo métodos ideales de trabajo basándose en el perfeccionamiento de los mejores elementos de los procesos de los distintos obreros, buscaba suprimir los movimientos equivocados, lentos e inútiles, para lograrlo observó a los mejores obreros, con un gran resultado que fue aumentar la producción y calidad del producto. Desde la evolución del Mantenimiento Productivo Total (TPM) ha habido un movimiento consistente hacia la exploración de la calidad del proceso en vez de la calidad del producto. Antes de la llegada del TPM, las organizaciones se contentaban con medir la

calidad del producto terminado, aunque admirable la medida era demasiado tardía si se hallaban los defectos de calidad.

El producto, y probablemente todo el lote tenía que ser reprocesado a un alto costo para la organización. Entonces se introdujeron los principios de W. Edwards Deming e impulsaron el concepto de calidad de proceso, en pocas palabras, esto significa que se debe medir variables clave en el proceso para detectar cualquier variación inaceptable. De esta manera, se corrige la variación en el proceso y se evita la manufactura de productos fuera de especificación.

Normalmente cuando ocurre un fallo, esta es percibida porque genera ciertas manifestaciones o fenómenos de fácil localización o bien síntomas, no así las causas de la misma (causa raíz) que, mientras más complicado sea el sistema, mayor será la dificultad de localizar el origen de dichas causas, pudiendo atacar las manifestaciones del fallo pero no su origen, lo que se traduce en potencialidad de ocurrencia de fallos que se harán recurrentes. El análisis causa raíz es una herramienta utilizada para identificar causa de falla, un análisis más profundo es mejor para ayudar a comprender los eventos y los mecanismos que actuaron como raíz del problema.

## **I.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIÓN DE LOS PROCESOS QUE CONSTITUYEN UNA REFINERÍA**

Una refinería es una gran planta de producción de gran densidad de capital, con sistemas de procesamiento extremadamente complejos, en ellas se convierte el petróleo crudo y otros flujos de entrada en docenas de (sub) productos refinados, cada refinería tiene una estructura física particular, determinadas principalmente por su ubicación, antigüedad, disponibilidad de fondos para inversiones de capital, petróleos crudos disponibles, demanda del producto, requisitos de calidad de producto y estándares ambientales. La refinación es el conjunto de procesos físicos y químicos a los que se somete el crudo para obtener de él, los diversos productos petrolíferos para propósitos específicos con propiedades físicas y químicas bien definidas.

El petróleo está conformado por varios hidrocarburos que comprenden desde el gas combustible hasta el asfalto. Su separación en columnas de destilación se realiza por diferencias de volatilidad que tienen unos de otros. El procedimiento utilizado consiste en calentar petróleo a una temperatura en que los componentes más ligeros se evaporan para ser enseguida condensados. Esta condensación se efectúa a diferentes temperaturas debido a que los hidrocarburos más volátiles se condensan a menor temperatura que los menos volátiles.

Las características de las fracciones o cortes que constituyen los diferentes petrolíferos se tienen que ajustar a patrones de utilidad o de consumo comercial. Este ajuste se hace sometiendo a las fracciones a diversos procesos de tratamiento, con ello se logra obtener, mediante reacciones químicas, productos de la calidad requerida. Una refinería como se muestra en la fig.1.1 cuenta con estructuras necesarias para realizar actividades asociadas con los trabajos de refinación y manejo de hidrocarburos.





- 2- DESTILACIÓN AL VACÍO fig.1.3. Cualquier líquido, cuando se somete a calentamiento a una presión más baja que la atmosférica, disminuye su punto de ebullición. Mediante este procedimiento es posible extraer más productos destilables del residuo primario. Después de calentar el residuo primario, se envía a la torre de vacío de donde se obtienen gasóleos ligero, gasóleo pesado, residuo de vacío, agua amarga y gases que van a chimenea. Cabe señalar que los gasóleos ligero y pesado se envían como carga a las plantas de desintegración catalítica, asimismo el residuo de vacío sirve como base para la preparación de combustóleo y asfalto.

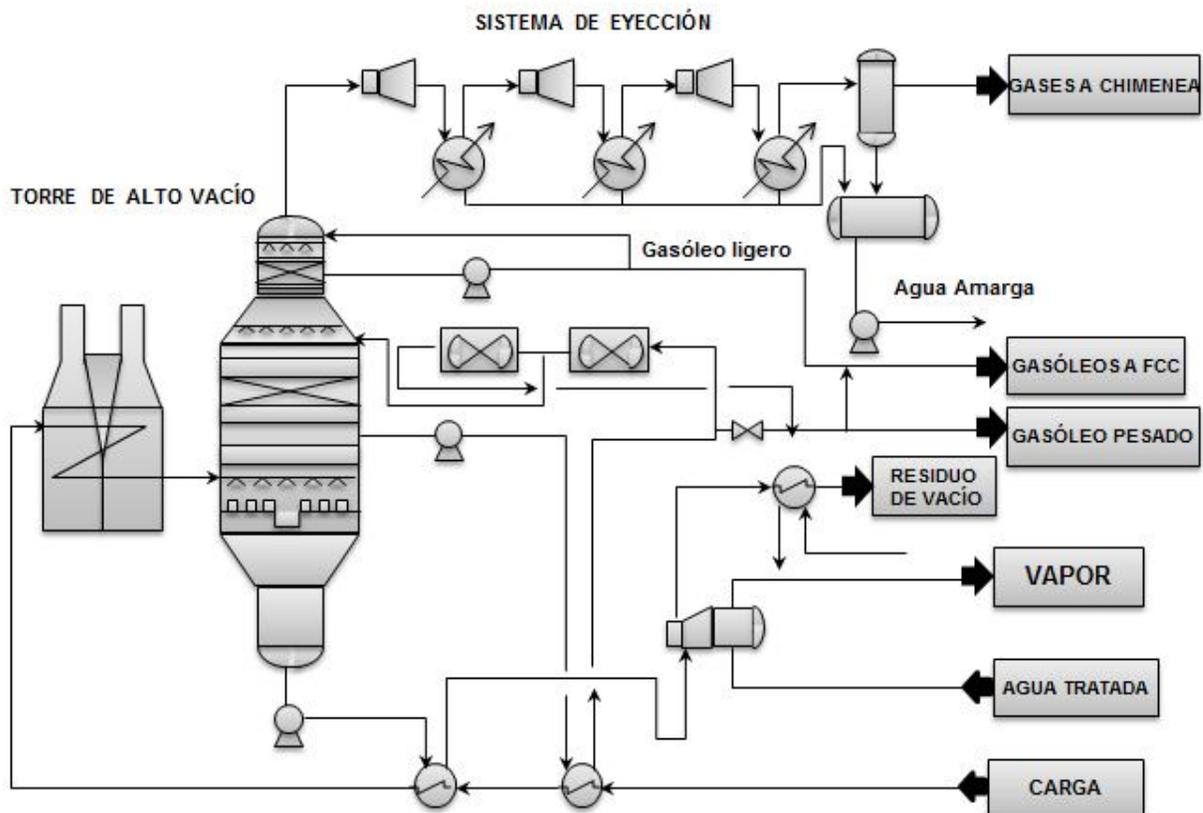
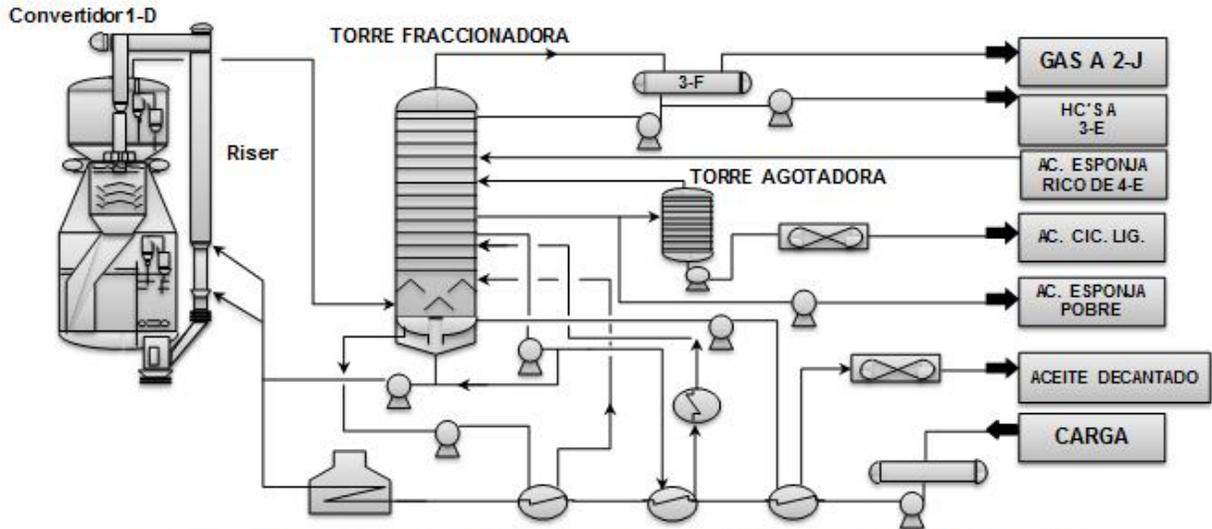


Fig.1.3. Destilación al vacío  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 6 de diciembre de 2013

- 3- DESINTEGRACIÓN CATALÍTICA fig.1.4. En este proceso se desintegran los compuestos de alto peso molecular por medio de la temperatura y un catalizador obteniéndose productos de mayor valor, la planta consta de las siguientes secciones a) desintegración catalítica, b) Fraccionamiento, c) Compresión de gas y estabilización de gasolina, d) Tratamientos y e) Fraccionamiento de gas licuado. La sección más importante es la primera y la constituye el reactor, que es donde se desintegra la mezcla de gasóleos al ponerse en contacto con el catalizador caliente que fluye en forma de polvo. Los productos formados en la desintegración, después de pasar por una serie de separadores ciclónicos, salen

por el domo del separador enviándose a la torre fraccionadora, en donde se obtienen gas y gasolina por el domo, aceite cíclico ligero, aceite decantado y lodos que se recirculan al reactor. El gas proveniente de la fraccionadora se comprime y se envía a las torres absorbedoras en donde se separa el gas seco. El gas licuado y la gasolina se envían a la torre desbutanizadora, separándose ahí el gas licuado y la gasolina ya estabilizada.



PLANTA DE DESINTEGRACIÓN CATALÍTICA (FCC) SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE GASES

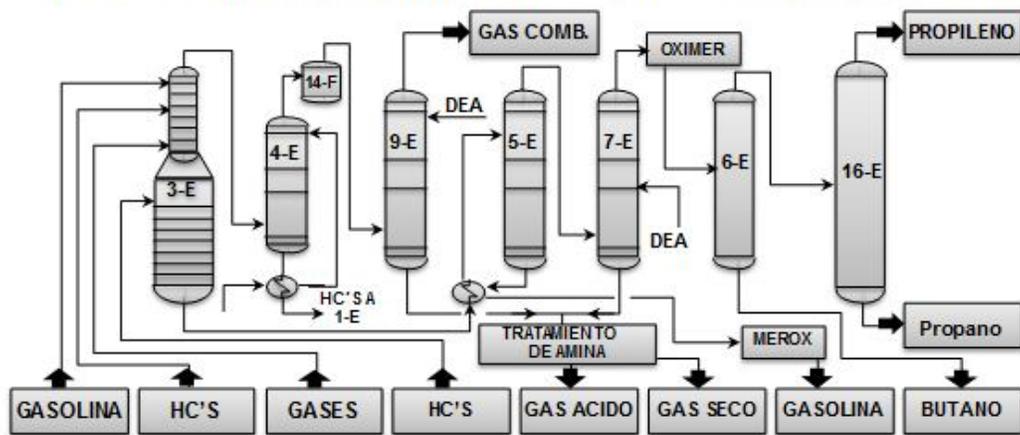


Fig.1.4. Desintegración catalítica (FCC)

Fuente: Diseño propio

Fecha: 6 de diciembre de 2013

4- HIDROTRATAMIENTO fig.1.5. Proceso cuyo objetivo es estabilizar catalíticamente los petrolíferos, además de eliminar los componentes contaminantes que contienen, haciéndolos reaccionar con hidrógeno a temperatura y presiones dadas en presencia de catalizadores diversos. En este tipo de proceso existen diferentes subdivisiones dependiendo de la carga con la que se trabaje los cuales son:

- Hidrodesulfuración de gasolina.

- Hidrodesulfuración de nafta
- Hidrodesulfuración de destilados intermedios
- Hidrodesulfuración de diésel
- Hidrodesulfuración de gasóleos de coquización y de vacío
- Hidrodesulfuración de naftas de coquización

De manera que se describirá uno de los procesos a modo de ejemplificar de modo general en lo que consiste.

#### Hidrodesulfuración de destilados intermedios

Este proceso es utilizado para eliminar los compuestos de azufre de la turbosina, querosina o diésel, mediante una reacción catalítica con hidrogeno. La carga proviene de la destilación primaria, la cual pasa a la zona de reacción en donde se obtiene por el fondo de separación de alta un producto desulfurado sin estabilizar, el cual es enviado a la torre agotadora; de esta torre los hidrocarburos pesados pasan a la sección de fraccionamiento para extraer de ella, por el domo, hidrocarburos ligeros que se envían como carga a la hidrodesulfuradora de gasolina, y por el fondo, la turbosina, querosina, o diésel desulfurado.

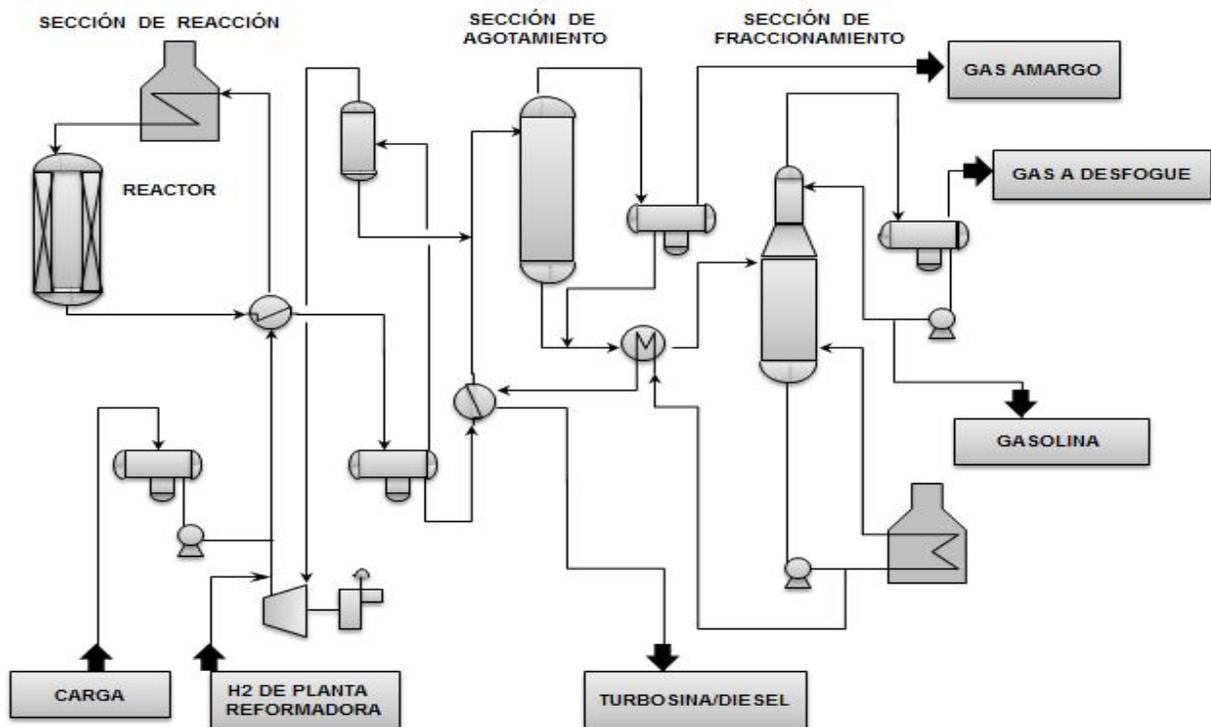


Fig.1.5. Planta hidrodesulfuradora  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 6 de diciembre de 2013

- 5- REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD fig.1.6. Proceso empleado para obtener hidrocarburos de bajo peso molecular tales como gases, gasolina, gasóleo y residuo de baja viscosidad (combustóleo), a partir de residuos de vacío de alta viscosidad. El proceso consiste en someter la carga a temperaturas muy altas para que las moléculas de gran tamaño se descompongan en moléculas más pequeñas. El global del producto tiene menor viscosidad que la carga. Para dilución del residuo de este proceso se utiliza aceite cíclico ligero, gasóleos generados en la unidad y querosina, para dar lugar a un combustóleo con especificación.

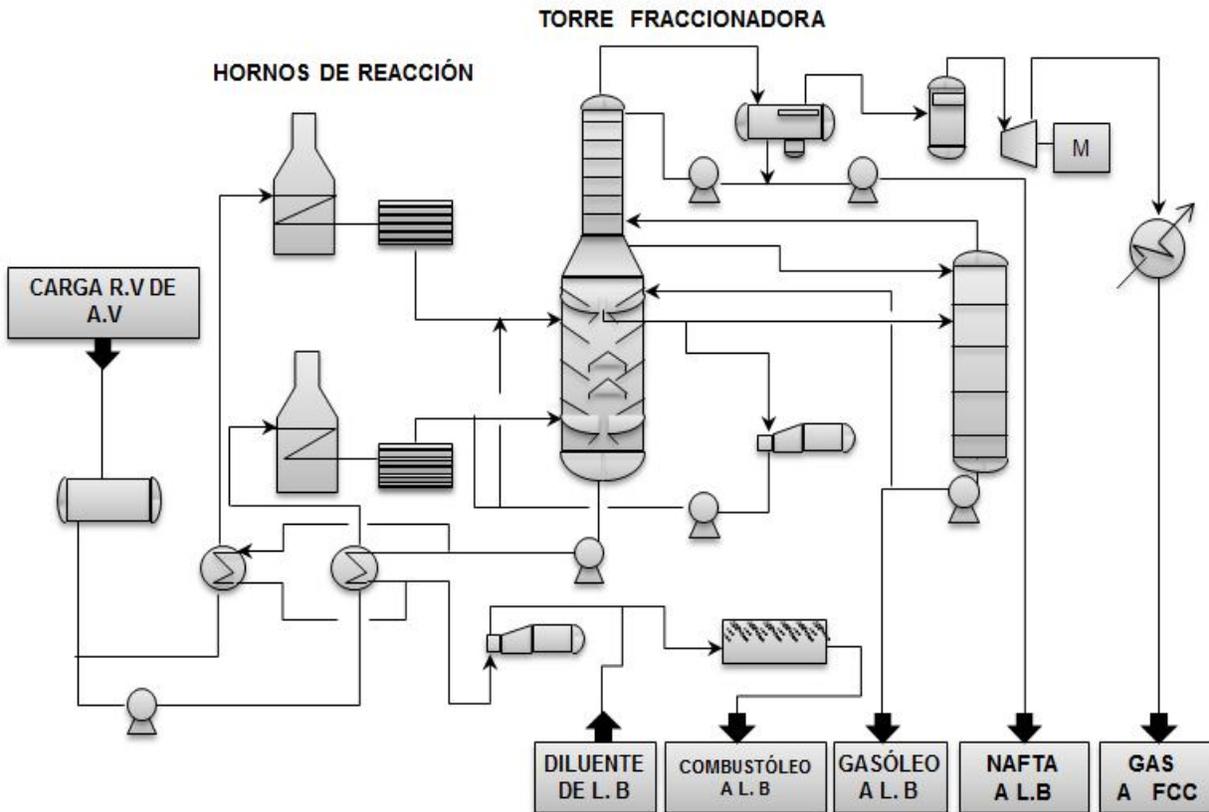


Fig.1.6. Planta reductora de viscosidad

Fuente: Diseño propio

Fecha: 6 de diciembre de 2013

- 6- COQUIZACIÓN fig.1.7. Es un proceso de conversión térmica, no catalítico que descompone el aceite residual, el residuo más pesado que resulta de la destilación del crudo, en un rango de intermedios más livianos para continuar su procesamiento. Los productos craqueados a partir de la coquización incluyen gases livianos, nafta de baja calidad y flujos destilados que continúan su procesamiento. La coquización es una forma enérgica de craqueo térmico utilizada para obtener gasolina de destilación directa, por este proceso el hidrógeno de la molécula de hidrocarburo se reduce de forma tan completa, que el residuo es una forma de carbono casi puro, denominado coque.

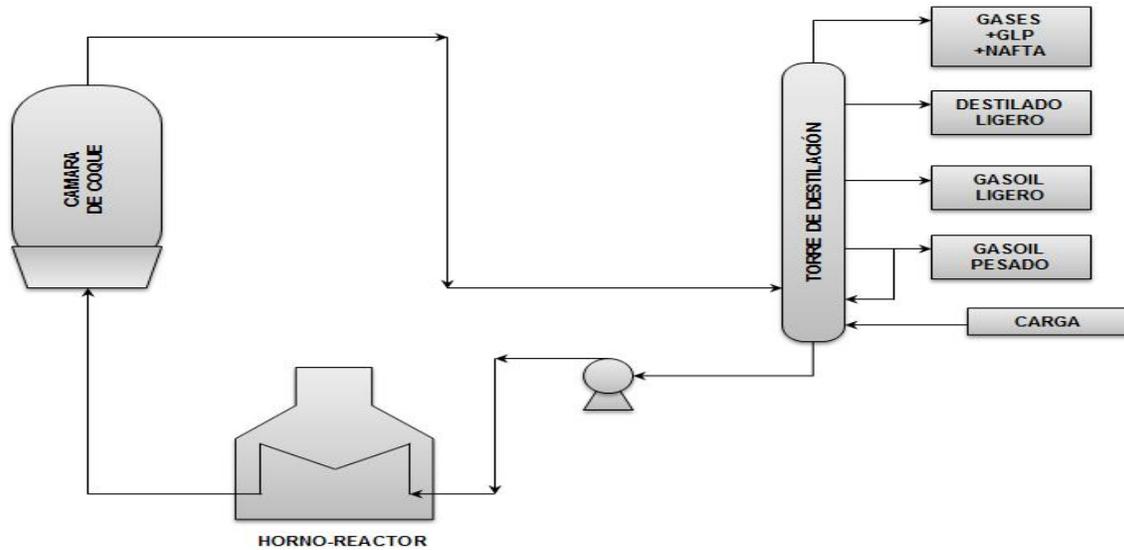


Fig.1.7. Planta de coquización

Fuente: Diseño propio

Fecha: 6 de diciembre de 2013

7- ALQUILACIÓN fig.1.8. Su proceso consiste en hacer reaccionar el isobutano con una olefina del tipo buteno principalmente, usando como catalizador ácido fluorhídrico y presión para producir una gasolina de alto octano (alquilado) y sin azufre, que se utiliza como componente para mejorar sustancialmente la calidad de las gasolinas finales.

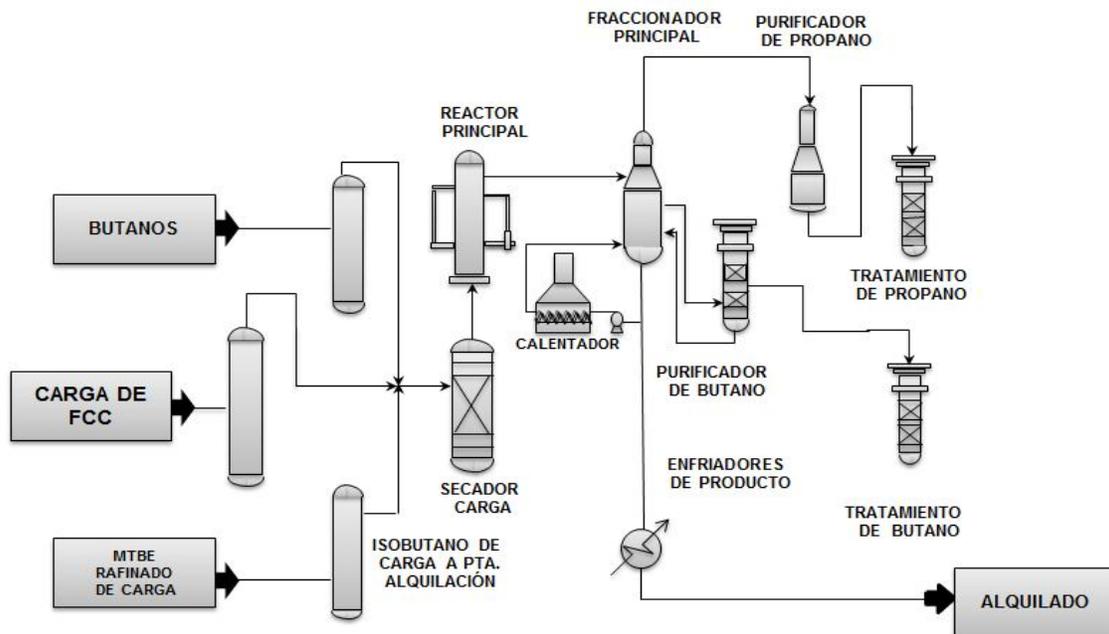


Fig.1.8. Planta de alquilación

Fuente: Diseño propio

Fecha: 6 de diciembre de 2013

8- REFORMACIÓN fig.I.9. Los reformadores catalíticos realizan una serie de reacciones catalíticas en flujos de nafta, las naftas extraídas directamente de la destilación primaria suelen tener moléculas lineales por lo que tienden a detonar por presión. estas reformadoras de naftas reciben como carga gasolina primaria desulfurada que, a presión y temperatura adecuadas, y en presencia de un catalizador a base de platino, se realiza la reacción de reformación, que consiste en transformar los hidrocarburos lineales y nafténicos a hidrocarburos aromáticos del tipo benceno, tolueno y xilenos, que son de mayor octanaje. La reacción se efectúa en cuatro reactores colocados en serie. Parte del hidrogeno producido se recircula a los reactores y el resto se alimenta a las plantas hidrodesulfuradoras. El reformado sin estabilizar se envía a la sección de fraccionamiento en donde, por el domo se separan los incondensables y licuables y, por el fondo el reformado estabilizado con alto octano mismo que es transferido a tanques para la preparación de gasolinas.

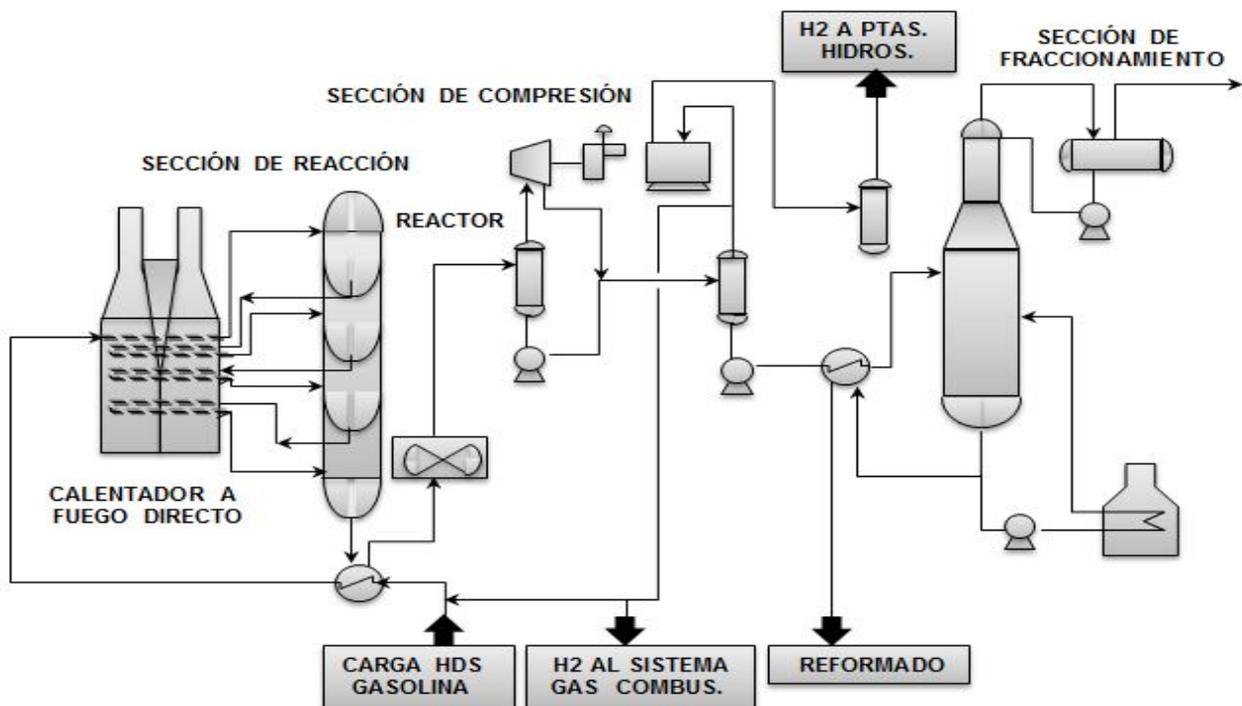


Fig.I.9. Planta de reformación  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 6 de diciembre de 2013

9- ISOMERIZACIÓN fig.I.10. La isomerización reorganiza las moléculas de parafina normal de bajo octanaje C5 y C6 en la nafta de destilación directa liviana, para producir las correspondientes isoparafinas de alto octanaje C5 y C6 y, de ese modo, incrementar en forma significativa el octano que resulta del flujo de nafta (isomerato) para convertirlo en una valiosa mezcla de componentes de gasolina. Como un beneficio adicional del proceso, la isomerización elabora un producto que prácticamente no contiene azufre ni benceno. Por ende, algunas refinerías han agregado recientemente la capacidad de isomerización, como un medio para

cumplir los estrictos estándares del nuevo benceno en su producción de gasolina. El proceso de isomerización de pentanos y hexanos aprovecha una corriente de las plantas hidrodesulfuradoras, las reacciones de isomerización se realizan en una atmósfera de hidrogeno con una pequeña dosificación de tetracloruro de carbono, sobre una cama fija de catalizador a base de platino, en dos reactores en serie, lo que reduce significativamente los costos de consumo de catalizador. De los reactores catalíticos, la mezcla isomerizada se envía a una torre estabilizadora donde se separan los gases producidos de la reacción que salen por el domo y después de efectuar un lavado caustico en donde se elimina el ácido clorhídrico, se envían al circuito de gas combustible de la refinería. Por otra parte, el isómero sale por el fondo de la torre estabilizadora y se envía al sistema de mezclado de gasolinas para su preparación con un alto índice de octano.

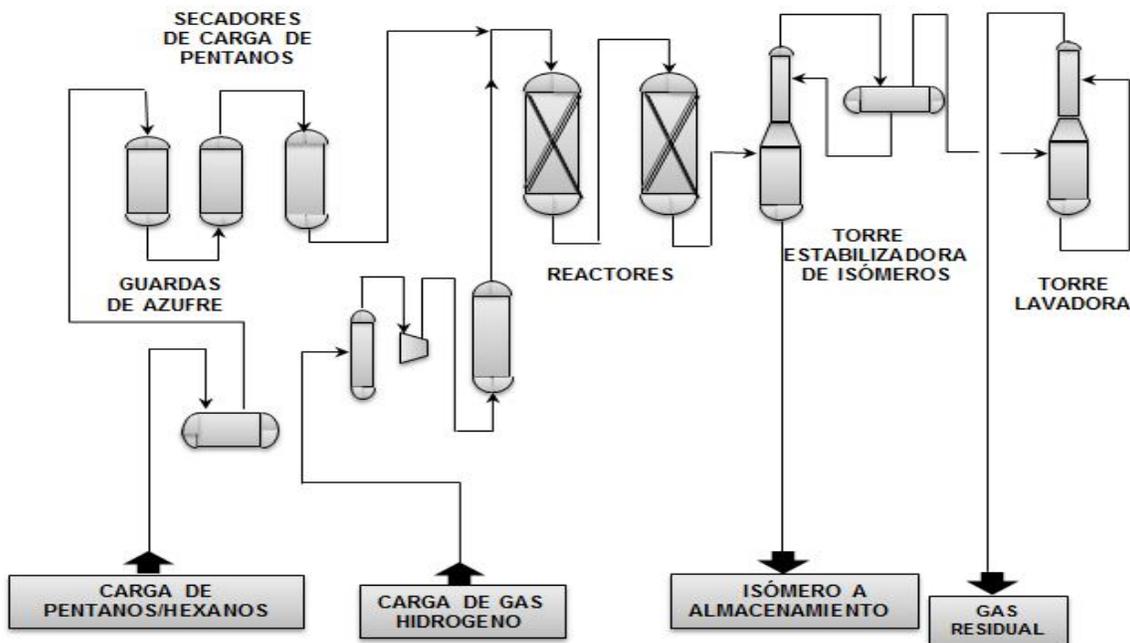


Fig.I.10. Planta Isomerizadora

Fuente: Diseño propio

Fecha: 6 de diciembre de 2013

- 10- MTBE Y TAME figs.I.11 y I.12. Las plantas productoras de compuestos oxigenados para obtener metil-terbutil-éter (MTBE), y Ter-amil-metil-éter (TAME), ambas de tecnología francesa. Con la utilización de estos compuestos en lugar del tetraetilo de plomo, se logra disminuir la emisión de plomo a la atmósfera, lo más sobresaliente, es su función consistente en oxigenar las gasolinas propiciando una mejor combustión de las mismas, lo que permite una disminución en la emisión de hidrocarburos no quemados, que son precursores de ozono y de monóxido de carbono. De manera similar a la unidad MTBE funciona la unidad de TAME, sólo que aprovecha los isoamilenos (de 5 átomos de carbono), producidos en la FCC en vez del isobutileno que es de 4 átomos de carbono.

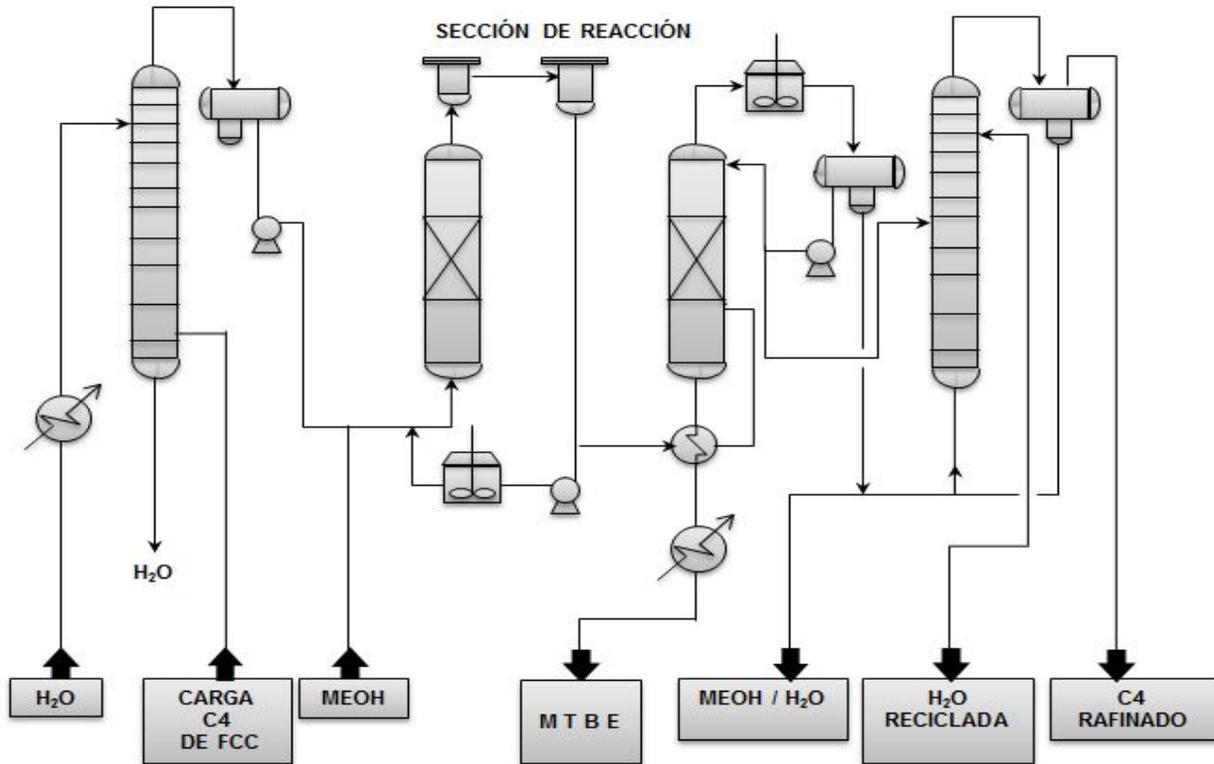


Fig.I.11. Planta de MTBE  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 6 de diciembre de 2013

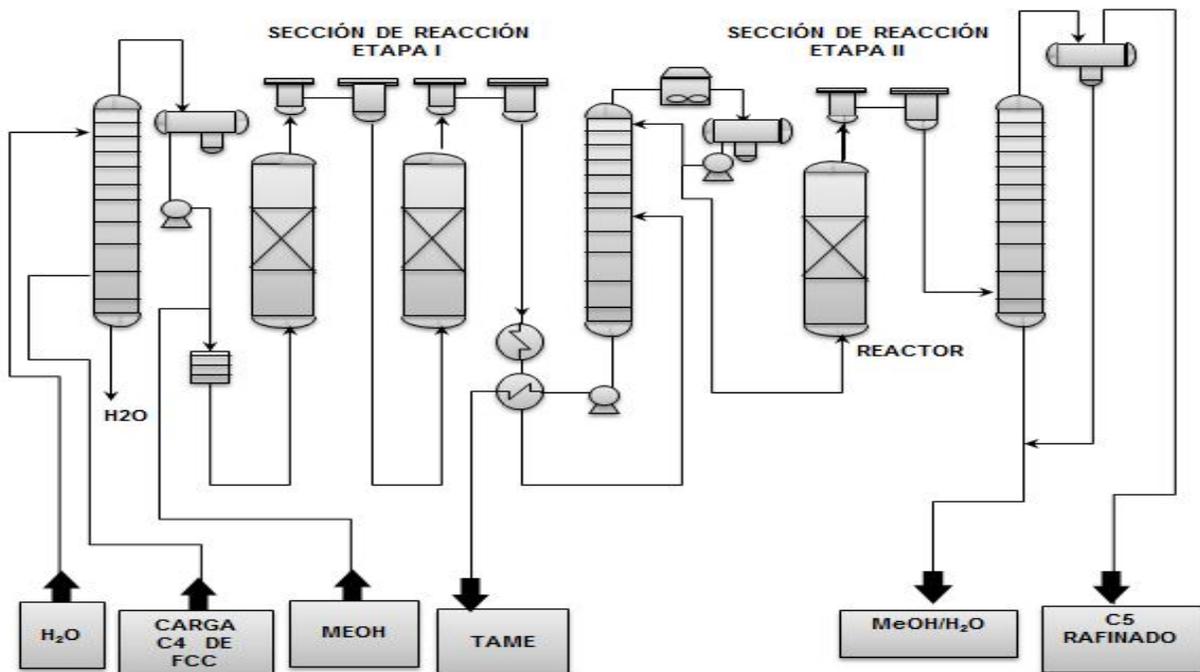


Fig.I.12. Planta de TAME  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 6 de diciembre de 2013



La industria petrolera se encuentra expuesta a diferentes tipos de riesgos tanto naturales como humanos, y también riesgos asociados con desviaciones del mismo proceso en las plantas o sectores involucrados, entre los primeros tenemos los riesgos tales como, los sismos, lluvias e inundaciones, entre los riesgos asociados con las personas se encuentra la impericia de los trabajadores, comunicación deficiente, fallas del desempeño administrativo, factores personales y de trabajo, actos y condiciones inseguras y por último tenemos los riesgos que pueden involucrar fallas en equipos o alteración en las condiciones de operación. En cada etapa del proceso existen riesgos asociados a cada una de ellas.

Las fallas son generalmente originadas por agentes que se encuentran en un ambiente de trabajo, “esperando que se den las condiciones suficientes” para dar lugar a un incidente, o en el peor de los casos, un accidente.

Los puntos de riesgo de cualquier instalación se refieren a aquellas áreas de proceso que puedan producir un efecto que tenga consecuencia adversas sobre la vida o la salud de las personas, las instalaciones o al ambiente, tal como emisiones y fugas de sustancias, incendio o explosión.

Los riesgos existentes en instalaciones de una refinería son innumerables debido a la naturaleza de las sustancias que se manejan las cuales por sus propiedades físicas y químicas, al ser manejadas, transportadas, almacenadas o procesadas presentan la posibilidad de riesgos, sumándole a esto los riesgos que presentan cada uno de los equipos de refinamiento. Este tipo de riesgos van desde un mal manejo debido a movimientos operacionales inadecuados, fallas en dispositivos de control hasta un mal diseño del equipo, de manera que se señalaran de manera general puntos de riesgo en equipos manejados dentro de la infraestructura de una refinería. En la tabla.I.1 se muestran algunos equipos y sectores con fallas frecuentes.

**Tabla.I.1. Fallas más comunes en sectores y equipos**

Equipos de riesgo	Descripción	Consecuencia	Sector afectado
Calentadores	Puede suscitarse el evento de incendio del calentador por descontrol en la operación del equipo movimientos operacionales inadecuados, falla de los dispositivos de control y de protección (actuadores), falla de los servicios auxiliares o por falla mecánica de los serpentines.	Incumplimiento al programa de producción y paro de la planta. Posibilidad de daños al personal dependiendo del tiempo de respuesta a la emergencia.	Hidrodesulfuradoras Alto Vacío Destilación Atmosférica

**Tabla.I.1. (Continuación) Fallas más comunes en sectores y equipos**

Equipos de riesgo	Descripción	Consecuencia	Sector afectado
Bombas	Se puede originar el incendio por fuga de material inflamable debido a daños al sello, a una falla por movimientos operacionales y/o mecánicos, cavitación, a falla de empaques de bridas de succión y/o descarga, condiciones severas de operación.	El incendio que es ocasionado por este tipo fugas en las bombas puede ser catastrófico ya que dependiendo de su ubicación, puede provocar daños a partes aledañas de equipos y puede ocasionar paro de planta.	MTBE TAME Alquilación Catalítica Alto Vacío Destilación Atmosférica Hidrodesulfuradoras
Racks de tubería	Daños severos por corrosión, agrietamiento por ciclos de presión por fuera de los perímetros de diseño.	Ruptura de tubería ocasionando derrame de hidrocarburos.	Alto Vacío Destilación Atmosférica
Hornos	Equipo sometido a temperaturas más altas de las que fue diseñado que conlleva a una sobrepresión, graves daños por corrosión. Desviaciones del diseño durante construcción.	Escapes o infiltraciones de productos no deseados.	Alto vacío Destilación Atmosférica Hidrodesulfuradora
Intercambiadores	Daños severos por corrosión y erosión, contaminación por tubos rotos, daños a los sellos y juntas.	Fugas de líquidos inflamables ocasionando incendio en el peor de los casos explosión y daños a equipos aledaños.	Alto Vacío Destilación Atmosférica Hidrodesulfuradora
Compresores	Disparo del compresor por falta de aceite de lubricación, baja presión sistema de lubricación, disparo por alta temperatura de aceite.	Puede ocasionar el paro de emergencia de plantas o sectores.	Catalítica Destilación Atmosférica Hidrodesulfuradora

**Tabla.I.1. (Continuación) Fallas más comunes en sectores y equipos**

Equipos de riesgo	Descripción	Consecuencia	Sector afectado
Torre fraccionadora	Puede haber una condición de sobre presión en la torre fraccionadora; puede ocurrir por inestabilidades en el proceso; composición de la alimentación, falla de agua de enfriamiento en los condensadores, reflujo, instrumentos, o por un error humano.	Las consecuencias de la sobre presión, puede solo culminar en fugas por conexiones y accesorios, daño a tubos, presionamiento del asentador, rectificación del producto puro o perdida de la relación de reflujo interno, cavitación de las bombas por bajo nivel o pueden ser catastróficas con daños a los trabajadores, al medio ambiente, a las instalaciones y a la comunidad aledaña.	MTBE Hidrodesulfuradora Viscoreductora Alquilación Catalítica Alto Vacío

#### I.4. PRINCIPIOS GENERALES DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR)

A pesar de la aparente disparidad en cuanto al propósito y la definición del análisis causa raíz, hay algunos principios generales que podrían ser considerados como básicos.

- El objetivo principal del ACR es identificar los factores que dieron lugar a la naturaleza, la magnitud, la ubicación y el momento de los resultados nocivos de uno o más eventos del pasado con el fin de identificar cuáles son los comportamientos, acciones, inacciones o condiciones que deben ser cambiadas para evitar la recurrencia de los resultados nocivos similares e identificar las lecciones que se deben aprender para promover el logro de mejores consecuencias
- Para ser eficaz, la ACR se debe realizar de forma sistemática, por lo general, como parte de una investigación, las conclusiones y las causas que se han identificado respaldado por evidencia documentada. Por lo general, se requiere un esfuerzo de equipo
- Puede haber más de una causa raíz de un evento o un problema, la parte difícil es demostrar la persistencia y sostener el esfuerzo necesario para determinarlos
- El propósito de la identificación de todas las soluciones a un problema es para prevenir la recurrencia a un costo más bajo en la forma más sencilla. Si hay

alternativas que son igualmente eficaces, entonces se prefiere el método más sencillo y más bajo costo

- Las causas raíz identificadas dependerá de la forma en que se define el problema o evento. En este punto las descripciones de los eventos son útiles y necesarias
- Para ser eficaz, el análisis debe establecer, una secuencia de eventos o una línea de tiempo para entender las relaciones entre los factores contribuyentes, de la causa raíz y el problema o evento
- Análisis de la causa raíz puede ayudar a transformar una cultura reactiva a una cultura orientada hacia el futuro que resuelve los problemas antes de que ocurran o se intensifican. Más importante aún, reduce la frecuencia de los problemas que se producen con el tiempo dentro del entorno en el que se utiliza el proceso de ACR

### **I.5. PRINCIPAL USO DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DENTRO DE UNA REFINERÍA**

Aunque en una refinería se tenga la disposición de un buen sistema de seguridad, las fallas, incidentes y accidentes ocurren, por este motivo se deben investigar y analizar, con el objeto de adoptar las medidas correctoras que eviten su repetición o la aparición de consecuencias más graves. Esta importancia de investigar y reportar incidentes radica en el hecho de que, aun cuando no se haya producido una pérdida, su ocurrencia indica que existen desviaciones y por consiguiente hay que llevar a cabo las acciones que sean necesarias para evitar la generación de pérdidas. Generalmente, en el origen de los accidentes se encuentran fallas en la organización de los trabajos, que repercuten negativamente en la seguridad, tanto de los trabajadores como de las instalaciones. Estas fallas deben ser identificadas por los responsables de la administración de los procesos, de ahí que si bien esta metodología de investigación de incidentes es totalmente válida para profundizar en el análisis causal de los mismos.

La prevención y el control de los riesgos es un aspecto prioritario en las políticas y programas de la industria petrolera, química y petroquímica, su objetivo es disminuir la posibilidad de ocurrencia de accidentes y de mitigar los impactos o consecuencias de pérdidas humanas, materiales, ambientales y financieras que pudieran afectar la continuidad operacional y la ventaja competitiva.

Para aplicar un análisis de causa raíz se debe tener una clara definición de sistema para comprender la interrelación existente entre los diversos niveles de un proceso, lo que nos permitirá a la hora de realizar un estudio, considerar todos los factores, aspectos y condiciones que están presentes en un entorno ya que cualquiera de ellos puede generar una falla, el ACR se aplica generalmente en problemas puntuales para equipos críticos dentro de un proceso o cuando existe la presencia de fallas repetitivas su principal uso se da cuando:

- Se requiera el análisis de las fallas crónicas (repetitivas) que se presentan continuamente, tales como fallas de equipos comunes
- Se incurre en costos operativos no adecuados
- Se presentan fallas esporádicas, en procesos críticos, tales como paradas de emergencia, incendios, explosiones, muertes, lesiones importantes o fallas graves poco frecuentes en los equipos
- Es necesario un análisis del proceso de diseño de nuevos equipos, de aplicación de procedimientos operativos y de supervisión de actividades de mantenimiento
- Son comunes aspectos operativos tales como la interrupción de las operaciones, aumento del consumo de energía, corridas más largas, defectos de calidad e incidentes ambientales

# **CAPÍTULO II**

# **MARCO TEÓRICO**

## II.1. ¿QUÉ ES EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ?

El Análisis Causa Raíz (ACR) se refiere a un conjunto de técnicas o procesos usados para identificar factores causales de accidentes/incidentes o fallas enfocados en la gente, procesos y tecnología, con el objeto de resolver problemas. Podemos escuchar que la describen como el cumplimiento de los requisitos de la confiabilidad integral de los activos. Esta es una mala interpretación ya que la confiabilidad es mucho más que la adopción de la metodología ACR.

El ACR es un proceso que ha sido diseñado para que sea usado en la investigación de las causas de acontecimientos, que afecten la seguridad, salud, el medio ambiente, calidad, la operación y que finalmente como esto repercute en la producción de cualquier sector industrial en donde se genere un evento insatisfactorio.

Hablando en términos generales sobre lo que es el ACR podemos describirlo como una herramienta diseñada para ayudar a los profesionales a identificar no sólo qué y cómo se produjo un evento no deseado (falla, problema o accidente u incidente particular), sino también podremos saber cómo sucedió, hacer frente a un problema, con el fin de llegar a la causa (raíz) de dicha problemática además de que nos ayuda a corregir o eliminar y evitar que el problema tenga que volver a ocurrir. Es fundamental tomar en cuenta los puntos que rodean al ACR como se muestra en la fig.II.1.

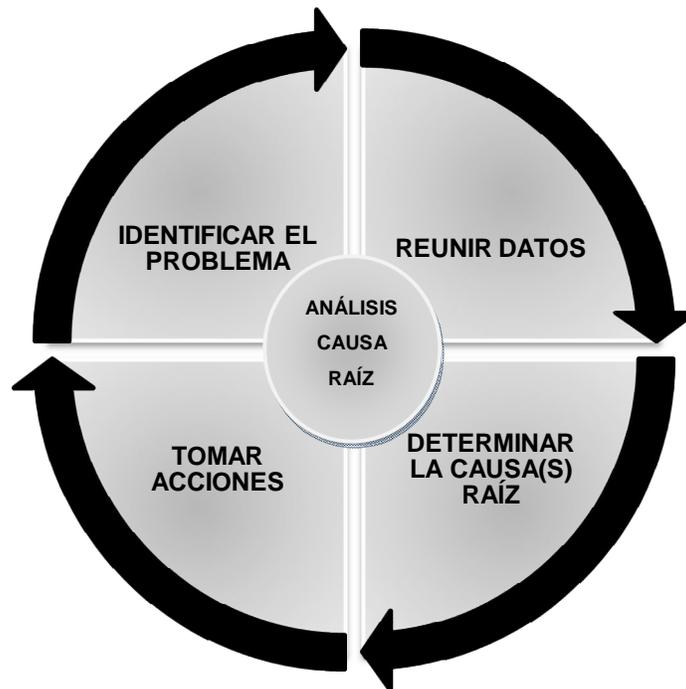


Fig.II.1. Esquema de los puntos que rodean al Análisis Causa Raíz

Fuente: Diseño propio

Fecha: 13 de noviembre de 2013

Además de ser una metodología disciplinada es considerado a menudo como un proceso iterativo, ayudándonos identificar las causas físicas, humanas y latentes de

cualquier tipo eventualidad, falla o incidente que ocurren una o varias veces permitiendo como ya sea mencionado adoptar las acciones preventivas y correctivas que reducen los costos de vida útil de los activos físicos, mejorando la seguridad y la confiabilidad de la planta.

Para llevar a cabo el ACR se utiliza una gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema, disponibilidad de los datos y conocimiento de las técnicas mencionando algunas como es el análisis causa efecto, árbol de falla, diagrama espina de pescado, análisis de cambio, análisis de barreras y eventos y por último el análisis de factores causales.

## II.2. EL ACR COMO HERRAMIENTA DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL

En los procesos de mejora continua el término de Confiabilidad Operacional (C.O) cumple con su objetivo ya que al incorporar sistemáticamente nuevas tecnologías, técnicas de análisis y herramientas de diagnóstico para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial haciendo prioritarias las actividades y la productividad humana basándose en la visión, misión y los objetivos de una organización. Dentro de la C.O se lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnologías y la gente fig.II.2), para que se cumpla su función o el propósito destinado, estando dentro de sus límites de diseño bajo el contexto operacional.



Fig.II.2. Capacidad de una instalación dentro de la C.O  
Fuente: [http://virtual.uptc.edu.co/drupal/files/123\\_ana\\_estr\\_confia.pdf](http://virtual.uptc.edu.co/drupal/files/123_ana_estr_confia.pdf)  
Fecha: 04 de diciembre de 2013

El concepto de C.O tiene un enfoque que se fundamenta en el conocimiento para eliminar las fallas o accidentes/incidentes, tanto humanos, de equipos y de los procedimientos erradicando las causas de baja confiabilidad y que afectan a los procesos críticos y la rentabilidad total.

Para que se logre un total control se debe garantizar una buena (C.O) fundamentándose en sus cuatro áreas fundamentales: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, confiabilidad de diseño y la confiabilidad de equipos; sobre estos se debe actuar si se quiere un mejoramiento continuo y de largo plazo. La C.O como metodología de análisis se apoya en una serie de herramientas que permitan evaluar el comportamiento del activo de una forma sistemática a fin de poder determinar el nivel de operatividad.

El ACR forma parte de la C.O y como ya ha quedado definida es una herramienta básica que nos ayuda a determinar las causas que generan algún acontecimiento que genere algún descontento, o en su defecto dentro de un conjunto de problemas u anomalía de mayor peso en cuanto al impacto operacional, económico y de seguridad.

Con el fin de formular planes estratégicos para lograr mejoras en las actividades de mantenimiento en la fig.II.3 se muestran las herramientas fundamentales y como interactúa el ACR dentro de la C.O las seis que se muestran son las más utilizadas.



Fig.II.3. Herramientas de la Confiabilidad Operacional

Fuente: <http://confiabilidad.net/articulos/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>

Fecha: 23 de noviembre de 2013

**Análisis de Criticidad (CA).** Es una técnica que permite jerarquizar sistemas, equipos e instalaciones, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones.

**Análisis de Modos y efectos de Falla y Criticidad (FMECA).** Es una metodología que permite determinar los modos de falla de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan.

**Análisis Causa Raíz (RCA).** Es una técnica sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas.

**Inspección Basada en Riesgos (RBI).** Es una técnica que permite definir la probabilidad de falla de un equipo o sistema, y las consecuencias que las fallas pueden generar sobre la gente, el ambiente y los procesos.

**Análisis Costo Riesgo Beneficio (BRCA).** Es una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos de hacer una actividad y lo logros o beneficios que la actividad genera, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal actividad.

**Costo del Ciclo de Vida (LCC).** El análisis LCC es una metodología que permite elegir entre opciones de inversión o acciones de incremento de la confiabilidad con base en su efecto en el costo total del ciclo de vida de un activo nuevo o en servicio.

El ACR como exponente dentro de las técnicas que rodean a la C.O se convierte en una herramienta muy útil que nos ayudará a eliminar eventos no deseados buscando una manera rápida y eficaz a la solución de problemas y evitar que se repitan o de que sea más grande la eventualidad, con la eliminación de las eventualidades constantes, se logra obtener una mayor confiabilidad integral del proceso reduciendo el número de éstas, también se optimiza el volumen de trabajo al reducir las actividades que generan molestia, aumentando de esta forma la eficiencia en los procesos de ejecución.

### II.2.1. EL ENFOQUE Y LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ACR

En la creciente industria de refinación, los equipos son cada vez más sofisticados y complejos y la preocupación por mantener operaciones bajo un ambiente de confianza, han generado que muchas herramientas se acoplen entre sí con el fin de obtener el mayor beneficio de ellas. Hoy en día, el ACR ha venido constituyendo como una herramienta que sirve de apoyo a otras metodologías, y así poder generar un programa muy completo para la detección, prevención y eliminación de eventos causales de fallas, accidentes e incidentes, es por eso que su enfoque se centra en estos mismos en la fig.II.4 se muestra un escenario simple que produce un evento de pérdida.

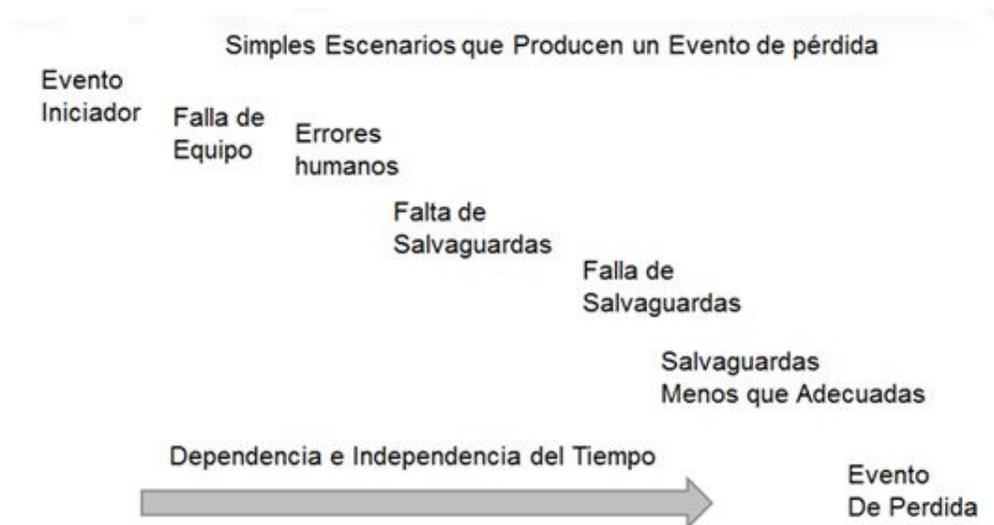


Fig.II.4. Simple escenario que produce un evento de pérdida

Fuente: [www.gas.pemex.com](http://www.gas.pemex.com)

Fecha: 24 de noviembre de 2013

**Evento iniciador.** Es el primer evento en una secuencia que, si no se mitiga, causa que ocurra uno ó más eventos de pérdida. Típicamente, el evento iniciador es una falla de equipo ó error humano, ó también puede ser una actividad planeada.

## Otros Eventos

**Falla de equipos.** El equipo de proceso podrá fallar, contribuyendo también al evento de pérdida. Estas fallas de los equipos son los resultados de errores humanos directos ó indirectos.

**Errores humanos.** Los errores humanos podrán ocurrir durante la secuencia del incidente y contribuir al evento de pérdida.

**Falta de salvaguardas.** Estos son los eventos que no aparecen en la actual secuencia, pero que pudieron (ó deberían) ser suministrados como acciones planeadas para prevenir/mitigar potenciales pérdidas asociadas con los eventos iniciadores.

**Falla de salvaguardas.** Estos son eventos en una secuencia de incidente que representa una ejecución no exitosa de acciones planeadas, para prevenir/mitigar potenciales pérdidas asociadas con los eventos iniciadores.

**Salvaguardas menos que adecuadas.** Las salvaguardas pueden ser suministradas y funcionar, sin embargo pueden ser inadecuadas para prevenir ó mitigar la pérdida.

En los siguientes renglones se mencionan los objetivos específicos del ACR ya que como lo hemos dicho en puntos anteriores el ACR se enfoca a los procesos, equipo y la gente:

- Proteger la seguridad y salud de los trabajadores y el público
- Preservar los recursos humanos y capitales de la compañía
- Preservar la calidad, confiabilidad y productividad
- Garantizar el continuo servicio a los clientes
- Cumplir con los requerimientos reglamentarios y de seguros
- Cumplir con las políticas de la compañía y de la Industria
- Responder a las preocupaciones legales, reglamentarias, corporativas, comunitarias y/o de los empleados
- Educar a la administración/gerencia, personal y empleados
- Demostrar la preocupación de la administración/gerencia y promover la participación de los empleados
- Advertir de los riesgos no reconocidos y/o de estrategias de administración/gerencia de riesgo más efectivas

- Otros objetivos especializados

### **II.3. CONCEPTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR)**

Antes de entrar en más detalle sobre la descripción de la metodología del ACR, es preciso tener presente y conocer algunas definiciones de los términos que suelen usarse comúnmente al momento de estar desarrollándola, siempre habrá discusiones sobre cuál es el verdadero significado de cada término, pero lo más importante es que las definiciones usadas tengan una interpretación común en toda la organización:

#### ACCION

Se aplica también para establecer divisiones del trabajo o para distinguir o diferenciar algunos actos especializados, como son: acción administrativa, acción política, acción técnica, y acción de reforma administrativa, entre otros. En el enfoque de mantenimiento, es el efecto que causa un agente (físico, químico, humano, etc.) sobre algo como producto de la ejecución de actividades específicas. Por ejemplo, la reparación de un equipo o componente como consecuencia de una falla es una acción correctiva. En análisis de fallas, es la asignación para ejecutar una tarea o series de tareas para resolver una causa identificada en la investigación de una falla o problema.

#### ACTIVO

Término contable para cualquier recurso que tiene un valor, un ciclo de vida y genera un flujo de caja, puede ser humano, físico y financiero, por ejemplo: el personal, centros de trabajo, plantas, equipos, etc.

#### BARRERA

Es el dispositivo físico o un control administrativo utilizado para reducir el riesgo del resultado no deseado a un nivel aceptable. Las barreras pueden proporcionar una intervención física.

#### CAUSA (FACTOR CAUSAL)

Un evento o condición que resulta en un efecto o bien es cualquier cosa que le da forma o influye en el resultado.

#### CONSECUENCIA:

Resultado de un evento, pueden existir una o más consecuencias de un evento. Las consecuencias pueden variar de positivas a negativas. Las consecuencias de un evento pueden ser expresadas cualitativa o cuantitativamente, los modelos para el cálculo de consecuencias deben tomar en cuenta el impacto en seguridad, higiene, ambiente, producción, costos de reparación e imagen de la empresa.

## CONDICIÓN

Cualquier estado que se encuentre ya sea motivado o no por un evento, que puede tener la seguridad operacional.

## DEFECTO

Causa inmediata de una falla: desalineamiento, mal ajuste, fallas ocultas en sistemas de seguridad, entre otros.

## DISPONIBILIDAD

Una medida del grado por el cual un ítem está en un estado operable y confiable en el inicio de una función, cuando la función es solicitada en cualquier momento (aleatorio), se definen dos indicadores de disponibilidad:

Disponibilidad Inherente: La disponibilidad inherente representa el porcentaje del tiempo que un equipo está en condiciones de operar durante un período de análisis, teniendo en cuenta sólo los paros no programados.

Disponibilidad Operacional: Representa el porcentaje de tiempo que el equipo quedó a disponibilidad del área de Operación para desempeñar su función en un período de análisis. Teniendo en cuenta el tiempo que el equipo está fuera de operación por paros programados y no programados.

Es la habilidad de un ítem para estar en estado de desempeñar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante de tiempo dado ó dentro de un intervalo de tiempo dado, asumiendo que las fuentes externas requeridas son provistas.

## EVENTO

Es una ocurrencia en tiempo real que describe una acción discreta, por lo general un error, fallo o mal funcionamiento. Ejemplos: ruptura de tuberías, pérdida de energía fenómenos naturales como la caída de un rayo o que el personal accidentalmente acciona instrumentos tales como el abrir una válvula por error.

## ÍTEM

Este término específico es usado para denotar cualquier equipo mantenible, incluyendo sistemas, partes, materiales, subensambles, conjuntos, accesorios, etcétera.

## PROBABILIDAD

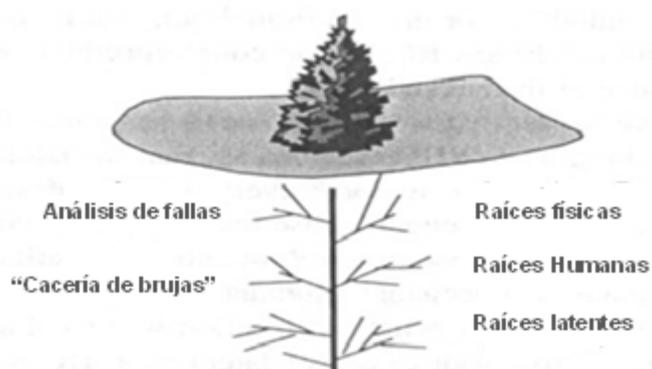
Medida de la posibilidad de ocurrencia de un evento llámese falla incidente u accidente. La frecuencia de que ocurra un evento es un indicador de probabilidad.

## II.4. CATEGORIAS DE LAS CAUSAS RAÍZ

Mediante el uso y la aplicación del ACR en la industria de refinación se localizan causas comunes de perturbaciones como los son concentraciones de esfuerzos, desalineaciones, materiales inadecuados, falta de equipos de inspección y una de las cosas muy importantes que es la falta de adiestramiento del personal, etc., las cuales podemos agrupar en tres niveles.

Podemos clasificarlas en causas físicas, humanas y del sistema (latentes). En general pueden ser derivadas de procesos de deterioro por razones físicas o químicas, defectos de diseño, malas prácticas operacionales o de mantenimiento, baja calidad de materiales o refacciones, u otros razones organizacionales como presiones en los objetivos de producción, cambios en el contexto operacional, alta rotación del personal, falta de difusión o inexistencia de procedimientos actualizados de operación y mantenimiento, ejecución de trabajos por personal no certificado, entre otros, que conducen a la falla. Circunstancias asociadas con el diseño, manufactura, instalación, uso y mantenimiento, las cuales hayan conducido a una falla.

En el ACR se trata de investigar los patrones de efectos negativos, la búsqueda de fallas ocultas en el sistema, y el descubrimiento de las acciones específicas que han contribuido al problema. A menudo, esto significa que ACR revela más que una causa fundamental.



*Fig.II.5. Categorías del ACR*  
*Fuente: Análisis Causa Raíz en la evaluación de la línea de resultados*  
*Fecha: 27 de noviembre de 2013*

Este proceso reiterativo de desarrollar hipótesis y probar o refutarlas está basado en la experimentación y es una parte vital de cualquier proceso de investigación analítica observando la fig.II.5 el proceso concluirá con la identificación de las causas físicas, humanas y latentes, a continuación se dará una descripción de cada una de estas.

### CAUSAS FÍSICAS

Causas fundamentales físicas son aquellos elementos tangibles que se pueden ver y por lo general son el punto de detección de la mayoría de las organizaciones que llevan a cabo el ACR. Aquí podemos reunir todas aquellas situaciones o manifestaciones de

origen físico que afectan directamente la continuidad operativa de los equipos o plantas, por ejemplo: flujo mínimo por bloqueo de una tubería, malas conexiones, repuestos defectuosos, etc. Generalmente en este nivel no se encontrará la causa raíz del fallo, sino un punto de partida para que se pueda localizarla.

## **CAUSAS HUMANAS**

Las causas humanas están involucradas en virtualmente cada resultado indeseable que ocurre en nuestro entorno, esto significa que ya sea que tomamos una decisión inadecuada o hemos pasado por alto la necesidad de tomar una decisión esto se repite todos los días como parte del ser humano, la identificación de una causa humana casi siempre dará lugar a la búsqueda de un culpable (cacería de brujas) siendo contraproducente al desarrollo del ACR. Son todos aquellos errores cometidos por el factor humano y que inciden directamente e indirectamente en la eventualidad indeseada lo que el humano hace suele dar lugar a las causas físicas: instalaciones inadecuadas, errores en diseño, no aplicar correctamente los procedimientos pertinentes, etc., esta es una de las categorías en la que se podrían encontrar la causa raíz de fallo.

## **CAUSAS LATENTES O DEL SISTEMA**

Todos aquellos problemas que aunque nunca hayan ocurrido, tiene cierta factibilidad de su ocurrencia. Solo su erradicación nos garantizara que la falla no se repita en el equipo estudiado o en uno similar. Se basa en que el origen de todos los problemas son las decisiones u omisiones a nivel de sistema. Entre estos tenemos: falta de procedimientos para arranque o puesta fuera de servicio, personal que realice trabajos de reparación sin que cuente con el adiestramiento, diseño inadecuado e inapropiados procedimientos de operación entre otros.

## **II.5 DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS**

Las consecuencias de una falla pueden ir desde la pérdida de producción, pasando por las horas hombre improductivas de operaciones, hasta la degradación y rotura de las propias máquinas u equipos. Una alta disponibilidad no implica necesariamente una alta confiabilidad, pero una alta confiabilidad si implica una buena disponibilidad y seguridad, en la medida que la maquinaria, el proceso o equipos, presentan una baja probabilidad de falla. Para el caso de la maquinaria, la confiabilidad será el producto de la confiabilidad individual de cada sistema que la compone.

### **II.5.1. TEORÍA DE FALLAS**

Es indispensable conocer cómo se producen los fallos y en la teoría se pueden apreciar tres etapas:

Fallos iniciales: en esta primera etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que descende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes razones como equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, errores de

diseño del equipo, desconocimiento del equipo por parte de los operarios o desconocimiento del procedimiento adecuado.

Fallos normales: en esta segunda etapa se presentan una tasa de errores menores y constantes. Los fallos no se producen debido a causas inherentes al equipo, sino por causas aleatorias externas. Estas causas pueden ser accidentes fortuitos, mala operación, condiciones inadecuadas u otros.

Fallos de desgaste: por último en esta etapa se caracteriza por tener una tasa de errores rápidamente crecientes. Los fallos se producen por desgaste natural del equipo debido al transcurso del tiempo. Ésta es una de las formas que se han tipificado sobre los modos de fallas de equipos, sistemas y dispositivos.

### II.5.1.1. PROGRAMA DE DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS

El programa de detección analítica de fallas, proporciona las habilidades y destrezas para la solución y prevención de problemas en ambientes productivos, acompañando los esfuerzos de mejoramiento continuo.

Es indispensable contar invariablemente con un inventario de conservación, el cual es un listado de los recursos por atender, sean éstos equipos, instalaciones o construcciones. El análisis de falla es un examen sistemático de la pieza dañada para determinar la “**causa raíz**” de la falla y usar esta información para mejorar la confiabilidad del producto.

Este tipo de análisis de falla está diseñado para:

- Identificar los modos de falla (la forma de fallar del producto o pieza)
- Identificar el mecanismo de falla (el fenómeno físico involucrado en la falla)
- Determinar la “causa raíz” (el diseño, defecto, o cargas que llevaron a la falla)
- Recomendar métodos de prevención de la falla

### II.5.2. ACR MÉTODO CUALITATIVO PARA EL ANÁLISIS DE FALLAS

El método cualitativo para el análisis de fallas, se aplica en mantenimiento para encontrar las causas que originan las fallas en los procesos, sistemas o equipos mediante técnicas de observación y verificación, entrevistas no estructuradas, lluvia de ideas entre otras. Estos métodos cualitativos son sistemáticos, lógicos y cada uno tiene un procedimiento claro a seguir para encontrar las causas que originaron la falla.

EL ACR es un método cualitativo de análisis de falla que utiliza la lógica sistemática para lograr identificar las causas responsables de una falla. También nos permite identificar la mejor solución para corregir la causa identificada y cómo realizar su

seguimiento, esta metodología se basa, en la deducción y verificación de los hechos para encontrar como se originó la falla, permite aprender de las fallas y eliminar sus causas, en lugar de corregir síntomas.

Por su estructura, el ACR es un proceso que consume recursos y una gran cantidad de tiempo por lo tanto se debe establecer desde un principio si el problema requiere realizar o no un estudio de ACR. Con el fin de saber si una falla requiere de un ACR, se debe evaluar basado en sus consecuencias, por ejemplo: fallas que involucren la integridad de las personas, las inversiones o infraestructura, los equipos o la combinación de varias o todas las anteriores. El objetivo es el de determinar el origen de las causas físicas, humanas y latentes de una falla, la frecuencia con la cual aparece y su impacto que genera, por medio de un estudio minucioso de ciertos factores, circunstancias y diferentes elementos que podrían mitigar o eliminar por completo la fallas una vez tomadas las acciones correctivas que sugiera el análisis mejorando la seguridad, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos de la empresa.

Para llevar a cabo un buen ACR, se debe ir más allá de los componentes físicos de la falla o raíces físicas y analizar las acciones humanas que desataron la cadena de causa efecto que llevó a la causa física, lo cual implica analizar por qué hicieron esto, si se debió a procedimientos incorrectos, especificaciones equivocadas o a la falta de capacitación, lo cual no ayudará a relucir lo que son las raíces latentes, es decir deficiencias en el sistema, que de no corregirse, pueden hacer que la falla se repita nuevamente.

### **II.5.3 TIPOS DE FALLAS**

Este tipo problemas o eventos no deseables pueden ser definidos con precisión como desviaciones de la norma de rendimiento, ahora bien nosotros entendemos por falla a la interrupción de la capacidad de equipo o aditamentos para que realice su función específica. Con esto queremos decir que es el evento o estado inoperable, en el cual o parte del equipo o aditamento, no funcionan o no funcionaría como esta previamente especificado equivale en términos generales a lo que es una avería. Se presentan con mayor frecuencia en los equipos de las plantas de proceso de refinación es por eso que su análisis es muy importante.

Una falla puede ser completa o parcial estos problemas pueden ser “tipificados” por el tipo y el nivel de proceso además de que son frecuentes afectando:

- Componentes/equipos/sistemas
- Desviaciones operacionales/pérdida de eficiencia
- Problemas administrativos
- Eventos aislados de alto impacto (donde se tiende a poner mayor atención)

Para hacer esto es importante entender, que de hecho hay dos tipos de problemas (fallas) con los que nos podemos enfrentar; fallas esporádicas y fallas crónicas en los siguientes dos puntos se dará una breve explicación de cada uno de ellas dando un panorama más amplio.

## FALLAS ESPORÁDICAS

Son una desviación por fuera del rango aceptable de operación normal. Estos eventos son poco frecuentes y no están relacionados entre sí. La podríamos nombrar como una falla repentina, dramática y que es inesperada que algunas veces lleva a todo el proceso a que se detenga y con frecuencia es altamente visible dentro de la unidad de negocios o de la compañía.

Este tipo de falla por lo general tiene un costo muy alto y en general se adelanta a una investigación formal o informal de la causalidad de la misma. Esto incluye elementos tales como: fugas importantes en el proceso, explosiones, incendios, incidentes ambientales graves, muertes o lesiones graves, y paradas de emergencia en las instalaciones. A continuación en la tabla.II.1 se muestran algunos ejemplos de fallas esporádicas.

**Tabla.II.1. Ejemplos de fallas esporádicas**

Fallas esporádicas	Ejemplos
	Fuego
	Explosión
	Relevo de material peligroso a la atmosfera
	Falla de energía
	Personal lesionado
	Corto circuito

## FALLAS CRÓNICAS

Una falla crónica es la falla típica repetitiva que puede afectar las operaciones en el corto plazo o las actividades de mantenimiento pero, no resulta, dramática, no es necesariamente difícil de reparar (pero puede ser difícil de resolver la causa raíz).

Se presentan en los rodamientos, los sellos, las correas, los engranes, los apagados del sistema de control problemas con la unidad, etc. Este tipo de falla tiene un impacto relativamente bajo en la producción, en razón de que la operación relativamente las tolera. Cuando se totalizan en año, llegan a un alto porcentaje del presupuesto general de mantenimiento y a la pérdida de ingresos debido a la baja utilización. En la tabla.II.2 se muestran algunos ejemplos de fallas crónicas.

**Tabla.II.2. Ejemplos de fallas crónicas**

Fallas crónicas	Ejemplos
	Sellos de bombas
	Falla de arrancadores de motores
	Disparo de un variador de velocidad
	Reducción de la capacidad calórica de un intercambiador
	Mantenimiento correctivo
	Controladores en manual comparado con automático
	Almacén sin refacciones

## II.6. ACCIDENTES E INCIDENTES

Estos dos sucesos también suelen afectar las instalaciones de refinación es por ello que el ACR nos ayuda en la identificación de ellos. En todas las actividades diarias del trabajo los riesgos están latentes por lo cual es importante estar atentos y tomar las medidas pertinentes.

Podemos decir que un “accidente” es aquel suceso repentino no deseado que produce consecuencias negativas ya sea en las personas, instalaciones y equipos de proceso.

Y un “incidente” se define como el suceso repentino y que también es no deseado ocurre por las mismas causas que se presentan los accidentes, solo que por cuestiones del azar no desencadena lesiones en las personas, daños en las instalaciones, el proceso y ambiente. Además es una alarma que es necesaria de atender, es la oportunidad de identificar y controlar las causas básicas que lo generaron, antes de que ocurra un accidente.

La verdadera prevención se logra investigando los incidentes y adoptando las recomendaciones que se generan de la investigación, ya que siempre que aparece un accidente, han ocurrido varios incidentes que alertaron sobre la situación de riesgo.

### II.6.1. INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE ACCIDENTES E INCIDENTES

La investigación y el análisis de accidentes e incidentes es un método utilizado para determinar el por qué un evento resulta o está a punto de suceder ocasionando lesiones, enfermedades o daños a los procesos. Los hallazgos de una investigación bien hecha permitirán establecer las acciones correctivas necesarias para prevenir recurrencia tanto en el corto como en el largo plazo. La investigación se debe realizar tan pronto como ocurra el evento y en la medida de lo posible en el sitio donde ocurrió.

Para llevar a cabo una investigación es fundamental centrarse en la búsqueda de las causas y nunca en los culpables es una de las cosas en las cuales el ACR toma partida, es necesario evitar los prejuicios en la toma de datos. Se debe adoptar como

causas de los accidentes o incidentes, los hechos demostrados y que no solo apoye en suposiciones.

## II.6.2. ELEMENTOS DE LOS ACCIDENTES E INCIDENTES

En los procesos antes de que se entre a determinar las causas que dan origen a los accidentes e incidentes, identifiquemos algunos elementos en donde se ven involucrados. Al estudiar el problema lo primero que debemos entender es que estos eventos no son el producto de la fatalidad o del destino. Los accidentes e incidentes siempre son causados; nunca son casuales. Es por ello que regularmente en la accidentalidad se encuentran innumerables causas y a este fenómeno se le dará el nombre de multicausalidad. Con el fin de entender mejor las causas que intervienen en estos problemas, será de gran ayuda considerar los principales elementos involucrados en la operación de los procesos de trabajo:

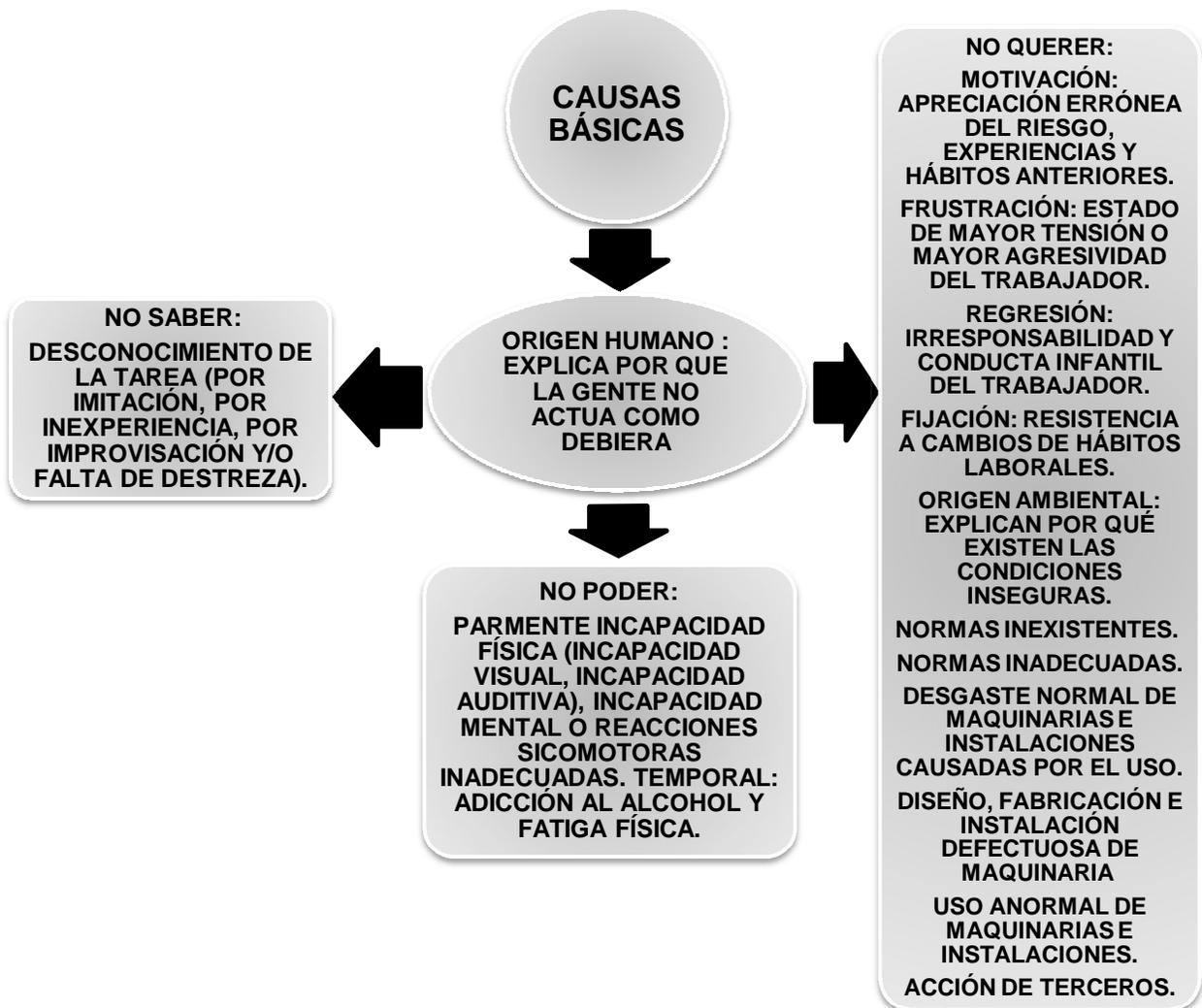
- **PERSONAS:** Este elemento incluye tanto al personal operativo como administrativo. Es necesario recordar, en caso de accidente, la relación existente entre los trabajadores y la gerencia, para las verdaderas causas que influyeron en el accidente
- **EQUIPOS:** Se refiere a las máquinas y herramientas con las cuales labora la gente (operarios o administrativos). Este elemento ha sido una de las fuentes principales de accidente y uno de los blancos de las leyes relacionadas con la protección y la capacitación de los trabajadores
- **MATERIALES:** El material con que la gente labora, que usa o fabrica, es otra de las fuentes de los accidentes. En las estadísticas se presenta como una de las causas de más alta incidencia. Los materiales pueden ser: filosos, pesados, tóxicos, energizados, calientes, entre otros, lo cual puede llevar a la ocurrencia del accidente
- **AMBIENTE:** El ambiente está constituido por todo lo material o físico que rodea a la gente, el aire que respira, el clima y los espacios. El ambiente está relacionado con la luz, el ruido y las condiciones atmosféricas. Este elemento es otro participante en las causas de la accidentalidad, pues el hombre durante su trabajo regularmente lo altera

## II.6.3. CAUSAS DE LOS ACCIDENTES E INCIDENTES

Estos problemas ocurren porque la gente comete actos incorrectos o porque los equipos, herramientas, maquinarias o lugares de trabajo no se encuentran en condiciones adecuadas. El principio de la prevención de los accidentes e incidentes, señala que tienen causas que los originan y que se pueden evitar al identificar y controlar las causas que los producen dentro de las cuales destacan las causas directas fig.II.6 y las causas básicas fig.II.7.



*Fig.II.6. Causas directas*  
*Fuente: Diseño propio*  
*Fecha: 18 de diciembre de 2013*



*Fig.II.7. Causas básicas*  
*Fuente: Diseño propio*  
*Fecha: 18 de diciembre de 2013*

No todas las acciones inseguras producen accidentes e incidentes, pero la repetición de un acto incorrecto puede producir uno de ellos. Además todas las condiciones inseguras producen estos problemas, pero la permanencia de una condición insegura en un lugar de trabajo puede producir un accidente o un incidente.

### II.6.4 DINÁMICA DE UN ACCIDENTE

La dinámica de un accidente es parecido a un queso suizo modelo que hiciera famoso el suizo James Reason en la fig.II.8 se pueden observar algunos elementos que se ven envueltos para que un accidente se produzca.

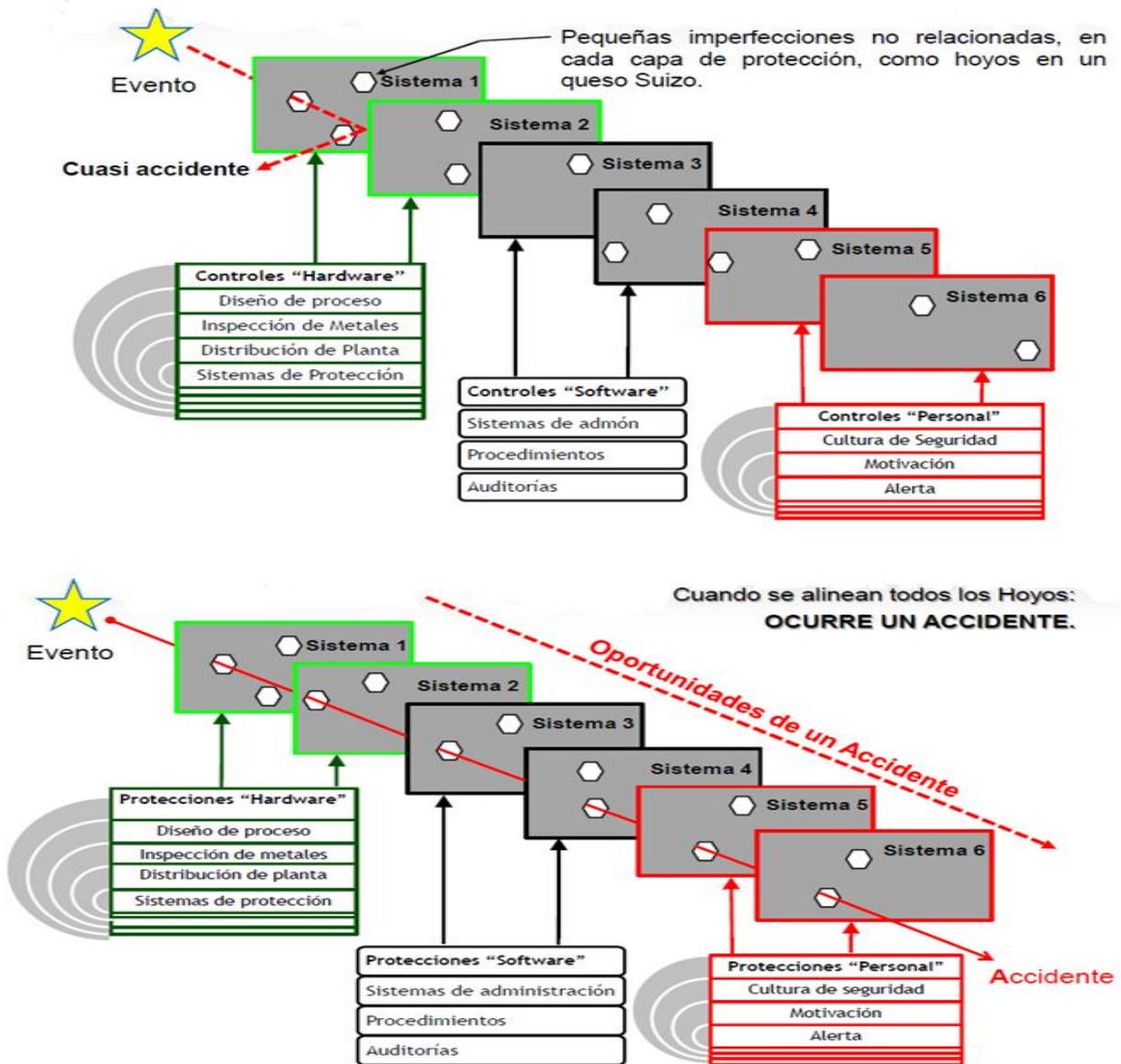


Fig.II.8. Dinámica de un accidente

Fuente: [www.ref.pemex.com](http://www.ref.pemex.com)

Fecha: 30 de abril de 2014

## II.7. IMPORTANCIA E IMPACTO LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL ACR

Generalmente cuando ocurre un evento no deseado (fallo, incidente/accidente) esto es percibido porque genera ciertas manifestaciones o fenómenos de fácil localización (síntomas), no así las causas de los mismos (causa raíz), mientras más complicado sea el sistema, mayor será la dificultad de localizar el origen de dichas causas, y se podrán atacar las manifestaciones del evento pero no su origen, lo que se traduce en potencialidad de ocurrencia.

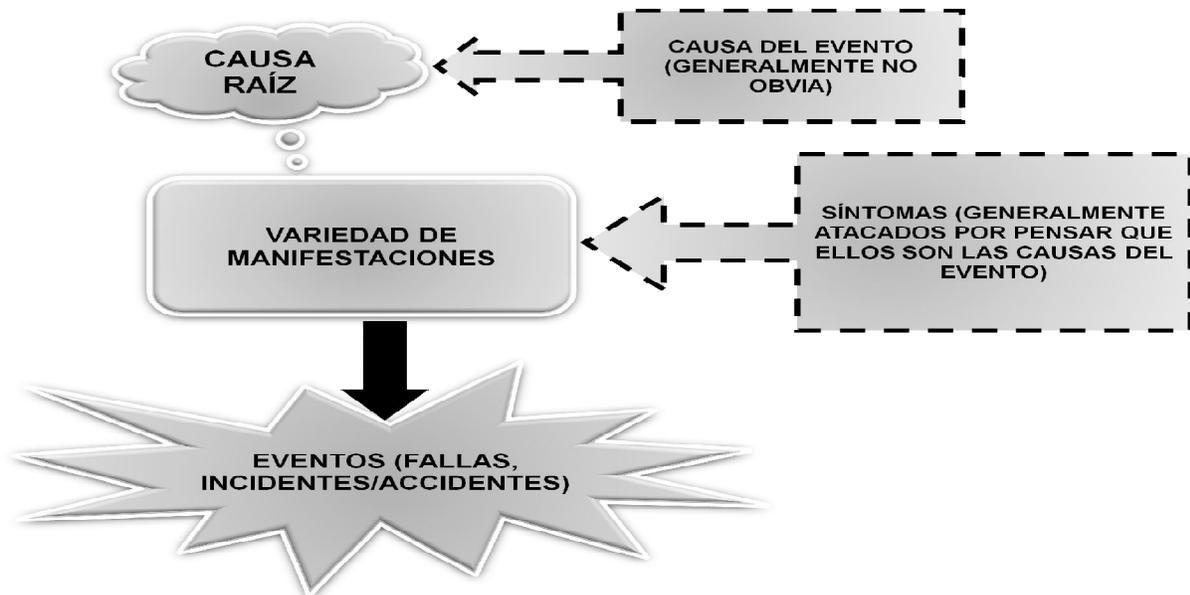


Fig.II.9. Esquema de un evento (fallas, accidentes/incidentes)

Fuente: Diseño propio

Fecha: 11 de diciembre de 2013

Al no hacer un análisis exhaustivo de la eventualidad y sus posibles causas como se ve en la fig.II.9, se está perdiendo la oportunidad de aprovechar esta como un paso para mejorar en la relación costo, producción y confiabilidad.

Cuando el personal responsable de mantener sus sistemas y procesos funcionando se hallan ocupados que no tienen tiempo para identificar las verdaderas causas de los problemas, generalmente sólo (aplican presión sobre la herida) para seguir en movimiento, cuando se trata de un problema menor se dice que se (pone un curita), ya cuando se trata de un problema mayor, se dice que se está aplicando un (torniquete), una metáfora muy usada en inglés dice que se esta tan ocupado extinguiendo fuegos que no podemos buscar el tipo de cerillos.

Posponer la acción correctiva de la causa raíz es común. En la presión de la rutina diaria, los gerentes e ingenieros se hallan con frecuencia imposibilitados de eliminar el problema de fondo, de manera que pueden dedicarse a atender los síntomas, otro

factor que contribuye a retardar la acción respecto a los problemas de fondo, es que se tratan de problemas generalmente aceptables o que son tolerables.

Es por ello que es de suma importancia crear programas tales como el ACR para ayudar a recordarnos que tal vez el programa de mantenimiento preventivo no se ejecuta, asociándolo a la cantidad de eventos no factibles que se presentan en las plantas y esto conlleva a que la situación se convierta en una (cacería de brujas), cada quien buscando culpables y evadiendo responsabilidades.

Se pueden observar casos en los cuales el desarrollo del ACR en una planta de proceso constituye un punto de partida para el mejoramiento del resto de las plantas y de toda la organización, pues las causas raíces descubiertas en una planta después de estudios, se ha encontrado que generalmente son las mismas causas de las otras plantas, permitiendo que al aplicarla para la solución de los principales problemas como son fallas repetitivas, accidentes e incidentes y problemas complejos, da como resultado que en un futuro no ocurra el mismo evento en el área, unidad o planta estudiada ni en ninguna otra, por tal motivo hay quienes llaman al ACR el método para “aprender a aprender”. Al desarrollar la metodología ACR se obtienen beneficios que se plasman en la reducción y mejoramiento en el entorno de estos complejos (refinerías):

- Proporciona la capacidad de reconocer un patrón de fallas y evita la repetición de las mismas
- Aumenta la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los equipos
- Mejora las condiciones de seguridad industrial y evita tiempos improductivos innecesarios
- Disminuye del número de incidentes, reduce los impactos ambientales y los accidentes
- Reduce las frustraciones del personal de mantenimiento y operaciones
- Reducción del número de accidentes/incidentes y fallos
- Disminución de gastos, asociados a estos eventos
- Mejora de la eficiencia, rentabilidad y productividad de los procesos

El ACR es un proceso de gran importancia y rigor técnico para llegar a determinar las verdaderas causas raíz en los elementos que constituyen los complejos de refinación. Durante muchos años esta industria ha arrastrado consigo graves problemas recurrentes u ocasionales de alto impacto que repercuten en la producción y el mantenimiento. Otro factor que funciona como un agravante de estos hechos lo constituye el miedo al cambio o a que se implementen nuevas técnicas. Por lo tanto estos hechos catastróficos seguirán ocurriendo, para luego recurrir a

reparaciones originando un comportamiento reactivo en cuanto a mantenimiento se refiere. El aporte que brinda el ACR consiste en analizar estos eventos logrando una mayor confiabilidad y disponibilidad de las instalaciones.

A continuación se presenta un ejemplo que muestra el beneficio que obtuvo la refinería Lyondell Citgo:

Esta refinería presentó muchos problemas en la unidad de destilación al vacío (construida para el procesamiento de crudo proveniente de la faja del Orinoco Venezuela), pues las dos bombas de succión del fondo de la torre de vacío llegaron a presentar un tiempo medio entre fallos ( $\frac{1}{2}$  fallos/mes), es decir un fallo cada dos meses debido a expansión térmica y corrosividad del producto. En la aplicación del ACR se encontró la raíz del problema en este caso se invirtió \$55202.87 USD con un retorno estimado de \$9867513.11 USD (aprox. 17%) para que no se incurriera nuevamente en este problema, como podemos ver en este ejemplo se ve reflejado uno de los beneficios que se pueden obtener al llevar a cabo correctamente el ACR.

# **CAPÍTULO III**

## **HERRAMIENTAS DE AYUDA PARA EL DESARROLLO DEL ACR**

### III.1. INTRODUCCIÓN A LAS HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DEL ACR

El análisis de un evento no deseado cuenta con diversas herramientas una de ellas es el ACR, como lo hemos venido mencionando está diseñada para ayudarnos a determinar “*qué pasó*” durante un evento no deseado (falla, problema o incidente particular), “*cómo pasó*” y entender “*por qué pasó*”.

Actualmente existen numerosas herramientas para llevar a cabo el ACR, muchas de estas se aplican para situaciones, problemas u objetivos específicos. La mayoría tienen su propia categorización de causas, pero todos son efectivos cuando se usan dentro del alcance para el cual fueron diseñados, algunas de estas son utilizadas como apoyo de otros. Todas estas tienen algo en común, que trabajan mediante la relación de las causas y efectos para encontrar las causas posibles de la falla de una manera organizada, a continuación se nombrarán de manera breve algunas de las herramientas que se utilizan para el desarrollo del ACR.

### III.2. ANÁLISIS DE ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS

La herramienta de análisis del "Árbol Lógico de Fallos", fue desarrollada por ingenieros y utilizada por vez primera en 1962 por H. A. Watson, de Bell Telephone Laboratories, en relación con un contrato de Air Force para evaluar las condiciones de seguridad de los sistemas de tiro de los misiles ICBM Minuteman. Entendieron que la mayoría de accidentes/incidentes resultan de fallas inherentes a un sistema (un sistema consta de personas, equipo, material y factores ambientales), este sistema realiza tareas específicas recomendados, los componentes de un sistema y su ambiente están interrelacionados, y una falla con cualquier parte puede afectar, a partir de ese momento, esta técnica de análisis de riesgos ha sido profusamente utilizada y perfeccionada por parte de instalaciones nucleares, aeronáuticas y espaciales, extendiéndose después su empleo para la evaluación de riesgos a las industrias electrónica, química, petroquímica, entre otras.

El árbol lógico de fallas es considerado una herramienta de la confiabilidad operacional que, permite representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que nos conduce a descubrir el evento indeseable y cuál fue la causa raíz del problema, permite identificar causas relacionadas con equipos, errores humanos o procesos, así mismo, es de gran utilidad para buscar múltiples mecanismos de falla para un mismo evento. Pueden usarse para prevenir o identificar fallas antes de que ocurran, pero se usan con más frecuencia para analizar accidentes o como herramientas investigativas para señalar fallas, al ocurrir un accidente o una falla, se puede identificar la causa raíz del evento negativo, esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del álgebra de Boole, permitiendo determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de fallos básicos de los elementos que intervienen en el y calcular su probabilidad, el cual consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado suceso TOP (top event) en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos para los cuales se puede calcular la probabilidad de fallos, una vez que se completa el árbol de fallos se puede analizar y determinar que combinación de fallas u otras imperfecciones pueden dar al suceso TOP.

### III.2.1 METODOLOGÍA DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS (ÁRBOL DE FALLA)

En esta técnica, se toma como raíz un evento no deseado (evento principal) de un árbol lógico, posteriormente cada situación que pueda causar este efecto es añadido al árbol como una serie de expresiones lógicas. En ocasiones los arboles de fallos se etiquetan con números reales sobre probabilidades de fallo, representando de forma probabilística las fallas, y al combinarle la lógica Booleana permite calcular la confiabilidad de los sistemas representados.

El árbol comúnmente utiliza puertas lógicas (símbolos o conectores lógicos del algebra Booleana), “Y” (and) y “O” (or). El árbol está compuesto de eventos identificados como dentro y fuera (inputs” y “outputs). Algunas de las reglas para el desarrollo de Arboles de Falla son:

- Todos los eventos deben estar conectados por “puertas”.
- No se permiten conexiones entre puertas.
- Debe existir un mínimo de 2 (inputs) por cada (output).

De acuerdo con lo anterior, la construcción del árbol lógico de fallas en un proceso del ACR y consta de los siguientes pasos que se describen:

#### 1- EVENTO

#### 2- MODOS DE FALLA

- Los modos de falla son una descripción más detallada de como ocurrió el evento en el pasado, estos deberán estar basados en hechos. En este paso el análisis del evento son las diferentes fallas que originaron el problema principal y su función es dividir el problema central en cuadros pequeños para hacerlo más manejable

#### 3- HIPÓTESIS

- Las hipótesis son suposiciones que se hacen respecto a la pregunta de cómo pudo suceder determinado evento, estas pueden tener varios niveles de verificación dependiendo de lo asertivo que se requiera

#### 4- VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

- En la verificación de hipótesis se recurren a diversos métodos de validación con los cuales se aprueba la hipótesis propuesta como un hecho con los cuales se clarifica aún más el problema

#### 5- CAUSAS FÍSICAS, HUMANAS Y LATENTES

En la elaboración del árbol lógico de falla se debe efectuar mediante un proceso ordenado, donde las diferentes etapas que lo componen guiaran al grupo de análisis del ACR a encontrar la causa raíz que está originando el problema, la estructura para el análisis de los elementos encontrados en cada una de las etapas genera un análisis combinatorio o ramificado llamado árbol lógico de falla cuya estructura conceptual se presenta en la siguiente fig.III.1.

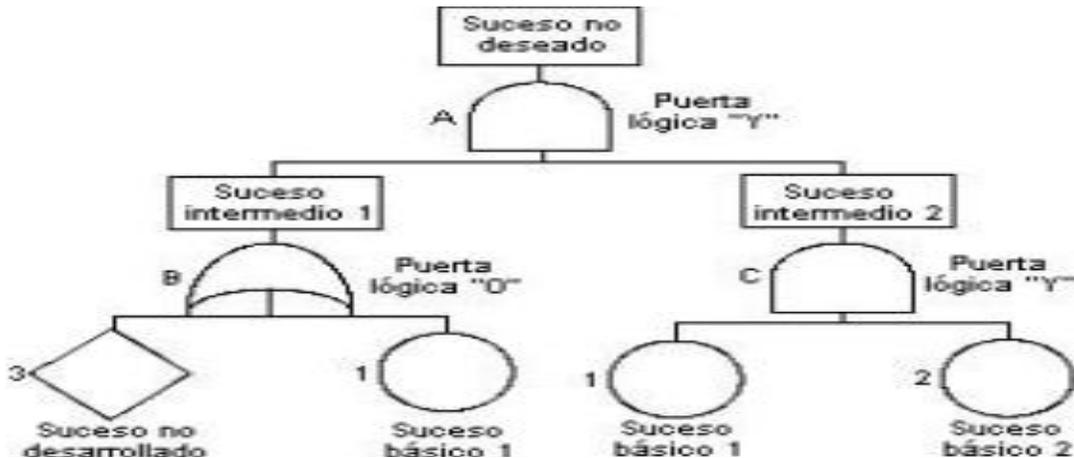


Fig.III.1. Representación gráfica del árbol lógico de fallas

Fuente: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores" Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Fecha: 27 de diciembre 2013

Seguidamente, de manera sistemática y lógica se representan las combinaciones de las situaciones que pueden dar lugar a la producción del "evento a evitar", conformando niveles sucesivos de tal manera que cada suceso esté generado a partir de sucesos del nivel inferior, siendo el nexo de unión entre niveles la existencia de "operadores o puertas lógicas". El árbol se desarrolla en sus distintas ramas hasta alcanzar una serie de "sucesos básicos", denominados así porque no precisan de otros anteriores a ellos para ser explicados. También alguna rama puede terminar por alcanzar un "suceso no desarrollado" en otros, sea por falta de información o por la poca utilidad de analizar las causas que lo producen.

Los nudos de las diferentes puertas y los "sucesos básicos o no desarrollados" deben estar claramente identificados. Estos "sucesos básicos o no desarrollados" que se encuentran en la parte inferior de las ramas del árbol se caracterizan por los siguientes aspectos:

- Son independientes entre ellos
- Las probabilidades de que acontezcan pueden ser calculadas o estimadas

Para ser eficaz, un análisis por árbol lógico de fallas debe ser elaborado por personas profundamente conocedoras de la instalación o proceso a analizar y que a su vez conozcan el método y tengan experiencia en su aplicación; por lo que, si se precisa, se deberán constituir equipos de trabajo pluridisciplinarios (técnico de seguridad, ingeniero

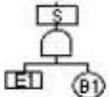
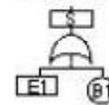
del proyecto, ingeniero de proceso, etc.) para proceder a la reflexión conjunta que el método propicia.

### III.2.2. DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS

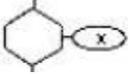
Fijado el "evento que se pretende analizar" en el sistema, se procede descendiendo escalón a escalón a través de los sucesos inmediatos o sucesos intermedios hasta alcanzar los sucesos básicos o no desarrollados que generan las situaciones que, conectadas, contribuyen a la aparición del "suceso no deseado".

Para la representación gráfica de los árboles lógicos de fallos y con el fin de normalizar y universalizar la representación se han elegido ciertos símbolos que se representan en la tabla.III.1.

**Tabla.III.1. Símbolos utilizados para la representación del árbol lógico de fallas**

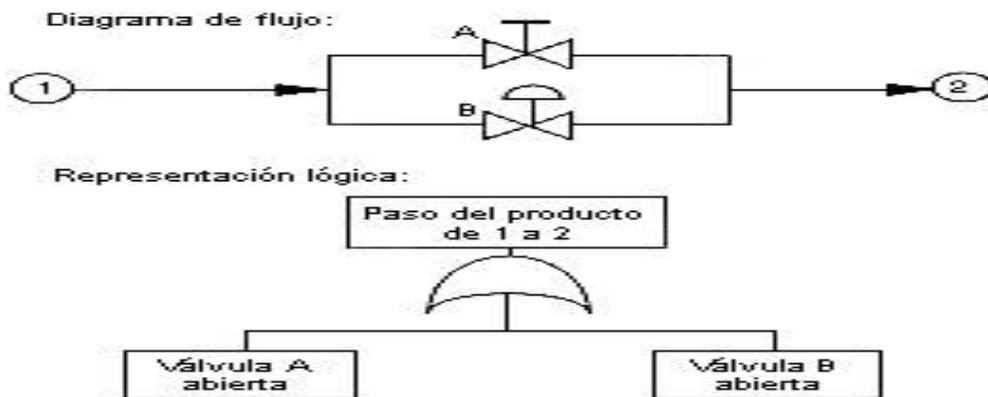
Símbolos	Significado del símbolo
	Suceso básico.- No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de evento básico
	Suceso no desarrollado.- No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés
	Suceso intermedio.- Requiere de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Así mismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol
	<p><b>PUERTA "Y"</b></p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá sí, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1, B1)</p>
	<p><b>PUERTA "O"</b></p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá sí ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1, B1)</p>
	Símbolo de transferencia.- Indica que el árbol sigue en otro lugar
	Puerta "y" prioritaria.- El suceso de salida ocurrirá sí, y sólo sí todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una elipse dibujada a la derecha de la puerta

**Tabla.III.1. (Continuación) Símbolos utilizados para la representación del árbol lógico de fallas**

Símbolos	Significado del símbolo
	Puerta "o" exclusiva.- El suceso de salida ocurrirá sí lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas
	Puerta de inhibición.- La salida ocurrirá sí, y solo sí lo hace su entrada, y además se satisface una condición dada (x)

Si alguna de las causas inmediatas contribuye directamente por sí sola en la aparición de un suceso anterior, se conecta con él mediante una puerta lógica del tipo "O". Un ejemplo de esto se describe a continuación.

En el diagrama de flujo, el producto pasará del punto 1 al punto 2 si está abierta la válvula manual A o si está abierta la válvula neumática B, y su representación lógica es la especificada en la fig.III.2.



*Fig.III.2. Ejemplo de un puerta lógica tipo "O"*

*Fuente: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores" Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo  
 Fecha: 30 de diciembre 2013*

Si son necesarias simultáneamente todas las causas inmediatas para que ocurra un suceso, entonces éstas se conectan con él mediante una puerta lógica del tipo "Y".

Por ejemplo:

En el diagrama de flujo representado, tienen que estar abiertas simultáneamente las válvulas A y B para que pase el producto del punto 1 al 2, y su representación lógica es la especificada en la fig.III.3.

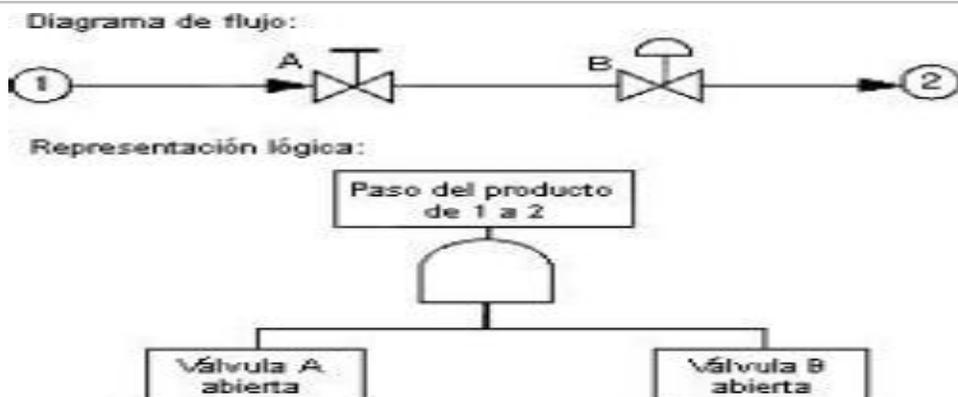


Fig.III.3. Ejemplo de una puerta lógica tipo "Y"

Fuente: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores" Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Fecha: 30 de diciembre 2013

Procediendo sucesivamente de esta forma, se sigue descendiendo de modo progresivo en el árbol hasta llegar a un momento en que, en la parte inferior de las distintas ramas de desarrollo, nos encontramos con sucesos básicos o no desarrollados, es entonces cuando se ha completado la confección del árbol de fallas.

### III.3. ÁRBOL DE OMISIONES Y RIESGO ADMINISTRATIVOS (MORT)

MORT surgió de un proyecto realizado en la década de 1970. El trabajo tuvo como objetivo proporcionar a la industria nuclear, con un programa de gestión de riesgos competente para lograr altos estándares de salud y seguridad. Representa también un formato para la valoración de la calidad de los programas de seguridad.

Este método utiliza un enfoque similar al árbol de fallas, pero con la particularidad de ser aplicado a la estructura utiliza un diagrama de árbol de riesgos omitidos o inadvertidos para identificar las causas raíz., MORT utiliza símbolos que son similares pero no idénticos a aquellos usados en los análisis del árbol de fallas. Puesto que los símbolos del árbol de fallas constituyen el objeto de un código ANSI con diagramas lógicos y símbolos gráficos, sus variaciones pueden ser consideradas de escasa importancia

#### III.3.1 ENFOQUE GENERAL DEL MORT

MORT asume que un evento no deseado incidente/accidente ocurre cuando existe contacto entre un agente dañino con una persona o instalación. Este contacto ocurre debido a fallas en las medidas preventivas o bien como un evento desafortunado pero aceptable de un riesgo que ha sido evaluado adecuadamente y que ha sido asumido.

La metodología MORT siempre evalúa todas las relaciones causas-efecto que pueden conducir a una falla, sin establecer ninguna hipótesis en el sentido de que un riesgo debe ser asumido o aceptado. El análisis MORT está dirigido a identificar problemas en los procedimientos de trabajo/proceso y deficiencias en las barreras protectoras (CONTROLES) asociadas; incluyendo en este análisis las etapas de: planeación, diseño, operación, control, mantenimiento, capacitación, políticas, etc.

Para utilizar MORT se debe primeramente identificar los episodios clave en la secuencia de los acontecimientos. Cada episodio se puede caracterizar como:

- Un objetivo vulnerable expuesto a
- Un agente de daño en él
- Ausencia de barreras adecuadas

Para identificar los episodios claves, se debe de realizar previamente un análisis de las barreas protectoras, lo que permite enfocar el análisis a los aspectos más relevantes de la secuencia de eventos. La metodología MORT orienta el análisis en forma de diálogo con preguntas genéricas, entre el investigador y la situación específica que se está analizando. El analista actúa como un intérprete entre MORT y la situación (incidente/accidente) sujeta a investigación. Las preguntas se realizan en forma secuencial de tal manera que se puedan identificar los hechos que rodean el incidente/accidente, descartando las preguntas que no sean relevantes para la investigación.

El proceso MORT es más bien como un diálogo entre preguntas genéricas y la situación que se esté investigando, las preguntas se dan en una secuencia en particular la cual es diseñada para ayudar a aclarar los hechos que rodearon al incidente.

La metodología MORT, usa una Carta o Diagrama de Árbol, que actúa como un listado de verificación que permite enfocarse con los aspectos relevantes que se identifican en el proceso de investigación, tomando notas resumidas en dicho diagrama sobre los aspectos que aparecen y que se evalúan en esta metodología. Para simplificar esta técnica, se usan colores que señalan la importancia de los aspectos revelados, y se muestran en la tabla.III.2 y son los siguientes:

**Tabla.III.2. Uso de colores que señalizan los aspectos revelados**

<b>Rojo</b>	Cuando se identifica un problema
<b>Verde</b>	Cuando un aspecto ha sido evaluado satisfactoriamente como relevante
<b>Azul</b>	Cuando se piensa que un aspecto es relevante pero no se tiene la información suficiente para evaluarlo adecuadamente

Adicionalmente, los aspectos que a través de la metodología MORT se han identificados como irrelevantes, deben ser marcados con una “X” para demostrar que han sido evaluados.

### III.3.2. ESTRUCTURA MORT

El árbol de fallas MORT mostrado en la fig.III.4, fue desarrollado por el Departamento de Energía de USA, para análisis de accidentes nucleares y evalúa los factores críticos que participan en el accidente bajo la siguiente estructura:

- Descripción del evento. El evento superior en MORT es etiquetado como "Pérdidas", abajo están sus dos causas alternativas: (1) Descuidos y Omisiones, o (2) Riesgos Asumidos.
- Las pérdidas pueden aumentar a partir de dos fuentes distintas: los riesgos que han sido identificados y aceptados correctamente (llamados riesgos asumidos) y los riesgos que no han sido administrados correctamente (también llamados daños y omisiones).
- Factores específicos de control del riesgo. Todos los factores que contribuyen en la secuencia del accidente son tratados como daños y omisiones al menos que ellos sean transferidos al ramal Riesgos Asumidos.
- Factores administrativos del sistema de respuesta a emergencias por accidentes.
- Barreras de control para limitar el accidente, las condiciones operativas, la supervisión y el desempeño.
- Cadena de eventos, eventos previos.
- Análisis de condiciones de riesgo.
- Requerimientos específicos de seguridad.
- Recopilación de Información técnica, en los siguientes aspectos:
  - Mantenimiento
  - Inspección
  - Análisis de seguridad
  - Servicios
  - Respuesta a emergencias
  - Factores humanos
  - ¿Qué sucedió? y ¿Por qué sucedió?

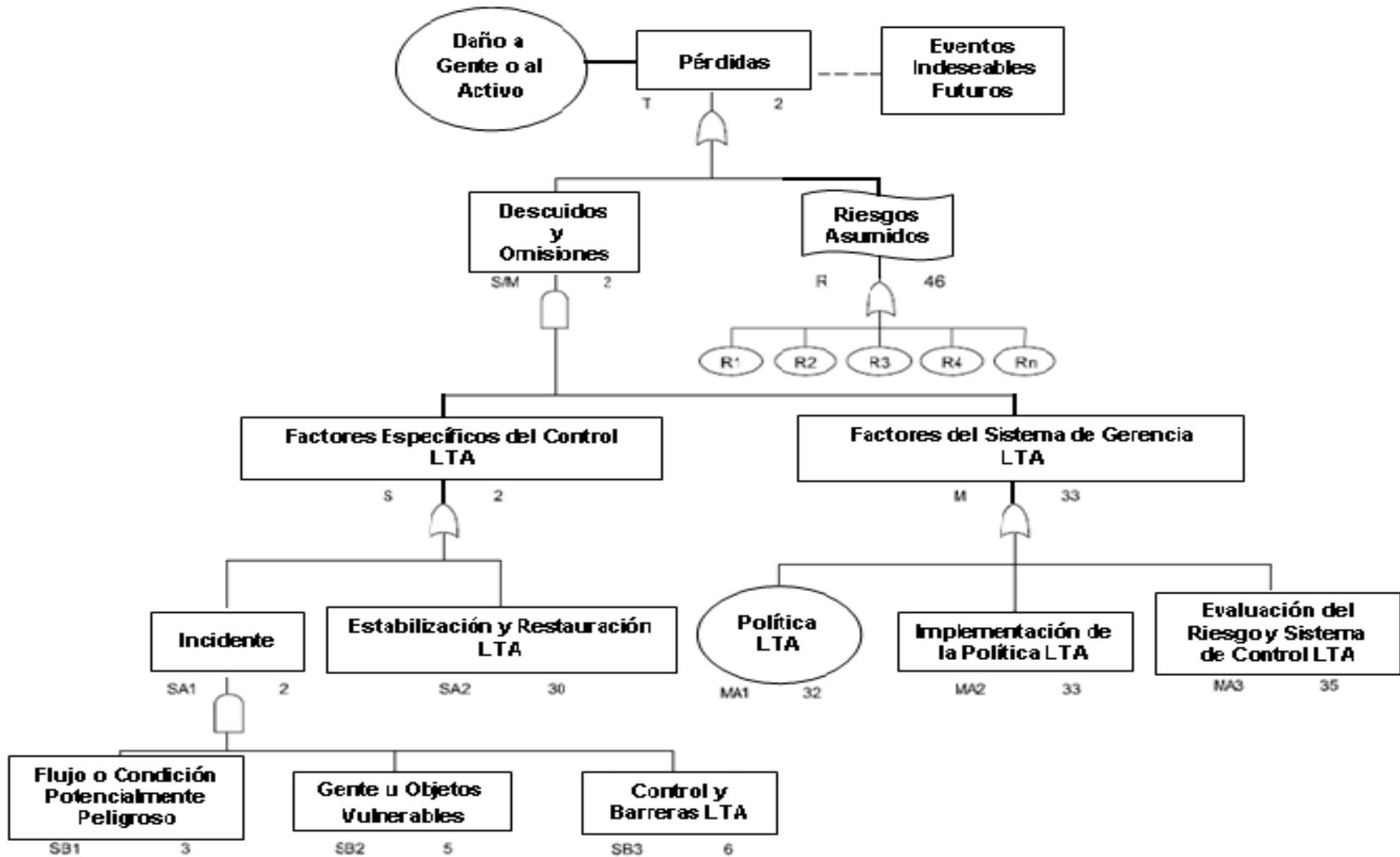


Fig.III.4. Estructura del Diagrama MORT

Fuente: NRI MORT Manual del Usuario para su uso en la Supervisión de la Gestión de Riesgos y diagrama de árbol lógico analítico

Fecha: 13 de enero 2014

La investigación de accidentes se lleva a cabo mediante un proceso iterativo en donde:

- Se recopila información y evidencias
- Se analiza la información y las evidencias
- Se formulan hipótesis
- Se recopila la información adicional que se requiere para probar y/o desechar las hipótesis
- Se obtienen conclusiones
- Se elabora el reporte

Durante la recopilación de la información adicional se buscarán evidencias físicas con soporte de laboratorio, para identificar si existieron:

- Defectos por manufactura
- Defectos causados por el ambiente
- Defectos causados por fuerzas externas
- Defectos de construcción

Los resultados de un análisis de MORT son:

- La creación de nuevas líneas de investigación
- Visibilidad de los factores causales
- Aumento en la rigurosidad de la investigación

### **III.4. HERRAMIENTA KEPNER-TREGOE PARA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y TOMA DE DECISIONES**

La toma de decisiones Kepner-Tregoe es una metodología estructurada para la recolección de información y la priorización y evaluación. Fue desarrollado por Charles H. Kepner y Benjamín B. Tregoe en la década de 1960.

Se trata de un modelo racional que es muy respetado en los círculos de gestión empresarial. Un aspecto importante de la toma de decisiones Kepner-Tregoe es la evaluación y priorización de los riesgos.

Así que la idea no es encontrar una solución perfecta, sino más bien la mejor opción posible, basada en realidad el logro de los resultados. Se comercializa

como una manera de hacer decisiones imparciales en que se dice para limitar los sesgos conscientes e inconscientes que atraen la atención de los resultados. La decisión para seleccionar dicha alternativa, se basa en conseguir un objetivo determinado con mínimas consecuencias negativas. La técnica parte del supuesto que indica que todos los problemas tienen la misma estructura, lo que invita a racionalizar su proceso de solución. La técnica presenta cuatro patrones básicos de pensamiento:

- **Evaluación de situaciones** ¿Qué está ocurriendo? Permite evaluar, aclarar, seleccionar e imponer orden en una situación confusa. Se utiliza para aclarar la situación, esbozar las preocupaciones y elegir una dirección.
- **Análisis de problemas** ¿Por qué ocurrió esto? Permite relacionar un suceso con su resultado, una causa con su efecto aquí se define el problema y es causa determinada.
- **El análisis de decisiones** ¿Qué curso de acción hay que tomar? Permite hacer decisiones razonadas. las alternativas son identificados y un análisis de riesgo realizado por cada.
- **Análisis del problema potencial** ¿Qué nos espera más adelante? Permite mirar en dirección al futuro que nos depara. se propone la mejor de las alternativas analizadas, contra los problemas potenciales y las consecuencias y acciones negativas para minimizar el riesgo.

La explicación de la técnica que se presenta, (K-T por sus autores), expone cómo realizar el segundo patrón de la solución de problemas; el análisis de problemas. Para los autores, un problema (falla o evento no deseado) es algún tipo de desviación de una norma, que alguien considera importante y necesario restablecer. Es algo que ha salido mal inexplicablemente y su detección se inicia con una noción clara de lo que debiera suceder. El problema se especifica haciendo preguntas tanto del objeto afectado como del defecto mismo mediante cuatro dimensiones:

- 1- La identidad de la falla (¿Qué?)
- 2- El lugar donde ocurre (¿Dónde?)
- 3- Su ubicación en el tiempo (¿Cuándo?)
- 4- La magnitud o tamaño (¿Cuánto?)

Contrastándose cada una de ellas con “LO QUE ES” y “LO QUE NO ES” o con lo que “PUDIERA SER” pero “NO ES”. La ventaja más importante de la técnica es la sistematización del análisis de los problemas, que de acuerdo a lo que indican los autores, normalmente se analizan los problemas por intuición o sentido común pero no de forma estructurada. La desventaja de esta técnica radica en la necesidad del conocimiento profundo del sistema objeto de estudio. La técnica es recomendable para identificar, describir y analizar problemas operativos de tipo técnico, proporcionando un

medio sistemático para extraer la información esencial de una situación problemática y hacer a un lado la información irrelevante o confusa.

### III.4.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA EN LA HERRAMIENTA KEPNER-TREGOE

El análisis del problema comienza con la definición del problema. El equipo que está a cargo de la solución del problema no puede pasar por alto este paso crítico. La incapacidad para comprender exactamente lo que es el problema a menudo resulta en pérdida de tiempo precioso. Muchos que atacan los problemas con inmadurez consideran este paso como un esfuerzo inútil, ya que saben lo que están haciendo y esto es el grave error cometido por muchos. Nociones preconcebidas a menudo resultan en una duración de corte final mayor e incluso la extensión en el corte debido a un pobre juicio. Ya que la gestión de problemas es de por sí un ejercicio de equipo, es importante tener una comprensión del problema en el grupo.

Una mejor definición del problema debe incluir más información. Un buen modelo para formalizar las declaraciones de todo tipo es método GQM (Goal Question Metric). Da como resultado una declaración con un objetivo claro, un propósito y un enfoque.

Cuando se está desarrollando una definición del problema se recomienda utilizar la técnica de "5 porqués" para llegar al punto en que no hay más explicación para el problema. Utilizando 5 porqués con K-T sólo acelera el proceso.

#### III.4.1.1. DESCRIBIR EL PROBLEMA

Con una definición clara del problema, el siguiente paso es describir el problema en detalle. La tabla.III.3 proporciona una buena plantilla para esta actividad y describe la hoja de trabajo básico que se utiliza en el proceso.

**Tabla.III.3. Plantilla para describir el problema**

Es		Puede ser pero no es	Diferencias	Cambios
Que	Falla del sistema	Sistemas similares/situación sin fallas	?	?
Donde	Ubicación de la falla	Otras ubicaciones que no fallaron	?	?
Cuando	Momento de la falla	Otras veces cuando la falla no ocurrió	?	?
Extensión	Otras fallas del sistema	Otras sin falla	?	?

En la hoja se describen los cuatro aspectos de un problema: qué es, dónde se produce, cuando se produjo, y la extensión en que se produjo. La columna (Es) proporciona espacio para describir en detalle sobre el problema - lo que el problema (Es). La columna (Podría ser, pero no es) ofrece un espacio para listar detalles relacionados, pero excluidos - lo que el problema (Podría ser pero no es). Estas dos columnas

ayudan en la eliminación de suposiciones "intuitiva pero incorrecta" sobre el problema. Con las columnas uno y dos completas, la tercera columna ofrece espacio para detallar las diferencias entre el (Si) y que (Podría ser pero no es). Estas diferencias forman la base de la solución de problemas. La última columna proporciona espacio para enumerar todos los cambios realizados que podrían explicar las diferencias.

Siguiendo el enfoque de paso a paso de la toma de decisiones K-T permite el uso de las habilidades de pensamiento crítico en la consideración de muchos factores posibles que pueden ser de vital importancia en la toma de la decisión.

### III.4.1.2 DETERMINAR LAS CAUSAS POSIBLES

Cualquiera que haya pasado tiempo en la solución de problemas sabe ver "lo que ha cambiado desde que trabajó" y empezar a solucionar problemas mediante el control de los cambios. El problema es que muchos cambios pueden ocurrir, y que complica las cosas. El análisis de problemas puede ayudar aquí por la descripción de lo que el problema es y lo que el problema podría ser, pero no lo es. Con la hoja de trabajo completa, algunas posibles soluciones nuevas se hacen evidentes.

**Prueba de la causa más probable:** Con una lista corta de posibles causas (recientes cambios evaluados y convertidos en una lista), el siguiente paso es pensar sobre cada posible problema. La siguiente ayuda puede contribuir en este proceso. Haga la pregunta: "Si \_\_\_\_\_ es la causa raíz de este problema ¿explica el problema (Es) y cuál problema (Podría ser, pero no lo es)?" Si esta respuesta potencial es la causa raíz, entonces la solución potencial tiene que "mapear hacia" o "encajar en" todos los aspectos de la hoja de trabajo de análisis de problemas. Utilice una hoja de trabajo como la mostrada a continuación tabla.III.4 para ayudar a organizar las ideas en torno a las posibles soluciones.

**Tabla.III.4. Hoja de trabajo de análisis de problemas**

Causa Raíz Potencial:	Verdad si:	¿Causa raíz probable?
-----	-----	-----
-----	-----	-----

### III.5. "5" PORQUÉS PARA RESOLVER PROBLEMAS

Inventado en 1930 por Kiichiro Toyoda y se hizo popular en la década de 1970 por el sistema de producción Toyota. La estrategia de 5 porqués implica observar cualquier problema y preguntar: "¿Por qué?" y "¿Qué causó este problema?" Six Sigma, es un sistema de gestión de calidad (SGC), y utiliza la herramienta de los "5 porqués" en la fase de análisis la cual nos permite Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar (DMAIC). La idea es simple. Al plantear la pregunta "¿Por qué?" se puede separar los síntomas de las causas de un problema. Esto es fundamental ya que los síntomas suelen enmascarar las causas de los problemas. Teniendo una efectiva clasificación de

incidentes, basar las acciones en los síntomas es la peor práctica posible. Los 5 Porqués ofrece algunas ventajas reales en cualquier nivel de madurez:

**Simplicidad.** Es fácil de usar y no requiere de las matemáticas o herramientas avanzadas.

**Eficacia.** Sin duda ayuda a separar rápidamente los síntomas de las causas e identificar la causa raíz de un problema.

**Exhaustividad.** Ayuda a determinar las relaciones entre las diversas causas del problema.

**Flexibilidad.** Funciona bien solo y cuando se combina con otros para mejorar la calidad y las técnicas de resolución de problemas.

**Atractivo.** Por su propia naturaleza, fomenta y produce el trabajo en equipo y equipos dentro y fuera de la organización.

**De bajo costo.** Se trata de una guía, centrada en el ejercicio del equipo. No hay costos adicionales.

A menudo la respuesta al primer "por qué" descubre otras razones y genera otro "por qué". A menudo se requieren cinco "por qué" para llegar a la causa raíz del problema. Es probable que encuentre lo que le piden más o menos en 5 "por qué" en la práctica.

### III.5.1. CÓMO UTILIZAR LOS 5 PORQUÉS

Esto son los pasos que debemos seguir para la utilización de la herramienta de los "5" porqués para llevar a cabo el ACR:

- 1- Reunir a un equipo de gente experta en el elemento de la configuración que está fallando. Incluir especialistas de áreas relacionadas y usuarios del sistema en análisis si fuese necesario.
- 2- En un tablero de presentación escribir una descripción de lo que sabe sobre el problema. Trate de documentar el problema y describir lo más completo posible. Perfeccionar la definición con el equipo. Llegar a un acuerdo sobre la definición del problema en cuestión.
- 3- Un miembro del equipo pregunta "¿Por qué?" el problema descrito puede ocurrir, y escribe la respuesta por debajo de la descripción del problema.
- 4- Si la respuesta dada a partir de 3 (arriba) no resuelve el problema, debe repetir los pasos 3 y 4 hasta que lo haga.

- 5- Si la respuesta dada a partir de 3 (arriba), parece probable que para resolver el problema, asegúrese de que el equipo está de acuerdo e intentar una resolución con la respuesta sea el siguiente ejemplo ver fig.III.5.

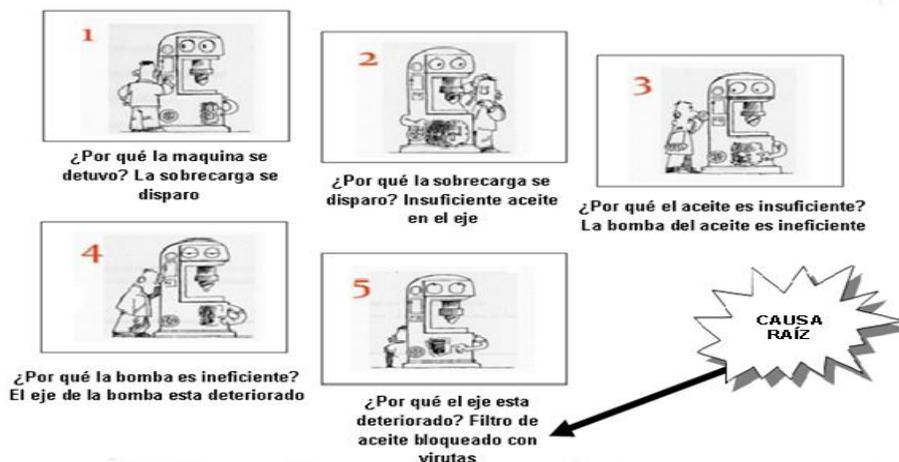


Fig.III.5. Esquema de la práctica de los 5 porqués  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 19 de enero de 2014

### III.5.2 EL DOMINIO DE LOS 5 PORQUÉS

Es de suma importancia basar las causas raíz propuestas (respuesta al "por qué") en la observación directa y no en la especulación o la deducción. Si no se puede ver u observar el "por qué" de primera mano, entonces sólo se está adivinando. Uno de los problemas comunes de quienes utilizan los 5 porqués es caer en conjeturas en su informe.

Es evidente que el adivinar es contraproducente. Gente experimentada en la técnica exige, la precisión preguntando los 5 porqués de nuevo para cada propuesta para la causa raíz sólo que esta vez preguntando por qué el equipo piensa que la propuesta de la causa raíz es la correcta.

Para validar las potenciales causas raíz que están bajo su control, puede aplicar las validaciones siguientes a sus respuestas o causas raíz. Haga las siguientes preguntas para cada posible causa raíz identificada a todos los niveles de los 5 porqués:

- ¿Hay alguna prueba (algo que se puede medir u observar) para apoyar esta determinación de causa raíz?
- ¿Hay alguna historia o el conocimiento que indique que la posible causa raíz en la actualidad podría producir el problema?
- ¿Hay algo "por debajo" de la posible causa raíz que podría ser una causa más probable?

- ¿Hay algo que esta posible causa raíz requiere para producir el problema?
- ¿Hay alguna otra causa que pudiera producir el mismo problema?

Si se agrega a estas preguntas validadas y los resultados a la descripción del problema y las preguntas y respuestas, se producirá una indicación mucho más clara del problema y es posible identificar otras posibles soluciones. Si se diagrama el proceso, el resultado final será con un árbol de factores que conducen al problema. Incluso si usted no llegar a una resolución, la comprensión de la cuestión o el problema es mucho mayor, a menudo ofrece caminos para un diagnóstico más profundo.

### III.6. DIAGRAMA DE ISHIKAWA O “ESPINA DE PESCADO”

El diagrama de Ishikawa es un método gráfico para el análisis de causa raíz. Documentado por primera vez por Kaoru Ishikawa, se utiliza hoy en día como una piedra angular de la mejora continua del servicio. Debido a su forma, también es conocido como el diagrama de espina de pescado. Otro nombre para esta técnica es de diagrama causa-efecto. Usando esta técnica se puede ver todas las posibles causas de un resultado (un problema, por ejemplo), y descubrir la causa raíz de fallas. Los diagramas Ishikawa no requieren inversión en software o herramientas. Se trata de un ejercicio de grupo. Siguiendo lo que se describe cómo, por qué y cuándo para crear y utilizar diagramas Ishikawa de causa-efecto.

Ishikawa, "Espina de pescado", o diagrama de causa-efecto se refieren a lo mismo: una representación gráfica de las entradas (causas y razones) y una salida (el problema o evento). Un profesional guía a un grupo en la organización de causas de acuerdo a su importancia. Esto se traduce en un gráfico que muestra la relación entre las causas, razones y el problema objeto de estudio. Este gráfico ayuda a identificar las causas raíces, ineficiencias y otros problemas. Los diagramas de Ishikawa son similares a otras herramientas de calidad. Obtener todas las ideas de un grupo de personas organizadas en un diagrama acelera drásticamente el diagnóstico de problemas y resoluciones.

Usar esta técnica siempre que se deba:

- Determinar la causa raíz de un problema
- Comprender las posibles razones porque un proceso no está cumpliendo como se esperaba
- Identificar áreas en las que recoger datos

Un diagrama Ishikawa completo en algo se asemeja a una espina de pescado, y por lo tanto el apodo de "Diagrama de espina de pescado". Siguiendo con la analogía de los peces, la "cabeza" debe contener una descripción del problema. De la cabeza se origina la "columna vertebral" del diagrama. De la columna vertebral, "costillas" indican el área de los principales que pueden causar el problema descrito ver fig.III.6.

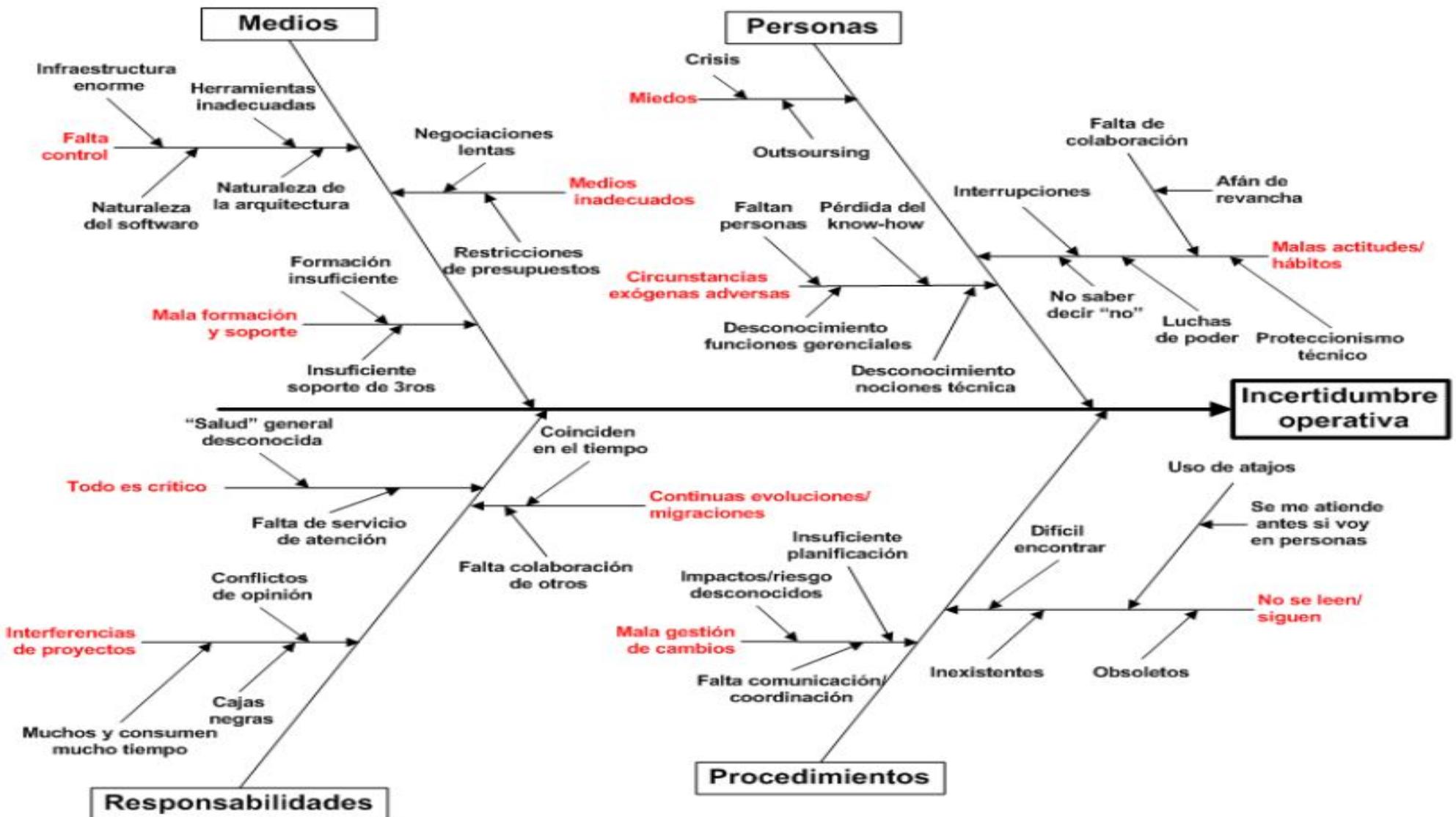


Fig.III.6. Esquema del diagrama de Ishikawa (Espina de Pescado)  
 Fuente: Confiabilidad operacional de Equipos: Metodologías y Herramientas  
 Fecha: 19 de enero de 2014

La representación Ishikawa es más útil como una herramienta de grupo. No hay límite a la complejidad de los diagramas. Normalmente, más de 4 o 5 niveles son demasiado complejos para producir cualquier causa visible. Cuando el diagrama está completo, el equipo cuenta con un documento gráfico que muestra organizada todas las posibles causas del problema descrito. A continuación, el grupo discute la causa raíz más probable y propone un plan de acción.

### III.6.1 CREACIÓN DEL DIAGRAMA ISHIKAWA "ESPINA DE PESCADO"

La creación de un diagrama de Ishikawa sigue un proceso simple: Reunir a un grupo de personas familiarizadas con el problema en cuestión.

1. Dibujar una línea horizontal como la "columna vertebral" y una caja a la derecha de la columna vertebral como la "cabeza" en un tablero.
2. Trabajar con el grupo para llegar a una descripción del problema que sea claro y conciso. Escribir la descripción del problema en la caja de problema o cabeza de pescado del diagrama. En el ejemplo, el problema es "incertidumbre operativa", refiriéndose a por qué no se consigue entregar un producto computacional de calidad.
3. Ahora el equipo tiene que discutir y estar de acuerdo con los grandes grupos de causas o "costillas" iniciales. Si el grupo no se ponen de acuerdo sobre las causas principales, sólo tiene que utilizar las 3 P Personas, Proceso y Producto. Escriba una etiqueta para cada "costilla", permitiendo que el espacio para las razones como se muestra en el ejemplo.
4. Use las técnicas tradicionales de tormentas de ideas para llenar las posibles razones de la "costillas" de la siguiente manera:
  - a. Pregunte a cada persona una por una para que dé una posible causa (tal vez en forma de una pregunta) para cada una "costilla". Cada persona debe presentar una razón posible, y si no puedo pensar en una puede pasar. Asegúrese de que cada causa es clara, concisa y medible.
  - b. Dibujar la causa en una línea conectada a la "costilla" adecuada y la etiquétela con la causa. Si la causa propuesta es un factor en una causa existente (costilla), a continuación, dibuje otra espina dorsal de la costilla, añadir otra costilla, y la etiqueta de la misma.
  - c. Volver atrás y repetir hasta que todo el mundo dice, "pasa" y no hay más causas posibles que las costillas ya existentes y no hay costillas nuevas que añadir.
5. Con la espina de pez completo, ahora revisar y discutir el diagrama de Ishikawa para buscar las causas comunes o repetidas. Trate de determinar la causa raíz del problema.

La forma más rápida y más fácil de interpretar los resultados de Ishikawa es el diagrama para seleccionar y clasificar las 5 mejores causas. Decidir cómo clasificar las causas. Los 5 porqués son también útiles para determinar la más probable causa raíz cuando el esquema se completa también. Hacer un círculo de las causas seleccionadas. Que los miembros apropiados del grupo investiguen estas causas utilizando otras técnicas de solución de problemas. Repetir según sea necesario. Gente con experiencia limitan el número de "costillas" (causas) para el enfoque del grupo. Algunos sugieren que no permitan más de 3 a 5 costillas. Otras técnicas de uso de clave de Ishikawa son:

- Enmarcar el problema como una pregunta, tal como ¿Por qué son los incidentes? ¿Por qué existe tan alta tasa de rechazo en él? Cada causa debe responder a esa pregunta.
- Asegurarse que las "costillas" son las causas del problema, no los síntomas del problema.
- Use la lluvia de ideas (Brainstorming) para determinar exactamente lo que las costillas debe ser la técnica del "5 porqués" puede ayudar aquí.
- Comprobar que las causas en el diagrama no son en sí otros problemas.
- Combinar costillas vacías (o casi vacías), con otras costillas más apropiadas.
- Divida aquellas costillas densas en costillas adicionales, según convenga.
- Realice copias de los resultados y darlas a conocer a los demás para obtener mayor conocimiento y participación del personal.

Esto permite que el grupo focalice la discusión sobre el por qué se producen problemas sin la distracción de los síntomas.

### **III.7. ANÁLISIS DE EVENTOS Y FACTORES CAUSALES**

El análisis de eventos y factores causales es un componente importante en la investigación de eventos no deseados, está diseñado como una herramienta independiente, examina eventos y condiciones (y cómo estas condiciones influyeron en los eventos) construyendo y examinando la cronología o secuencia de los eventos y las condiciones relacionadas. El análisis está basado en la premisa de que los accidentes, los incidentes o problemas pueden ser estudiados como el resultado de uno o más eventos sucesivos. Cada uno de estos eventos que están considerados, pueden verse influenciados por las condiciones, denominadas factores causales. Este análisis tiene tres propósitos principales en la investigación:

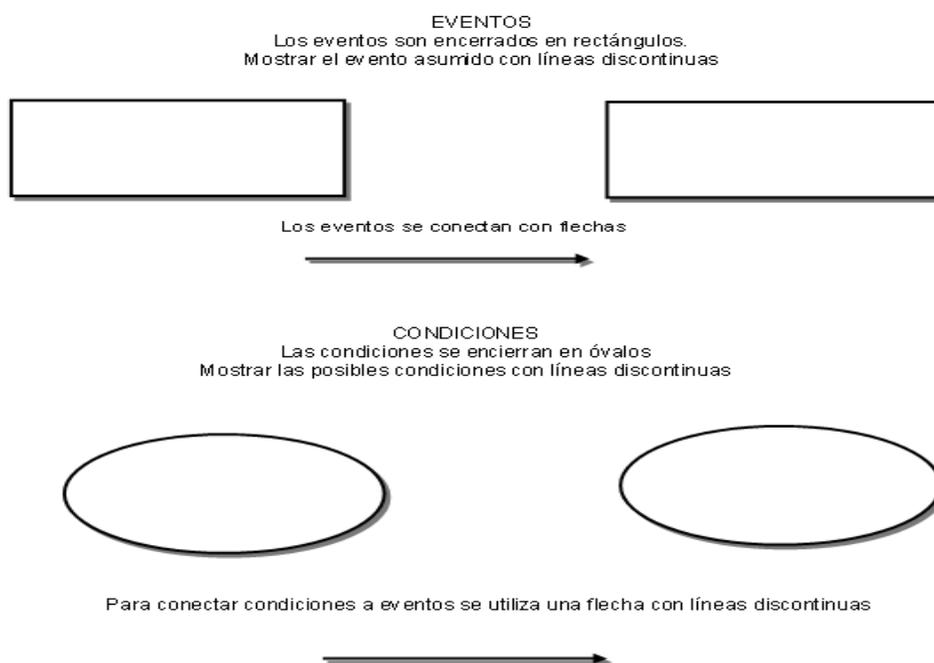
- 1- Ayuda a la verificación de las cadenas causales y secuencias de eventos
- 2- Proporciona una estructura para la integración de resultados de la investigación

### 3- Ayuda a la comunicación durante y al término de la investigación

Los accidentes son investigados para identificar las causas de su aparición y para determinar las acciones que se deben tomar para prevenir la recurrencia, es esencial que los investigadores profundicen tanto en los eventos y condiciones que crean situaciones de accidentes que permitan desarrollar e identificar la raíz de los accidentes.

#### III.7.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

El formato básico y convenio adoptado en la construcción del diagrama de eventos y factores causales se muestra en la fig.III.7.



*Fig.III.7. Formato para la construcción de un diagrama de eventos y factores causales  
Fuente: Análisis Causa Raíz, una Herramienta para la Gestión Total de la Calidad  
Fecha: 19 de enero de 2014*

- 1- Encerrar eventos en rectángulos; encerrar condiciones en óvalos. Cada evento y condición la cual está basada en observaciones validas o evidencia es dibujada en bordes sólidos; los eventos asumidos o condiciones son identificadas claramente en rectángulos y óvalos con líneas discontinuas. Este último (eventos y condiciones asumidos), usualmente son incluidos en el diagrama según las necesidades de cómo se va a visualizar el proceso.
- 2- Organizar los eventos cronológicamente de izquierda a derecha fig.III.8.

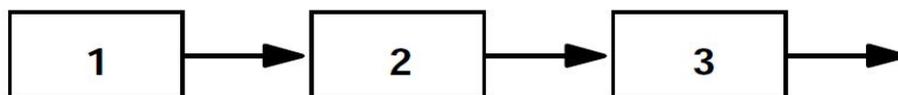


Fig.III.8. Organización de los eventos  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 20 de enero de 2014

- 3- Mostrar los eventos en la secuencia real; los eventos deben seguir un orden lógico, mostrar cualquier tipo de pre-evento relacionado (problema, accidente, incidente), y el post-evento o la fase de mejora. El inicio y final de la secuencia del evento deberá ser establecida.
- 4- Conectar todos los eventos mediante flechas con líneas continuas fig.III.9.

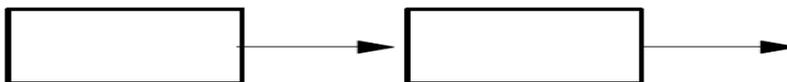


Fig.III.9. Conexión de eventos  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 20 de enero de 2014

- 5- Conectar condiciones a cada evento relacionado mediante flechas con líneas discontinuas fig.III.10.



Fig.III.10. Conexión de eventos relaciones líneas discontinuas  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 19 de enero de 2014

- 6- Si es necesario, representar la secuencia de eventos secundarios, factores que contribuyen y factores sistémicos usando líneas horizontales a diferentes niveles debajo de la secuencia primaria.

Cabe decir que esta técnica es muy visual, ya que provee una línea de historia (secuencia de eventos) acompañada de explicaciones o descripciones de las condiciones que rodean el evento (factores causales).

### III.7.2 CRITERIOS PARA LA DESCRIPCIÓN DE EVENTOS Y CONDICIONES

- Cada evento debe describir un hecho o acontecimiento y no una condición, estado, circunstancia, resultado o conclusión
- Cada evento debe ser mostrado en el diagrama en un rectángulo este debe ser descrito en una oración corta, con un sujeto y un verbo activo por ejemplo “el papel estraza se incendió”. Cuando varios eventos se describen conjuntamente,

como, “el papel estraza se incendió y fue extinguido”, esto puede hacer que el análisis posterior, los eventos potencialmente importantes que intervienen o factores que deben tenerse en cuenta se pierdan, por ejemplo, “el intento ineficaz para sofocar el fuego con mantas” o “las dificultades al operar el extinguidor”

- Cada caso debe ser descrito con precisión, esto será de gran valor para el análisis subsecuente
- Cada evento debe cuantificarse en la medida posible “el fuego se extendió a dos pisos” no “el fuego se extendió”
- Si es posible cada evento deberá incluir hora y fecha, puede haber pistas importantes en el tiempo transcurrido o en la fecha indicada
- Mostrar la secuencia real de los eventos
- Las condiciones difieren de los eventos en la medida en que a) describen estados o circunstancias en lugar de los sucesos o acontecimientos y b) son pasivos y no activos. Las condiciones deben ser descritas con precisión

### III.7.3. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA

La construcción de los eventos y factores causales comienza de inmediato, sin embargo, el gráfico inicial será sólo un esqueleto del producto final. Muchos eventos y condiciones serán descubiertos en un corto periodo de tiempo, y por lo tanto la tabla debe de ser actualizada a diario a lo largo de la fase de la investigación de recopilación de datos, mantener los datos al día ayuda a asegurar que la investigación continúe sin inconvenientes y que se tenga una clara representación de la cronología de accidentes para utilizar en la recopilación de pruebas y el testimonio de entrevistas.

Los investigadores pueden construir un evento y los factores causales mediante un método manual o computarizado, a menudo se utilizan ambas técnicas durante el curso de la investigación, el desarrollo inicial se hace manualmente y luego transferir los datos en programas. El método manual emplea notas adhesivas removibles para describir cronológicamente los acontecimientos y las condiciones que afectan a estos eventos, el grafico se construye mediante los eventos registrados y las condiciones del accidente secuencialmente.

La construcción de la cadena principal de eventos que condujeron al accidente comienza de izquierda a derecha, los eventos secundarios se añaden a continuación a los eventos en una línea por encima de la línea de la secuencia primaria. Las condiciones que afectan a cualquiera de los eventos secundarios o primarios se colocan por encima o por debajo de estos eventos. La fig.III.11 muestra el formato del diagrama de los acontecimientos y factores causales.

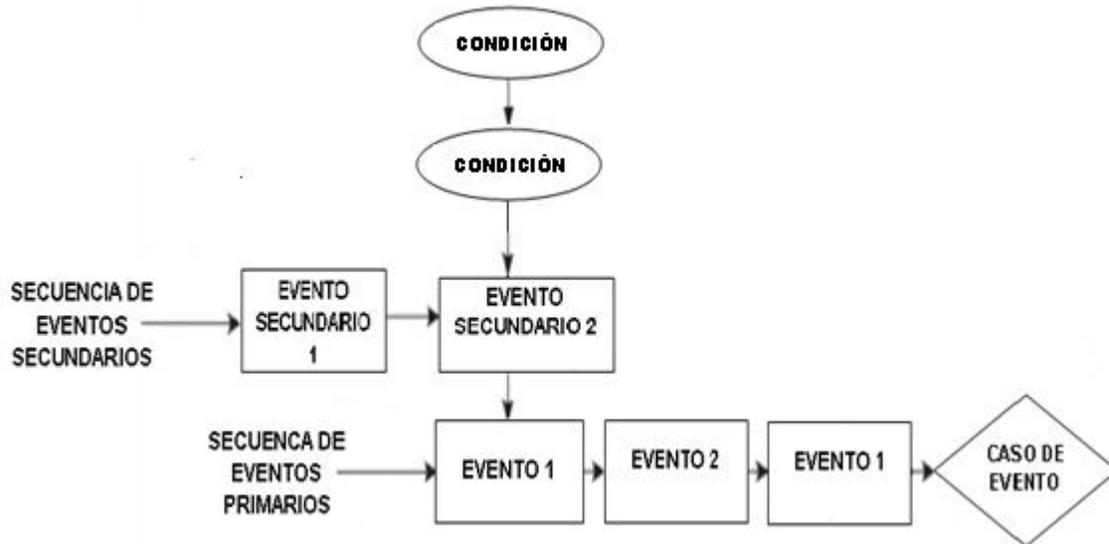


Fig.III.11. Diagrama de los factores causales  
Fuente: DOE Manual de Investigación de accidentes  
Fecha: 19 de enero de 2014

### III.8. ANÁLISIS DE BARRERAS

El análisis de barreras está basado en la premisa de que los riesgos están asociados con todos los accidentes. Las barreras son desarrolladas e integradas dentro de un sistema o proceso de trabajo para proteger al personal y equipo ver fig.III.12 de los daños, para que ocurra un accidente, debe haber:

- Un peligro, que entra en contacto con
- Un objetivo, es el porqué del problema o evento
- Las barreras, o controles que no estaban en su lugar, no utilizados o fallados

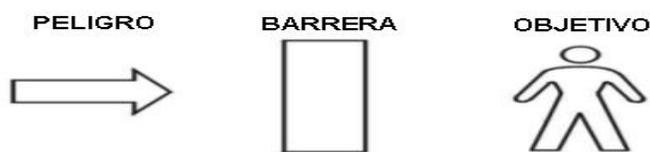
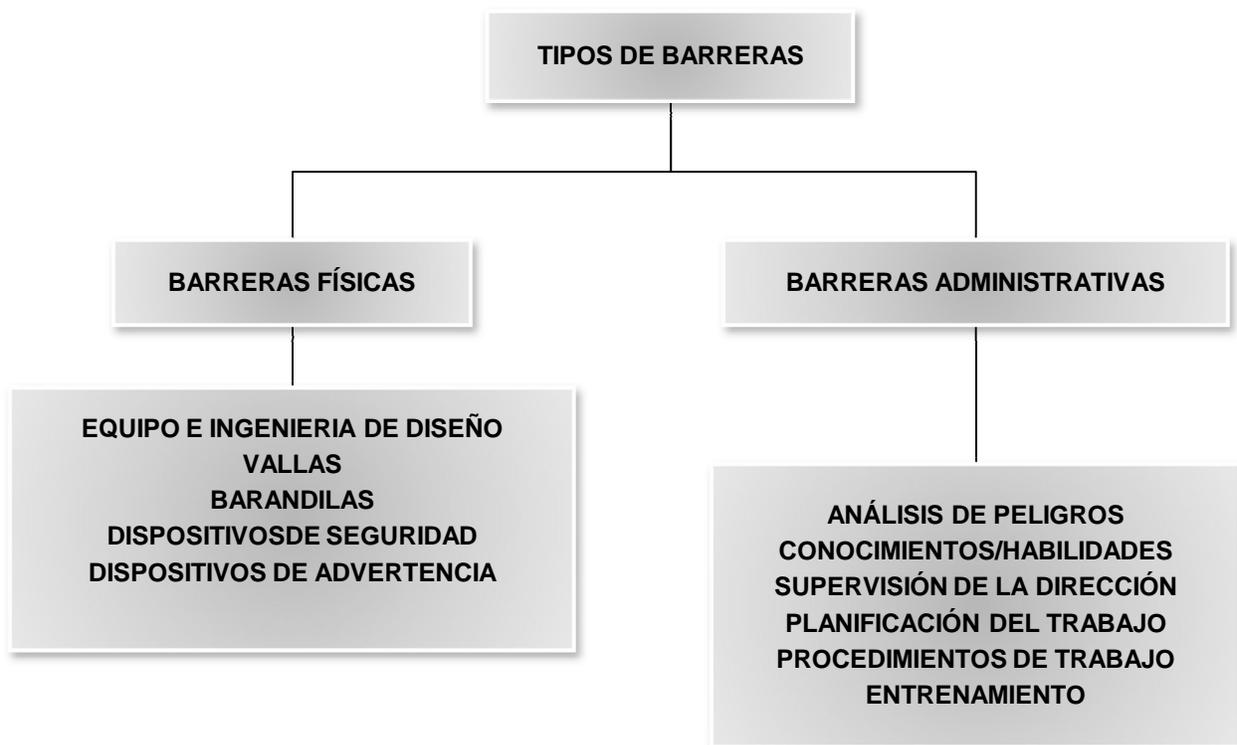


Fig.III.12. Cómo se integran las barreras para proteger tanto al proceso, personal y equipo  
Fuente: DOE Manual de Investigación de accidentes  
Fecha: 19 de enero de 2014

Un peligro es el potencial flujo de energía que resulta en un accidente o alguna otra consecuencia adversa. El flujo de energía es la transferencia de energía de la fuente hacia otro destino, esta transferencia de energía puede ser ya sea deseado o no deseado. El objetivo es la persona u objeto a la cual un peligro puede herir, o crear un daño grave, una barrera es cualquier medio utilizado para controlar, prevenir o impedir el peligro hacia el objetivo.

Los investigadores utilizan el análisis de barreras para identificar los peligros asociados con un accidente y las barreras que debieron estar en el lugar para prevenirlo, este análisis se ocupa de:

- Barreras que se encontraban en el lugar y la forma en que se llevan a cabo.
- Barreras que se encontraban en su lugar pero no fueron usadas.
- Barreras que no estaban en su lugar pero fueron requeridas.
- La barrera(s) que, si está presente y reforzada, impedirá que se produzca un accidente similar se produzca en el futuro. La fig.III.13 muestra los tipos de barreras que puedan existir para proteger a los proceso, equipo y personal contra los riesgos



*Fig.III.13. Tipos de barreras*  
*Fuente: DOE Manual de Investigación de accidentes*  
*Fecha: 20 de enero de 2014*

Los siguientes cuatro elementos son considerados en el análisis de barreras de un evento o problema:

- La amenaza que ocasiona el daño.
- Las personas o cosas (objetivo) que sufren el daño.

- Las barreras que pudieron o debieron haber prevenido la amenaza.
- La ruta por la cual la amenaza alcanza al blanco (objetivo).

Las barreras físicas obvias son las colocadas directamente sobre el peligro, los colocados entre un peligro y el destino, o los ubicados en el objetivo (por ejemplo, un casco de soldadura). Barreras del sistema de gestión pueden ser menos evidentes, como los límites de exposición requeridos para minimizar el daño al personal o el papel de supervisión para garantizar que el trabajo se realiza de forma segura. El investigador debe entender la función de cada barrera prevista y ubicación, y cómo no pudo evitar el accidente. Para analizar el desempeño de las barreras físicas, los investigadores pueden necesitar diferentes tipos de datos, incluidos:

- Los planes y especificaciones para los equipos o sistemas.
- Documentación técnica de adquisiciones y proveedores.
- Los registros de instalación y pruebas.
- Fotografías o planos.
- Historiales de mantenimiento.

Para el análisis de las barreras de gestión, los investigadores necesitan obtener información acerca de las barreras a los tres niveles de la organización responsables de la obra: la actividad, las instalaciones y los niveles institucionales. Por ejemplo, en el nivel de actividad, el investigador necesita información acerca de los procesos de planificación y control del trabajo que regían la actividad laboral, así como los sistemas de gestión de seguridad pertinentes. Esta información puede incluir:

- Organigramas que definen los roles y responsabilidades de supervisión para la seguridad.
- Formación y registros de calificación de las personas involucradas en el accidente.
- Planes de control de riesgos.
- Documentación para el análisis de riesgos.

### **III.8.1 CONSTRUCCIÓN DE UNA HOJA DE TRABAJO PARA EL ANÁLISIS DE BARRERAS**

Una hoja de cálculo de análisis de barreras es una herramienta útil en la realización de un análisis de barreras. La tabla.III.5 ilustra una hoja de trabajo. Los pasos utilizados para completar esta hoja de trabajo son:

- Paso 1: Identificar el riesgo y el objetivo. Registre ellos en la parte superior de la hoja de trabajo.
- Paso 2: Identifique cada barrera. Registre en la columna uno.
- Paso 3: Identificar cómo se ha realizado la barrera (¿Cuál fue el propósito de la barrera? ¿la barrera estaba en su lugar o no? ¿Falló la barrera? ¿La barrera utilizada si estaba en su lugar?).
- Paso 4: Identificar y considerar las causas probables de la falla de la barrera.
- Paso 5: Evaluar las consecuencias del fracaso en este accidente.

**Tabla.III.5. Hoja de Trabajo del Análisis de Barreras**

Peligro		Objetivo o blanco	
¿Cuáles fueron las barreras?	¿Cómo fue el desempeño de cada barrera?	¿Por qué la barrera falló?	¿Cómo la barrera afectó el accidente?

### III.8.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BARRERAS

Los resultados del análisis de barreras pueden ser retratados en forma de cuadro, y luego resumir gráficamente para ilustrar, de una manera lineal, las barreras que no se han utilizado o que no pudieron evitar un accidente o evento indeseado. Los resultados de esta herramienta también pueden revelar qué barreras deben tener o podrían haber evitado un accidente. En el formato de tabla, se definen las barreras individuales y sus propósitos.

### III.9. ANÁLISIS CAUSA-EFECTO

Herramienta que combina distintas características de las herramientas de Análisis de Eventos y Factores Causales, Análisis de Árbol de Falla, Análisis de Barreras, más allá de la que exhibe la Espina de Pescado (Diagrama de Ishikawa) tradicional, la relación causa-efecto la referiremos en esta trabajo como la relación donde se intercambian los roles de causa y de efecto en forma secuencial desde un evento. Esta relación tiene los siguientes fundamentos:

- La Causa se convierte en efecto al preguntar: ¿causado por?
- La relación interminable de causas y efectos comienza dependiendo de la perspectiva del análisis y debe terminarse cuando se pierde el control sobre las soluciones a las causas.
- Cada efecto puede tener una o varias causas (formación de ramales de un árbol).
- Se dan pasos pequeños.

El Análisis Causa Efecto se basa en el hecho de que un evento de falla siempre tiene una causa, y que esta causa, a su vez, tiene otra causa, convirtiéndose la primera en efecto de la segunda; dicho de otra manera, una causa siempre se convierte en efecto de otra causa, formándose de este modo una cadena de causas y efectos, que se puede continuar hasta llegar a la causa más fundamental del problema. Para construir el diagrama fig.III.14 se dibuja inicialmente una caja superior en la que se debe escribir el problema o evento de falla y los modos de fallas del problema. Los modos de fallas, deben ser hechos reales de cómo se manifiesta el evento. El problema, se refiere a una descripción breve del evento no deseado que se desea analizar. Representa el dolor, lo que ocasiona la pérdida. Tanto el problema como los modos de falla es mandatorio que sean hechos, no pueden ser suposiciones.

A partir de los modos de fallas se deben conectar otro nivel de cajas en las que se deben escribir las hipótesis de sus causas probables. Cada hipótesis se deberá validar (convirtiéndose en hecho, si queda confirmada), realizando verificaciones que se pueden llevar a cabo de diversas formas. Puede ser realizando pruebas en sitio, verificando datos estadísticos, realizando entrevistas con los operadores o mantenedores de los equipos ó por eliminación. No es recomendable continuar el análisis, si no están validadas todas las hipótesis, ya que puede conducir a soluciones que no resolverán el problema.

Las causas de las fallas que inicialmente son físicas, porque son las que provocan la falla en forma directa, tienen que ver con fallas de componentes físicos del equipo o sustancias como el lubricante o el combustible; generalmente, tienen su origen en causas humanas, que se refieren a errores u omisiones de personas o grupos de personas; y éstos a la vez tienen su origen en causas latentes que tienen que ver con el sistema organizacional o de administración. Se refiere a la no utilización de procedimientos, mecanismos, falta de programas o fallas en el diseño, mismos que de no ser corregidos conducirán a la repetición de los problemas o fallas.

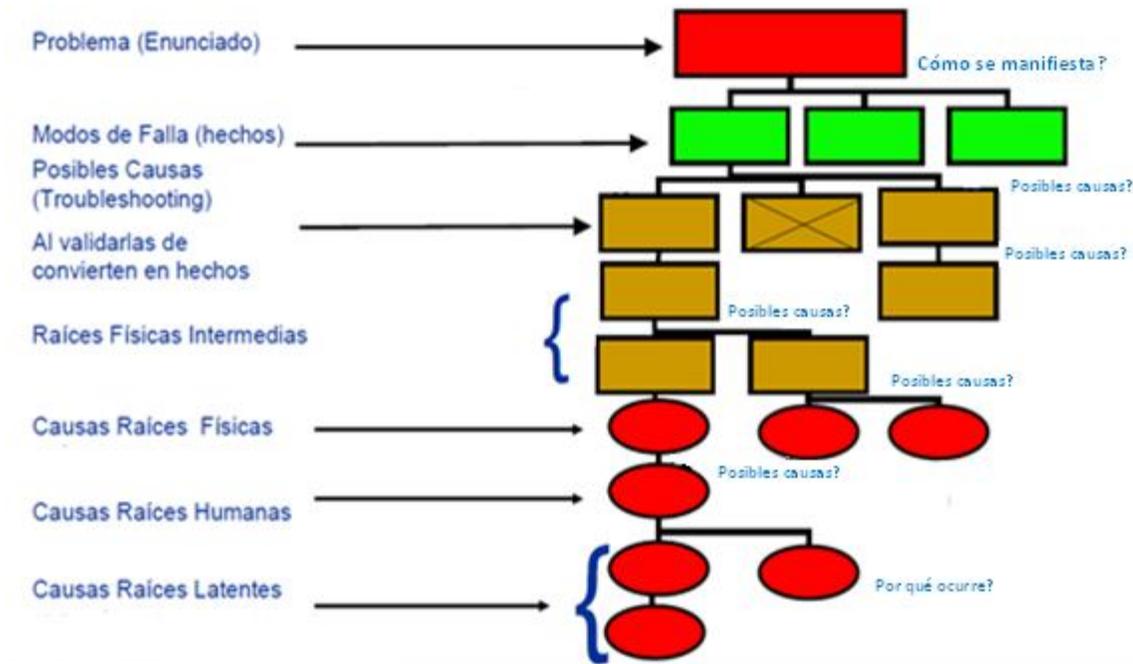


Fig.III.14. Diagrama Causa Efecto

Fuente: Confiabilidad y Gestión de Riesgos "Análisis de Causa Raíz: guía de implementación"

Fecha: 20 de enero de 2014

### III.10. RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE USO EN EL ACR

Al usar cualquiera de las herramientas descritas, la profundidad del análisis debe adecuarse para explicar por qué pasó lo ocurrido, determinar cómo prevenir y asignar la responsabilidad para las acciones correctivas. Se estima que para encontrar la causa de un problema poco relevante no debe emplearse mucho tiempo, ni mucho esfuerzo, ni mucho recurso humano. En el proceso de ACR, el objetivo de investigar y reportar la causa de una falla/problema, es hacer posible la identificación de acciones correctivas adecuadas.

La línea de razonamiento del proceso de investigación nos ayuda a: delinear qué sucedió paso a paso. Empieza con la ocurrencia e identifica el problema (condición, situación, o acción que no fue deseada o planeada). Investiga por qué se permitió que una situación determinada existiera. Esta línea de razonamiento explicará por qué la ocurrencia no fue prevenida y que acciones correctivas serán las más efectivas. Este tipo de razonamiento debe mantenerse durante todo el proceso de ACR.

Lo importante de la herramienta que se utilice es que los resultados a obtener sean acertados y precisos además que debe contar con los siguientes puntos:

- Que sea rápida.

- Fácil de aprender.
- Que se pueda usar para identificar tendencias.
- Que pueda ser combinada con otras herramientas.
- Que ordene por categorías.
- Que cree una visión clara.

# **CAPÍTULO IV**

## **METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR)**

## IV.1. CRITERIOS PARA INICIAR UN ACR

Uno de los criterios a tomar en cuenta en el ACR es que se deberá realiza “en sitio” y se requiere de un espacio dedicado a las actividades diarias, incluyendo los sitios de visita y entrevistas con los testigos para recolectar, inspeccionar y procesar las evidencias físicas, bajo un programa de actividades.

Otro de los criterios a tomar en cuenta antes de comenzar cualquier análisis es hacer un diagnostico así como obtener la información necesaria como son las condiciones de operación antes, durante y después de la ocurrencia, definir el circuito de proceso, equipo y/o instrumento que estuvieron involucrados en la ocurrencia, preservar la evidencia física del evento (falla, accidente/incidente), realizar las entrevistas con el personal de operación y mantenimiento involucrado, revisar dibujos de fabricante de equipo y/o instrumentos. Una vez que la información es ingresada, podremos clasificar los datos del sistema y luego definir el evento. Esto dará un conocimiento más profundo del evento ya que si tuviéramos que pedirles a diez personas que definieran la falla o evento no deseado, probablemente obtendríamos diez respuestas diferentes, esto haría el análisis demasiado amplio.

Muchas de las ocasiones también tendremos que llevar a cabo el ACR de manera esporádica cuando se presenten en algunas situaciones que a continuación se mencionan:

### **a) Ambiente (Cuando el evento sucedido impacte el ambiente)**

- Cuando el evento es “no controlado”
- Evento reportado
- Evento recurrente

### **b) Accidente**

- Lesión, fuego, daños o equipos

### **c) Parada no planificada**

### **d) Pérdidas de producción**

### **e) Perdidas mayores**

### **f) Incidente de calidad**

- Evento “no controlado”
- Reclamo

### **g) Evento especial (Identificado por la gerencia de producción)**

## IV.2. CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

Reunir a las personas apropiadas para crear un equipo eficaz es de suma importancia para el éxito en el proceso del ACR. La principal fuente de soluciones a los problemas radica en la experiencia del equipo más que en la recopilación masiva de datos y el análisis de estos datos.

EL ACR dada su naturaleza, no puede ser desarrollada bajo un enfoque unilateral es por eso que el equipo debe contar con una representación multidisciplinaria fig.IV.1, para la conformación del equipo de trabajo en el ACR en las instalaciones de una refinería, es necesario contar con personas de diferentes disciplinas, de manera que facilite el estudio del problema y agilice el avance en la búsqueda de soluciones, siguiendo esta premisa se solicita apoyo a personas con diferentes especialidades como son de ingeniería de proceso, ingeniería de confiabilidad operaciones y mantenimiento, conjuntamente con la coordinación de un asesor de la metodología de ACR, con estos puntos se aporta al análisis una variedad de perspectivas y experiencias, además es deseable que también en el grupo participe alguna persona involucrada en el suceso que se está analizando.



*Fig.IV.1. Equipo de Trabajo*  
*Fuente: Guía para la solución de problemas mediante la Metodología del ACR en Pemex Exploración y Producción (PEP)*  
*Fecha: 30 de enero de 2014*

A continuación se listan algunas responsabilidades específicas de cada miembro del equipo de trabajo dentro de la metodología:

- **Facilitador:** Deberá conocer la metodología de ACR y su responsabilidad es proveer apoyo visible y recursos para el desarrollo de los análisis de ACR. Son los responsables de la toma de decisiones. Finalmente ellos dan seguimiento y aseguran el cumplimiento de las recomendaciones generadas en los análisis.

- Líder del Equipo: Debe poseer experiencia en análisis de los equipos objeto de estudio y poseer habilidades y conocimiento de la metodología de ACR. Es el responsable de los resultados del análisis, debe convocar al equipo de trabajo, velar por la buena conducción del análisis, difundir los resultados y asegurar que las medidas de reducción de riesgo recomendadas sean ejecutadas.
- Secretario: Su responsabilidad es hacer seguimiento al cumplimiento de los acuerdos realizados, programar, convocar y registrar las juntas de trabajo y comunicar los resultados relevantes del estudio.
- Asesor de la Metodología: Es la persona capacitada en la metodología ACR de cada localidad, responsable de conducir el análisis. Por lo general será un ingeniero de mantenimiento o de operación que tendrá dentro de sus responsabilidades la de facilitar las sesiones de análisis.
- Analistas:
  - Persona de mantenimiento: Debe suministrar el histórico de reemplazos, reparaciones y/o modificaciones en los equipos. Son responsables de ejecutar las recomendaciones que estén dentro de su ámbito de acción.
  - Operador: Responsable de indicar las condiciones de operación de los equipos objeto de estudio y las condiciones anormales de operación. Son responsables de ejecutar las recomendaciones que estén dentro de su ámbito de acción.
- Integrantes Especiales:
  - Especialistas en equipos dinámicos: Responsable de aportar conocimiento y experiencia especializada en el área de equipos dinámicos.
  - Especialista en corrosión y materiales: Valora la probabilidad de existencia y severidad de determinados mecanismos de deterioro, con base en las condiciones de operación, tipos de material, edad y demás variables del contexto. Asimismo, deberá dar recomendaciones de mitigación de riesgo para reducir la probabilidad de falla asociada a los mecanismos de deterioro identificados.
  - Ingeniero de Procesos: Es responsable de proveer las condiciones de proceso, identificar las corrientes y características de los fluidos manejados en los equipos objeto de análisis. Debe estar en capacidad de recomendar acciones de mejora a través de cambios de proceso.
  - Especialista en Seguridad: El provee la información de los sistemas de seguridad y protección ambiental y las regulaciones vigentes. De igual forma podrá recomendar acciones de mitigación de las consecuencias de falla.

- Fabricante: responsable de aportar información y apoyo técnico sobre los equipos involucrados en el análisis.

Como podemos darnos cuenta es fundamental una adecuada conformación del equipo de trabajo, el cual se formará para cada área y se particularizará para afrontar la naturaleza de cada problema. Cada rol dentro del equipo de trabajo es importante para cada fase del proceso ACR.

### IV.3. PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA ACR

Con el paso del tiempo en la industria de refinación se ha implementado la mejora en equipos y procesos basándose en sus habilidades para llegar a la demanda creciente de productos y servicios, además de que en dichos procesos se busca aquel donde no se tengan indicadores con resultados desfavorables y predomine la seguridad. El resultado de esta demanda en constante crecimiento y la optimización de costos, ha dado como resultado que se desarrollen distintas metodologías y tecnologías para analizar los problemas que surgen en los procesos y los equipos. La razón básica de investigar e informar las causas de los sucesos es permitir la identificación de las medidas correctoras adecuadas para evitar que ocurran.

Los puntos específicos en el proceso de investigación del ACR en las diferentes etapas del método los podríamos resumir a continuación:

- 1- Definir el problema o describir el evento: Mediante hechos incluyendo atributos cuantitativos y cualitativos de la consecuencia. Especificando la naturaleza, la magnitud, la ubicación y el momento del hecho.
- 2- Recolectar datos y evidencia: Ordenarla en una línea de tiempo hasta el momento del evento (falla/crisis u accidente/incidente). Para cada comportamiento, condición, acción e inacción aclarar en la línea de tiempo qué debería haberse hecho cuando difiera de lo que se hizo.
- 3- Preguntarse el porqué: Para permitir identificar las causas asociadas con cada paso en la secuencia hacia el problema. El por qué se refiere a ¿Cuáles son los factores que contribuyeron directamente con el problema?
- 4- Clasificar las causas: Realizarlo dividiendo el evento en factores causales que nos llevaran al problema y aquellos que si fueron eliminados para lograr interrumpir los pasos hacia el problema.
- 5- Identificar los demás factores perjudiciales que puedan también ser consideradas causas raíces. Si existen múltiples causas, que es lo que suele suceder, detectarlas para accionar sobre ellas en el futuro.
- 6- Señalar acciones correctivas que puedan prevenir la reiteración del evento, incluyendo las consecuencias y factores.

7- Identificar soluciones.

8- Implementar correcciones a la causa raíz recomendada.

Para el presente trabajo y siguiendo el ejemplo de algunos autores hemos agrupado estos pasos en estas cinco fases fig.IV.2, ya que es más sencillo desde el punto de vista práctico. En los siguientes puntos iremos profundizando en cada uno de ellos.



Fig.IV.2. Fases del ACR  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 10 de febrero de 2014

### IV.3.1. IDENTIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL EVENTO (FASE I)

La identificación y la recopilación de la información están enfocadas a descubrir, de una manera valorativamente neutral, los hechos que demuestran cómo se produjo un incidente, lo que realmente ocurrió, sin ningún juicio de valor. En esta fase es importante comenzar la recolección de datos, tan pronto como sea posible después de la ocurrencia del evento para asegurar que los datos tanto como sea posible disponible. La información que debe ser recolectada se compone de las condiciones antes, durante y después de la ocurrencia, la participación del personal (incluidas las medidas adoptadas), los factores ambientales y cualquier otra información pertinente a la ocurrencia.

#### IV.3.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL EVENTO A INVESTIGAR

Una vez realizado una descripción breve y completa del problema, describiendo los modos en que se ha manifestado, como hechos reales, no como suposiciones de lo que pudiera ocurrir. Se deberá elaborar si un esquema del problema, tal como un diagrama, un dibujo o cualquier otro apoyo gráfico que sirva para que el equipo de trabajo, que este llevando a cabo el análisis, y se entiendan todos los aspectos del problema.

Para poder identificar los factores que llevaron a un problema, el Equipo de Trabajo que va a aplicar el ACR puede realizar una sesión de (brainstorming) lluvia de ideas para asegurar que todas las causas posibles se consideren en el análisis. En estas sesiones se puede realizar una serie de preguntas sencillas que ayudarán a recopilar esta información, como por ejemplo:

- ¿Cuál es el problema? (enunciado)
- ¿Cuándo ocurrió el problema?
- ¿Cuál es la historia del problema?
- ¿Dónde ocurrió el problema?
- ¿Qué condiciones se presentaron antes de que ocurriera el problema?
- ¿Qué controles o protecciones pudieron prevenir que ocurriera el problema y no lo hicieron?
- ¿Cuál es el impacto del problema en seguridad, ambiente, producción y costos de mantenimiento?

Durante la identificación del evento se debe estar seguro de considerar al personal involucrado, equipo, políticas de la empresa, procedimientos de trabajo y el ambiente. Se debe describir una breve historia del problema, escribiendo, cuando sea posible, la fecha de inicio de operaciones, la fecha en que se detectó el problema o cuando se incrementó y los eventos relevantes antes de esta fecha, tales como, modificaciones al sistema, mantenimientos realizados, cambios en métodos ó procedimientos.

#### IV.3.1.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Ahora bien también es importante empezar la recolección de información del proceso de ACR inmediatamente después de la ocurrencia y asegurar que los datos no se pierdan, (sin comprometer la recuperación, los datos estos incluso deben ser recogidos incluso durante un evento) la información que debe ser recolectada se compone de las condiciones antes, durante y después de la ocurrencia, la participación del personal (incluidas las medidas adoptadas), los factores ambientales, y otra información que tenga relevancia para la condición o problema. Para los casos graves, evidencias fotográficas de la zona del evento podría darnos varios puntos de vista, siendo útil en el

análisis de la información desarrollada durante la investigación. Se debe hacer todo lo posible para preservar la evidencia física, mencionando algunos ejemplos tales como componentes defectuosos, juntas rotas, cables quemados, fusibles quemados, líquidos derramados y procedimientos.

Una vez que todos los datos asociados con este fenómeno han sido recogidos, los datos deben ser verificados para asegurar la veracidad. La investigación puede ser mejorada si se conserva alguna evidencia física. Establecer el área bajo observación, o el etiquetado y la separación de piezas y materiales, se debe realizar para equipos o componentes que hayan fallado.

La necesidad básica es determinar la causa directa y fundamental, contribuye para que las acciones correctivas efectivas se puedan tomar que evitará la recurrencia. Algunas de las áreas que deben ser considerados cuando se determina qué información se necesita son:

- Las actividades relacionadas con la eventualidad
- Problemas iniciales o recurrentes
- Equipos asociados a la ocurrencia
- Medio ambiente o circunstancias físicas

Para recopilar información nos podríamos apoyar de algunas técnicas como son:

- La realización de entrevistas.- Entrevistas debe ser hechos y no suposiciones del problema. La preparación de las preguntas antes de la entrevista es esencial para asegurar que se obtiene toda la información necesaria.

Las entrevistas deben ser, preferiblemente, con aquellas personas que están familiarizados con el problema. Para la entrevista se puede usar cualquier formato deseado por el entrevistador. Considere la posibilidad de la realización de un "recorrido", como parte de la entrevista.

- Revisión de registros.- Revisar los documentos o partes pertinentes de los documentos que sean necesarios y hacer referencia a su uso en apoyo del ACR. Anote las fechas y horarios adecuados asociados a la ocurrencia de los documentos revisado. Algunos ejemplos de documentos podríamos incluir los siguientes:

- Registros de operación
- Los registros de mantenimiento
- Datos de proceso

- Los procedimientos e instrucciones
- Manuales de proveedores
- Dibujos y especificaciones
- Información base de diseño
- Requisitos de Seguridad Operacional
- Sistema de seguridad. Notificación de sucesos e informes de proceso
- Gráficos de tendencias
- Lecturas de parámetros
- Ordenes de trabajo

#### **IV.3.2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL EVENTO (FASE II)**

La fase de evaluación incluye el análisis de los datos para identificar los factores causales, que en resumen son los hallazgos y la categorización de los resultados. El objetivo principal es descubrir las razones que explican por qué se produjo un evento no deseado, mediante la colocación de la representación verdadera de los hechos para comparar lo que sucedió realmente en contra de lo que debería haber ocurrido, en cualquier momento durante el problema. Identificar la causa o causa raíz puede ser lo más retador de las cinco fases ya que para tener éxito se requiere una comprensión profunda del proceso involucrado. Para esta fase del ACR se utilizan las herramientas que se describieron en el Capítulo III. Todas estas herramientas descritas incluyen los siguientes pasos:

- Identificar el problema y su impacto
- Determinar la importancia del problema
- Identificar inmediatamente las causas (condiciones o acciones) que rodean al problema
- Identificar las razones de las causas existentes (la razón fundamental es corregir la recurrencia de los sucesos que se repiten). Esta es la causa raíz y es el punto final en la fase de evaluación.

La tabla.IV.1 esboza las aplicaciones y limitaciones de las herramientas que fueron descritas en el Capítulo III y que generalmente son utilizadas en el desarrollo del ACR:

**Tabla.IV.1. Aplicación y limitantes de algunas herramientas del ACR**

Herramientas	Cuando utilizar	Ventajas	Desventajas	Observaciones
Causa y efecto Análisis gráfico Análisis árbol de fallas Árbol lógico Diagrama de espina de pescado	<p>Se utiliza para múltiples problemas con larga o compleja cadena de factores causales.</p> <p>Árbol lógico de fallas se puede utilizar cuando el problema está relacionado con las cuestiones de lógica o de control.</p>	<p>Proporciona visualización del proceso de análisis. Identifica probables contribuyentes a la situación. El árbol lógico de falla es capaz de analizar los problemas lógicamente con sistemas o procesos de control (mayormente usado).</p>	<p>Consume tiempo y requiere familiaridad con el proceso para que sea efectivo. además el árbol lógico de falla puede ser extremadamente complejo</p>	<p>Requiere una amplia perspectiva del evento para identificar los problemas relacionados. Ayuda a identificar donde se produjeron desviaciones de los métodos aceptables. Puede necesitar especialistas en sistemas de control y la lógica de la herramienta del árbol lógico de fallas.</p>
Análisis de barreras	<p>Se utiliza para identificar barreras en fallo de equipos y problemas de procedimiento o administrativos.</p>	<p>Proporciona un enfoque sistemático.</p>	<p>Requiere familiarizarse con el proceso para que sea efectivo.</p>	<p>Este proceso se basa en el concepto de peligro (MORT / objetivo).</p>
Gestión de la administración y análisis de árbol de riesgos (MORT)	<p>Se utiliza cuando hay una escasez de expertos para hacer las preguntas correctas y cada vez que el evento es un problema recurrente. Útil en la resolución de problemas de programación.</p>	<p>Se puede utilizar con una formación previa y limitada. Proporciona una lista de preguntas para los factores de control y de gestión específicos.</p>	<p>Sólo puede identificar causa en ciertas aéreas, y no las causas específicas.</p>	<p>Si este proceso falla para identificar áreas problemáticas, se necesita la búsqueda y ayuda adicional o utilizar análisis causa y efecto.</p>

**Tabla.IV.1. (Continuación) Aplicación y limitantes de algunas herramientas del ACR**

Herramientas	Cuando utilizar	Ventajas	Desventajas	Observaciones
Kepner-Tregoe resolución de problemas y toma de decisiones	De uso para los principales eventos cuando todos los aspectos necesitan un análisis exhaustivo. Puede ser utilizado como un marco general.	Enfoque altamente estructurado, se centra en todos los aspectos de la resolución del problema. Disciplinado en el proceso de desarrollo de soluciones.	Mayor amplitud siendo necesaria en algún momento.	Requiere capacitación.

Independientemente de la herramienta empleada, la fase de análisis concluirá con la identificación de la causa raíz del problema así como las recomendaciones que podrán ser la de informar al personal para el desarrollo de acciones correctivas del sistema ya existentes.

#### IV.3.3. DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS (FASE III)

El objetivo de la fase de decisiones y acciones correctivas es identificar, corregir o eliminar las causas profundas de un incidente, con el fin de lograr resultados efectivos. El ACR permite la mejora de la confiabilidad y la seguridad mediante la implementación efectiva de las acciones correctivas. Para empezar se tiene que identificar las acciones correctivas para la causa, y después aplicar los siguientes criterios de las acciones correctivas para asegurarnos de que estas sean viables. Si estas no son viables será necesario reevaluar las soluciones.

- ¿Las acciones correctivas podrán prevenir la recurrencia?
- ¿Es la acción correctiva viable?
- ¿La acción correctiva permita cumplir con los objetivos iniciales?
- ¿La acción correctiva introducir nuevos riesgos? ¿Los riesgos asumidos son claramente establecidos?
- (La seguridad de los otros sistemas no deben ser comprometidos por la acciones correctivas propuesta.)
- ¿Las acciones inmediatas fueron tomadas apropiada y eficazmente?

La tabla.IV.2 se muestra un ejemplo de cómo se podrían resumir e identificar las acciones que deben tomarse para cada causa raíz identificada en la fase de análisis.

Incluye tanto las acciones a corto plazo (soluciones) y soluciones definitivas para eliminar de forma permanente las causas fundamentales que crearon la ocurrencia de incidentes.

**Tabla.IV.2. Informe de Resumen del ACR**

Definición del Problema	Título del Evento a investigar		
Causas de Incidentes		Acciones Correctivas y Preventivas	
Causa Raíz	Aportaciones	Corto Plazo	Solución Definitiva
-----	-----	-----	-----

### Conceptos clave en las recomendaciones

- ✓ Las recomendaciones son los productos más importantes de los análisis
- ✓ Las recomendaciones deben contemplar mejoras en el sistema y deben estar orientadas a resolver la causa o causas raíces del problema
- ✓ Las recomendaciones deben inhibir el flujo de eventos
- ✓ Las recomendaciones deben ser ejecutadas oportuna y efectivamente

Las recomendaciones deben estar directamente asociadas con el evento de pérdida o condición.

### IV.3.4. COMUNICACIÓN DE RESULTADOS (FASE IV)

Todas las partes interesadas deberán ser informadas sobre las conclusiones de la investigación ACR. Esto incluye la discusión y explicar los resultados del análisis, incluyendo las acciones correctivas propuestas para que sean puestas en práctica, con la dirección y el personal involucrado en el suceso. Además, debe considerarse la posibilidad de ofrecer información de interés para otras partes interesadas.

Para que el ACR tenga éxito al momento de dar los resultado y haciendo las recomendaciones sobre las causas identificada, primero se debe tomar en cuenta la posición que se tiene de parte de la administración con respecto a los resultados del análisis. Un informe formal por lo general ayuda a obtener el compromiso del personal para resolver eventos centrándose en la causa raíz determinadas en la investigación.

### IV.3.5 IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO (FASE V)

Para esta última fase se incluye la ejecución de las acciones identificadas, así como las actividades de seguimiento para determinar si las acciones correctivas fueron efectivas en la prevención del evento.

Parte de la responsabilidad que se asume, es analizar la implantación de las recomendaciones y realizar el seguimiento de su ejecución. Los resultados pueden ser comparados y medidos mediante el mejoramiento en las tasas de producción, la reducción de las tasas de falla, etc.

El ACR será una actividad sin valor agregado si no se actúa sobre las recomendaciones y las soluciones no son implementadas en el tiempo establecido. Después de todo, es demasiado frustrante dar recomendaciones para la solución de problemas, asignar responsabilidades para la implementación y establecer un plan de actividades para su realización y aún así no ver el fruto de los esfuerzos.

Por lo tanto, es primordial que se tome el control de las operaciones en vez de permitir que las operaciones tomen el control de la organización. Para poder obtener los recursos necesarios para dedicar el trabajo futuro, sea trabajo de mejora, corrección o rediseño, se debe analizar los problemas hasta las causas raíz y actuar de acuerdo a sus resultados.

# **CAPÍTULO V**

## **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR**

## **V.1 CASO DE ANÁLISIS A BOMBA DE FONDOS DE LA TORRE FRACCIONADORA (GA-111A/B/C) UBICADA EN LA PLANTA DE ALQUILACIÓN**

Una planta de alquilación como ya ha quedado explicado en el Capítulo I, tiene como propósito fundamental producir componentes del alto octanaje para la mezcla de gasolina, además de producir butano y propano como productos laterales. El alquilado es muy importante porque ha sustituido al tetraetilo de plomo, es por esto que se les tiene que agregar este aditivo a las gasolinas para que tengan el octanaje siendo este indispensable.

Las causas que podría generar un evento no deseado en esta planta son muchas, pueden ir desde la mala operación, ya que estas plantas trabajan a muy altas presiones, además un fallo en los equipos representa una condición de alto riesgo para los trabajadores, los activos de la planta y para el medio ambiente, otras posibilidades son por fenómenos meteorológicos, terremotos, algún rayo o una mala operación humana, las posibilidades existen, están ahí como cualquier riesgo.

Además este tipo de eventualidades representa una condición de alto riesgo para los trabajadores, los activos de la planta y para el medio ambiente.

### **V.1.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA DONDE SE ENCUENTRA EL EVENTO**

Con la definición del contexto operacional se obtiene una idea clara de la importancia que el sistema tiene para todo el complejo y los procesos asociados:

- Ubicación del sistema en la planta (Plot Plan)
- Rol del sistema dentro del proceso (DFP y descripción del proceso)
- Ocurrencia de las fallas

Una de las técnicas que se utiliza es observar directamente, para obtener información, así como detectar las condiciones operacionales del mismo.

### **Descripción básica del Proceso de Alquilación**

La alquilación es un proceso catalítico en el cual se combina una isoparafina (isobutano) y una olefina (butileno) para producir un compuesto de mayor peso molecular (mezcla de isoocitanos) llamado alquilado, que se encuentra dentro del rango de destilación de las naftas.

La unidad de alquilación está compuesta por dos secciones:

1. HYDRISOM (Hidroisomerización de butenos) Tiene como objetivo la eliminación de compuestos contaminantes del catalizador HF y la isomerización del 1-buteno a 2-buteno para obtener una olefina alquilable a un compuesto de mayor valor octánico.

2. HF-ALQUILACIÓN (Reacción de Alquilación) Tiene como objetivo la alquilación catalítica de las isoparafinas y olefinas.

La sección de HYDRISOM prepara la carga a procesar en la sección de HF-Alquilación. Elimina selectivamente los contaminantes del catalizador HF de la corriente de butanos, e isomeriza el 1-buteno a 2-buteno de manera de obtener un alquilato de un valor octánico de RON 3 puntos superior.

La corriente de butano proveniente de MTBE es almacenado en un tanque para que sea tratado para su uso en el proceso.

Esta corriente se pone en contacto con hidrógeno e ingresa al reactor luego de pasar por un tren de intercambio destinado a levantar la temperatura de la mezcla hidrocarburo-hidrógeno a las condiciones de reacción.

En el reactor se producen las reacciones de saturación e isomerización de los butenos sobre un catalizador de alúmina impregnado en paladio.

El efluente del reactor ingresa a un stripper para despojar por la parte superior los componentes livianos ( $H_2$ , metanol, dimetiléter) que consumen el ácido fluorhídrico utilizado en HF-Alquilación.

En la sección de HF-ALQUILACIÓN se produce la combinación de isobutano y buteno en presencia del catalizador ácido fluorhídrico para formar 2,2,4-trimetil octano y sus isómeros que constituyen una nafta 100% isoparafínica de alto valor de RON y MON y baja tensión de vapor.

La corriente de butano tratado de Hydrisom se pone en contacto con el isobutano proveniente de otra unidad que lo prepara, el isobutano de la corriente de reciclo y el ácido fluorhídrico circulante de la línea de bajada del settler (stand-pipe).

La reacción entre los butilenos de la corriente de butano y el isobutano se produce inmediatamente en los dos reactores o risers y los productos ingresan a un recipiente separador o settler.

En el settler se produce la separación del hidrocarburo y el ácido que, debido a la diferencia de gravedad específica (0,95 vs. 0,88 de la mezcla), es inducido a circular por los stand-pipes hacia la zona de reacción.

El hidrocarburo separado en la parte superior del settler, compuesto por propano, isobutano, alquilato y HF disuelto; es enviado a una torre fraccionadora de 90 platos para la rectificación de sus componentes.

El calor necesario al fondo de la fraccionadora principal será proporcionado por el horno rehedidor. Este calentador a fuego directo puede quemar gas combustible o combustóleo. La carga al rehedidor será suministrada por las bombas del rehedidor, una de ellas siendo de respaldo.

El propano y el butano son enviados a producción luego de pasar por dos defluorinadores con alúmina activada y un tratador de hidróxido de potasio para eliminar cualquier traza de ácido que puedan contener.

El isobutano es recirculado nuevamente a la sección de reacción y el producto final, alquilato, es enviado a tanque de almacenamiento.

Un diagrama de flujo típico de una Planta de proceso de Alquilación se muestra en la fig.V.1.

### **Variables Operativas**

Relación molar isobutano-olefina, Pureza de ácido, Temperatura de reacción y la Presión de operación del reactor.

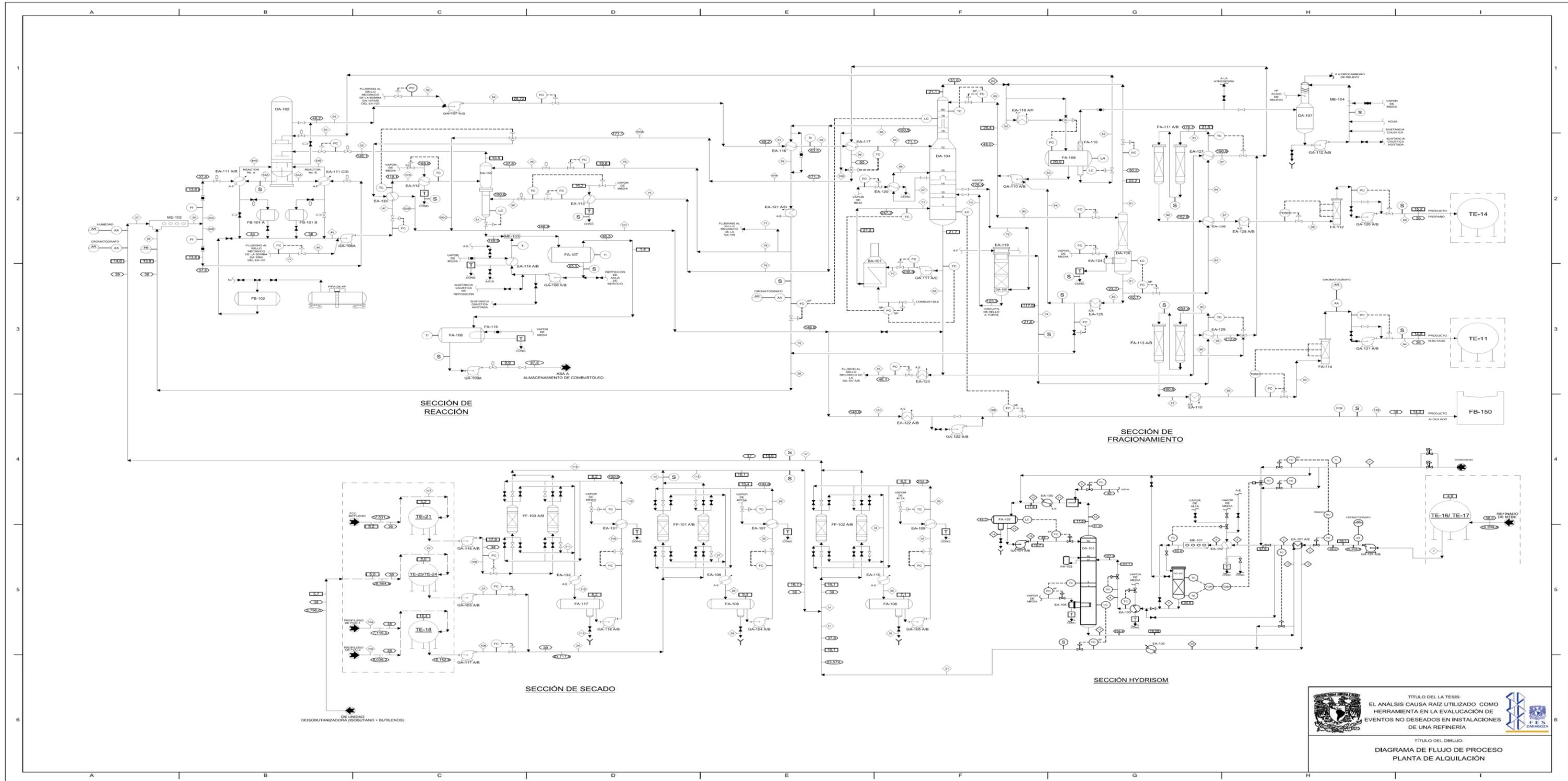


Fig. V.1. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Alquilación  
 Fuente: Diseño propio  
 Fecha: 9 de marzo de 2014

TÍTULO DEL TESIS:  
 EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ UTILIZADO COMO  
 HERRAMIENTA EN LA EVALUACIÓN DE  
 EVENTOS NO DESEADOS EN INSTALACIONES  
 DE UNA REFINERÍA

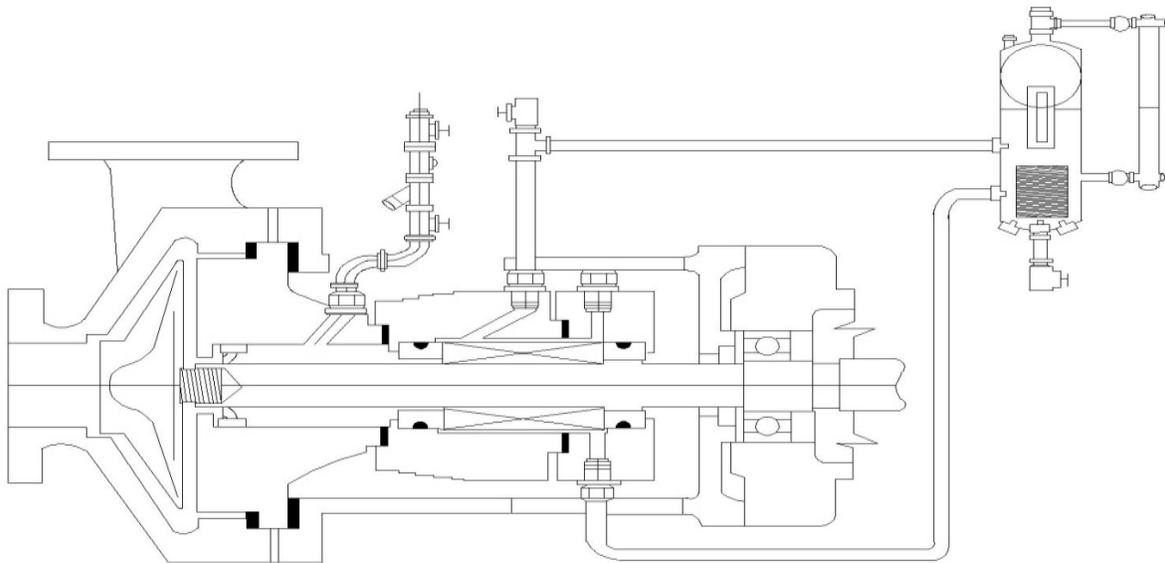
TÍTULO DEL DIBUJO:  
 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO  
 PLANTA DE ALQUILACIÓN

## Características y función del equipo de bombeo (GA-111 A/B/C)

Esta bomba proporciona la carga necesaria al rehervidor BA-101 para recircular una fracción de los fondos de la torre fraccionadora (DA-104) y otra parte se utiliza como medio de calentamiento en diferentes intercambiadores para que finalmente sea enviada a almacenamiento, dos de estas funcionan como respaldo en la tabla.V.1 se muestran las características principales del equipo y en la fig.V.2 se muestra una representación esquemática de la bomba.

**Tabla.V.1. Características de la bomba (GA-111 A/B/C)**

<b>BOMBA CENTRIFUGA GA-111 A/B/C</b>	
Tipo	Centrifuga horizontal
Servicio	Bombeo de alquilado a BA-101
Ubicación	Sección de Fraccionamiento
Capacidad	Norm. 1359 m <sup>3</sup> /h
	Max. 1698 m <sup>3</sup> /h
Presión de succión	2059 kPa
Presión de descarga	2452 kPa
Temperatura de operación	237 °C
Montaje de carcasa	Centrado
Tipo de carcasa	Doble voluta
Montaje de impulsor	Entre cojinetes
Lubricación de cojinete	Atomizado de aceite limpio
Tipo de cojinete radial	Sleeve



**Fig.V.2. Representación esquemática de la bomba (GA-111 A/B/C)**

Fuente: Diseño propio  
 Fecha: 1 de mayo de 2014

## V.2. UBICACIÓN DEL EVENTO NO DESEADO EN LA PLANTA DE ALQUILACIÓN

La fuga e incendio de alquilado en la bomba (GA-111 A/B/C) de fondos, de la torre fraccionadora (DA-104) del sector de alquilación; es un escenario que nos permite mostrar el desarrollo de la metodología para encontrar la causas raíz que desencadenaría el evento culminante que es la fuga, provocando el incendio en dicha planta, en el anexo A-1 se muestra el Plot Plan de la Planta de Alquilación y la distribución del equipo de bombeo así mismo se muestran los equipos aledaños al área del problema.

### Descripción del evento

La necesidad de ejecutar el ACR dado para este escenario, que a continuación se describe es la de identificar la problemática de la bomba y que a su vez ésta interrumpa el proceso de la planta de alquilación además del impacto asociado al problema teniendo un elevado costo por acciones de mantenimiento.

El incendio ocasionado por la fuga de alquilado en la bomba de fondos (GA-111 A/B/C) es ocasionado en el momento en el que la bomba comienza a cavitarse y esta a su vez genera un descontrol en las condiciones de operación provocando una fuga que desencadenaría un incendio, este es un evento catastrófico ya que la bomba está ubicada a un costado de la torre fraccionadora (DA-104), provocando daño a los tubos del calentador (BA-101) por bajo flujo e incrementando súbitamente la presión en él, arrastre de alquilado producto por la línea extracción de butano producto (traslape), generando un paro total de la planta, en la fig.V.3 se esquematiza la eventualidad.

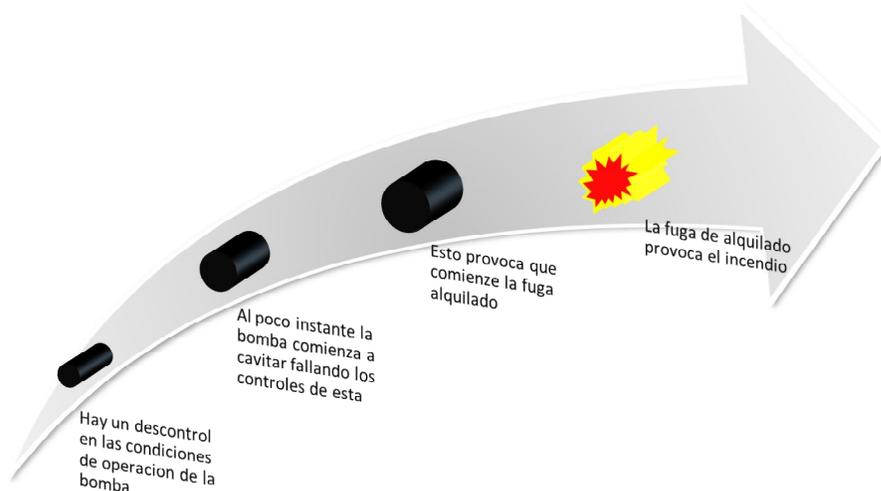


Fig.V.3. Descripción del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

### V.3. EQUIPO DE TRABAJO

Este equipo multidisciplinario ayudará a generar muchas ideas para aplicar el ACR. La idea principal de la conformación del E.T es la de involucrar al mayor número de personas en el análisis con el objetivo de obtener varios puntos de vista evitando de esta manera resultados parcializados, esto permite que el personal involucrado nivele conocimientos y acepte con mayor facilidad los resultados ya que su opiniones son tomadas en cuenta. El personal se integrará por personas encargadas de operar la planta y de la toma de decisiones referentes a la planta de alquilerón en la fig.V.4 se esquematiza como quedaría integrado el equipo de trabajo.

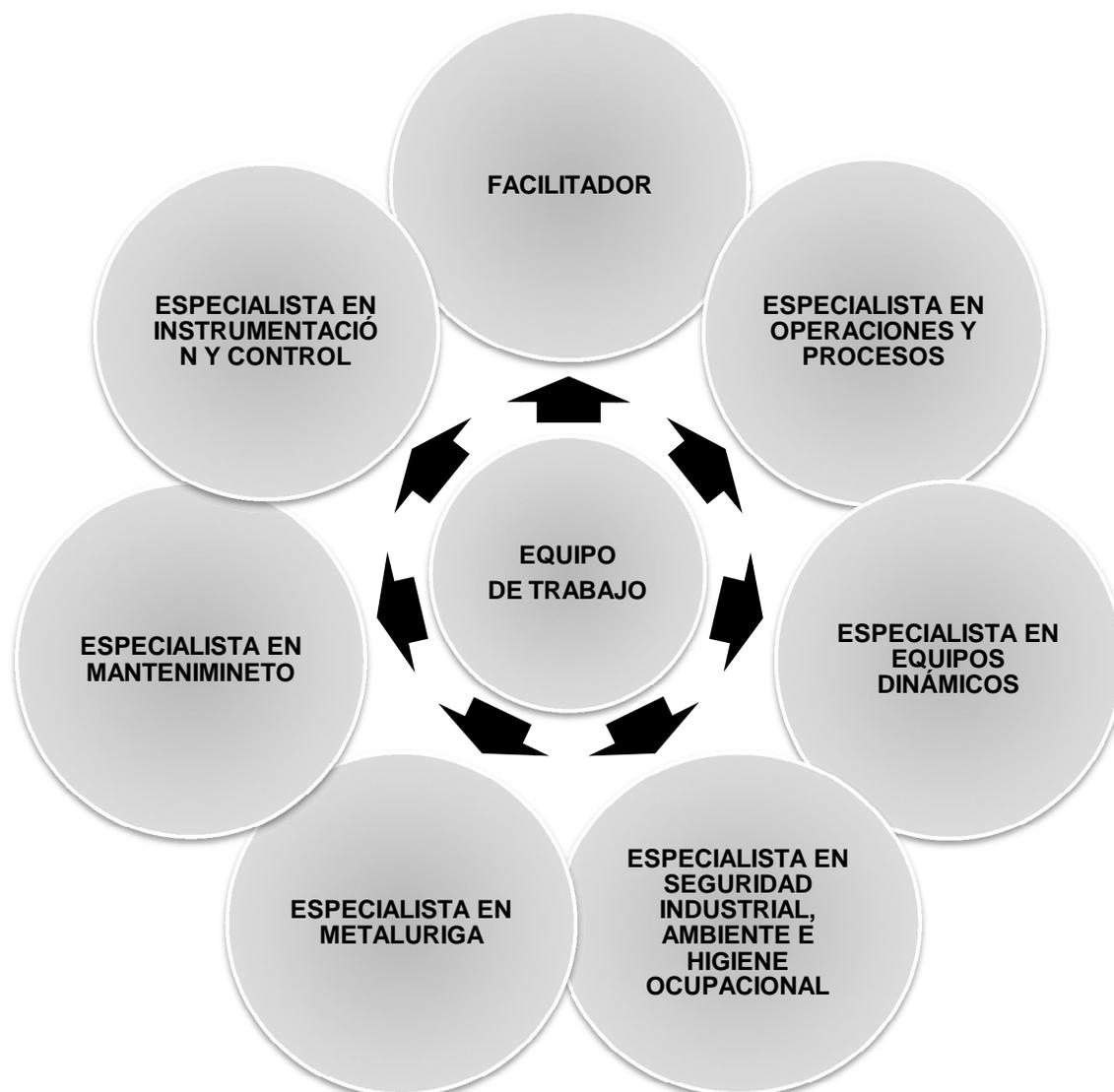


Fig.V.4. Conformación del Equipo de Trabajo

Fuente: Diseño propio

Fecha: 9 de marzo de 2014

El facilitador a criterio es la persona más importante en el proceso del ACR ya que es un miembro extra en el grupo, y su labor consistirá en administrar los tiempos durante el

desarrollo. Los distintos especialistas también deberán aportar toda su experiencia para obtener resultados favorables.

Una vez conformado el equipo de trabajo se comenzará con el desarrollo de las fases del ACR.

#### V.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR

Una vez identificado el problema se procederá a seguir paso a paso la metodología descrita en el capítulo IV quedando agrupada de la siguiente manera fig.V.5.

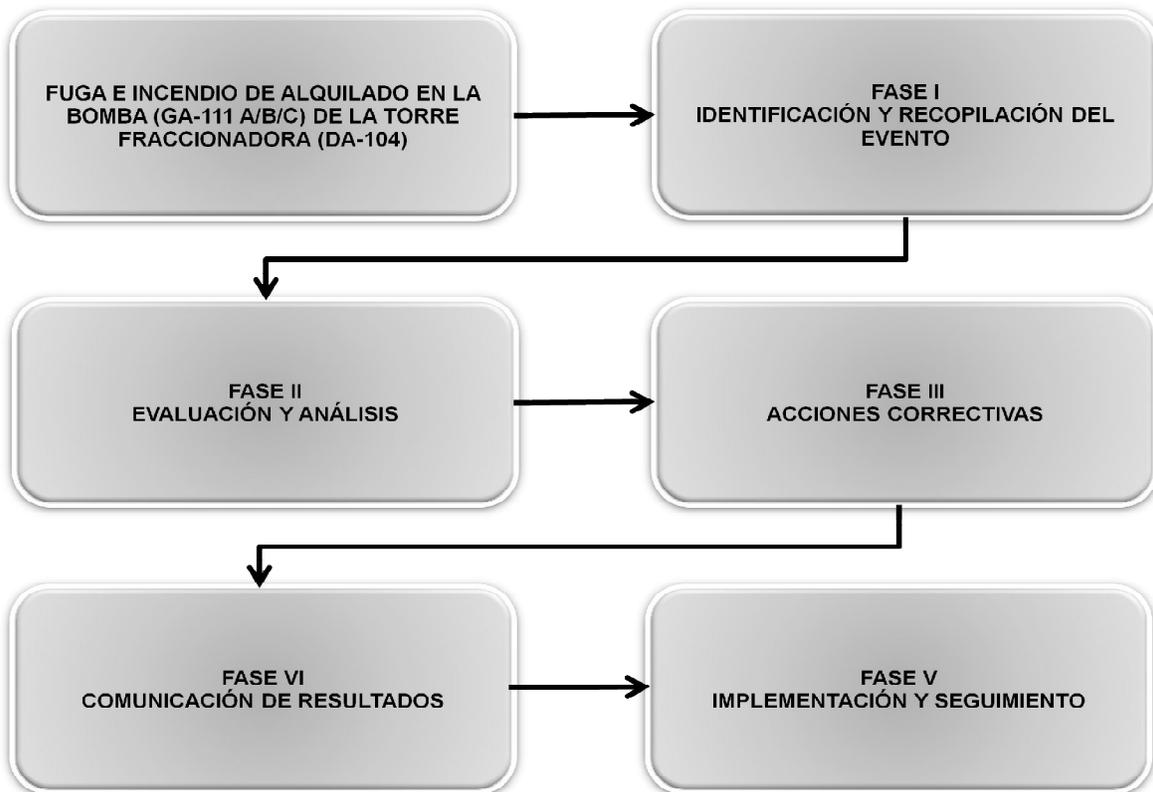


Fig.V.5. Esquema de trabajo para el desarrollo del ACR

Fuente: Diseño propio

Fecha: 30 de abril de 2014

##### V.4.1. FASE I RECOPIANDO E IDENTIFICANDO INFORMACIÓN DEL SUCESO QUE ORIGINÓ LA FUGA Y EL INCENDIO

En este paso la recopilación de información bibliográfica es de gran ayuda, se inicia con la revisión de documentos existentes de la planta, entre ellos el manual de operaciones de la planta de alquiler, procedimientos de trabajo, manual de las bombas, informes, recomendaciones técnicas, registros (de mantenimiento mecánicos, de operadores).

Ya que se identificó y se describió el evento, en esta misma fase se realizan las indagaciones pertinentes para recopilar la información sobre el problema y con el apoyo

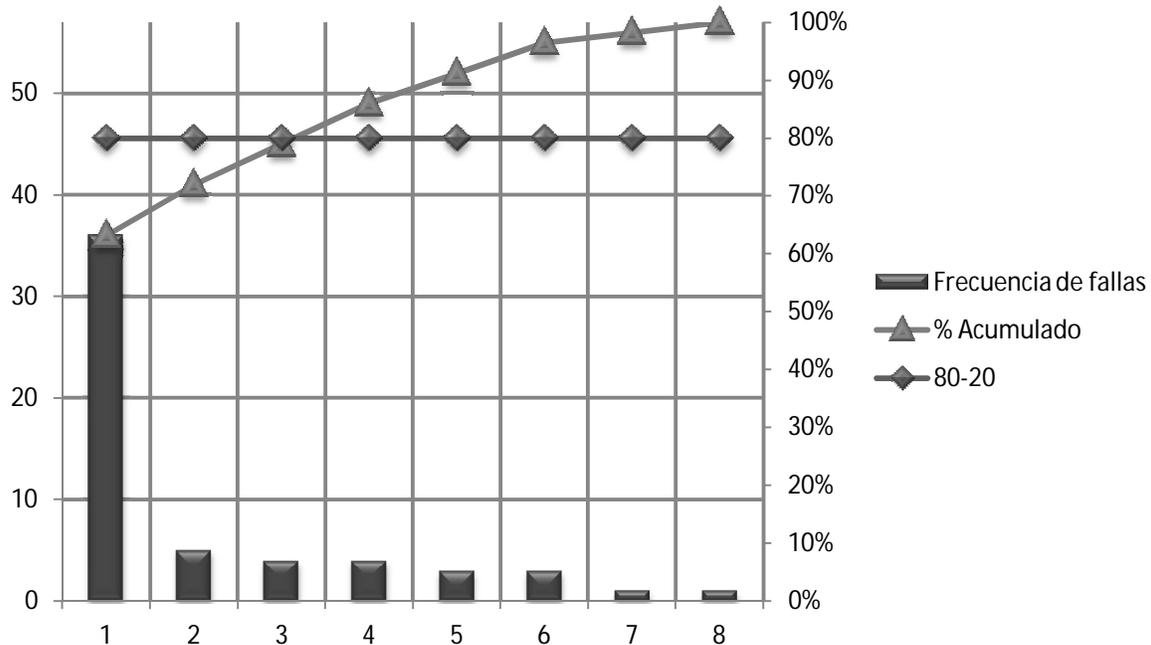
de varias personas con participación activa en los procesos de operación y mantenimiento.

Las fuentes de información que son de suma importancia son la de los análisis de fallas del sistema de bombeo, en la tabla.V.2 y gráfica.V.1 se muestran las fallas más representativas del sistema de bombeo (GA-111 A/B/C).

**Tabla.V.2. Fallas representativas del sistema de bombeo (GA-111 A/B/C)**

No.	Causa registrada	Frecuencia	%	% acumulado
1	Fuga de producto por sello mecánico	36	63.16	63.16
2	Daños en elementos que conforman la junta entre casco y cabezote	5	8.77	71.93
3	formación de incrustaciones en partes internas de la bomba	4	7.02	78.95
4	Desbalance	4	7.01	85.96
5	Partes desprendidas dentro de la bomba (impulsor y aro)	3	5.27	91.23
6	Desalineación	3	5.26	96.49
7	Rodamientos dañados	1	1.76	98.25
8	Holgura excesiva	1	1.75	100

**Grafica.V.1. Grafico de las fallas representativas del sistema de bombeo (GA-111 A/B/C)**



Ejecutar inspecciones técnicas en el sistema en estudio para evaluar su funcionalidad. Tomar en cuenta los testimonios del personal de mantenimiento y operadores de experiencia en la planta.

La información recopilada será de utilidad durante el análisis y se obtiene de las a partir de una serie de fuentes recomendadas por la metodología de ACR. Como se puede observar una de las principales fallas es la causada por fuga en sello mecánico y es de gran ayuda para así comenzar a describir otros modos de falla en la bomba.

## V.5. FASE II EVALUACIÓN Y ANÁLISIS MEDIANTE LA HERRAMIENTA DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS

Para analizar y evaluar el evento hasta sus causas raíz más profundas pasaremos a la fase II de la metodología esta nos ayudara a ir identificando las posibles causas por las que ocurrió el evento la herramienta que se utilizara es el árbol lógico de fallas ya que su desarrollo como se ha explicado en capítulos anteriores emplea la estructura de un árbol que nos permitirá dirigir de manera lógica el proceso de razonamiento en la investigación a través de un análisis que nos conduzca a determinar las causas de fondo que provocaron el problema

### V.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA

Comenzaremos de forma descendente de lo más general, desglosando la situación no deseada con todos los aspectos envueltos en el problema, hasta llegar a los elementos más detallados que se ubicaron como origen (causas raíces de dicha situación).

Los primeros dos niveles del árbol lógico tienen en cuenta todos los "hechos conocidos" del problema que se está analizando. Nos referimos a estos dos niveles como la caja superior y representan la definición del evento. La formación de la caja superior es un paso crítico en la creación del árbol lógico, porque si el evento está definido incorrectamente, definitivamente no podríamos llegar a las causas del problema que se está analizando.

El primer nivel de la caja superior es una declaración del evento. Esta es la razón por la que está analizando el problema para tales efectos lo hemos ubicado al inicio del capítulo.

El segundo nivel de la caja superior representa los modos del problema, estos son los modos en los que ha ocurrido el evento de los cuales se tiene la fuga en la bomba y el punto de ignición tabla.V.3.

**Tabla.V.3. Principales modos de ocurrencia (falla) de la bomba (GA-111 A/B/C)**

Equipo	Problema	Modo 1	Modo 2
GA-111 A/B/C	Fuga e incendio de alquilado en la bomba de fondos de torre fraccionadora	Fuga en la bomba	Punto de ignición

Se pueden analizar estos como las causas aparentes del evento, comenzando a generar hipótesis de cada uno de ellos indagando de cómo pudo haber ocurrido esto con el fin de que el problema sea más claro estas no son más que conjeturas que deben ser comprobadas para tomarlas como hechos y seguir avanzando. Estas se generaron mediante la pregunta ¿Cómo se puede dar el modo de falla? ayudando a definir las causas raíces.

Se verifican por diferentes métodos de validación los cuales pueden ser observaciones visuales, análisis de datos y ensayos no destructivos con los que se refuerzan las bases para tomarlas o no como una causa posible ya que por el contrario si una hipótesis es aceptada sin validación esta no sería más que una suposición que puede llevar a una solución errónea en la fig.V.6 se representa el desarrollo del árbol lógico del evento fuga e incendio de la bomba de fondos de la torre fraccionadora.

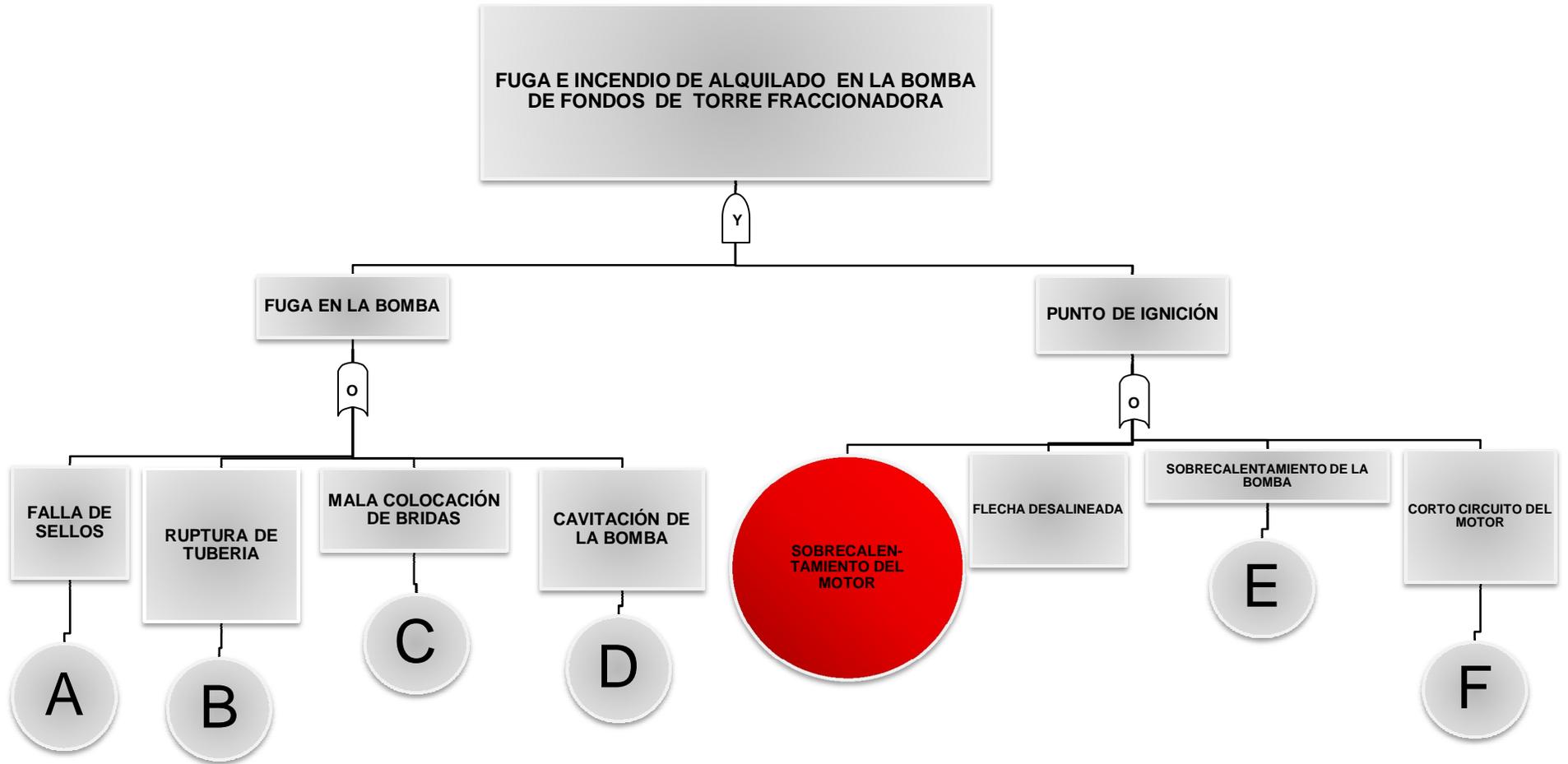


Fig.V.6. Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

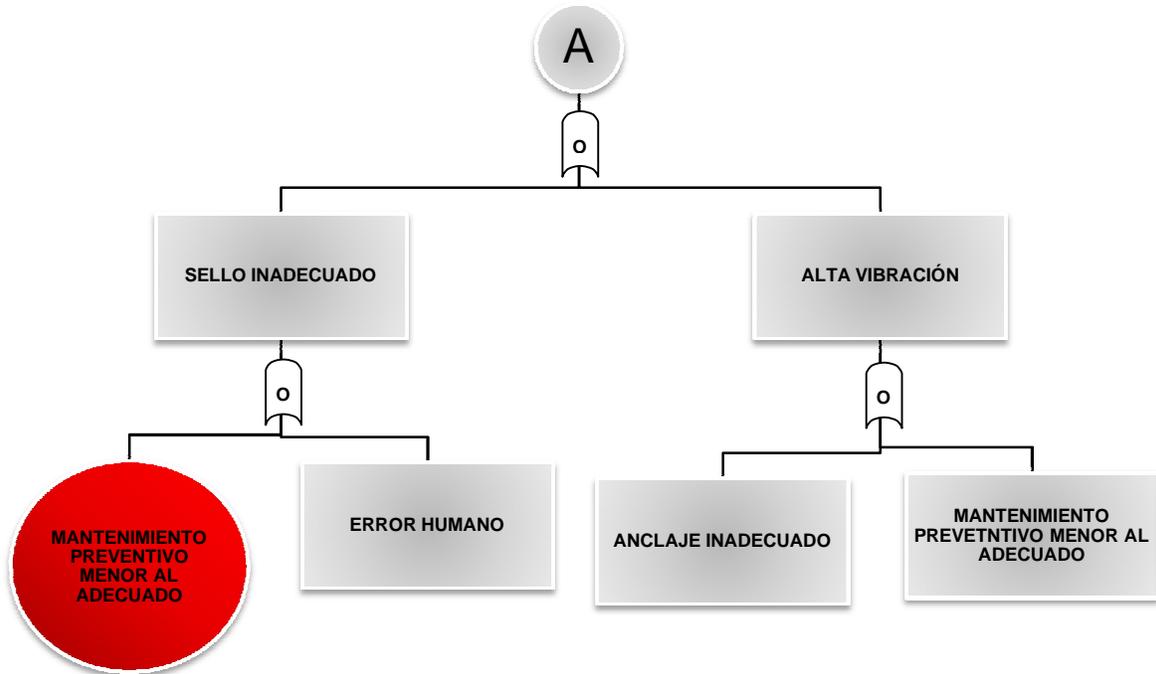


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

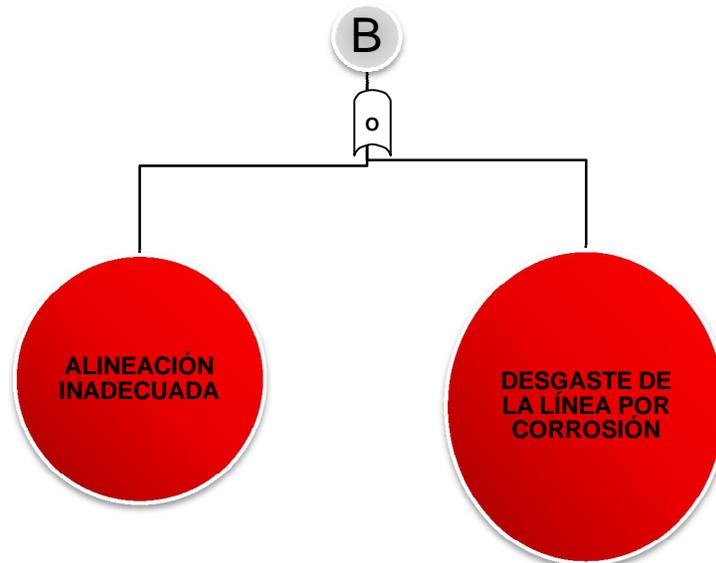


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

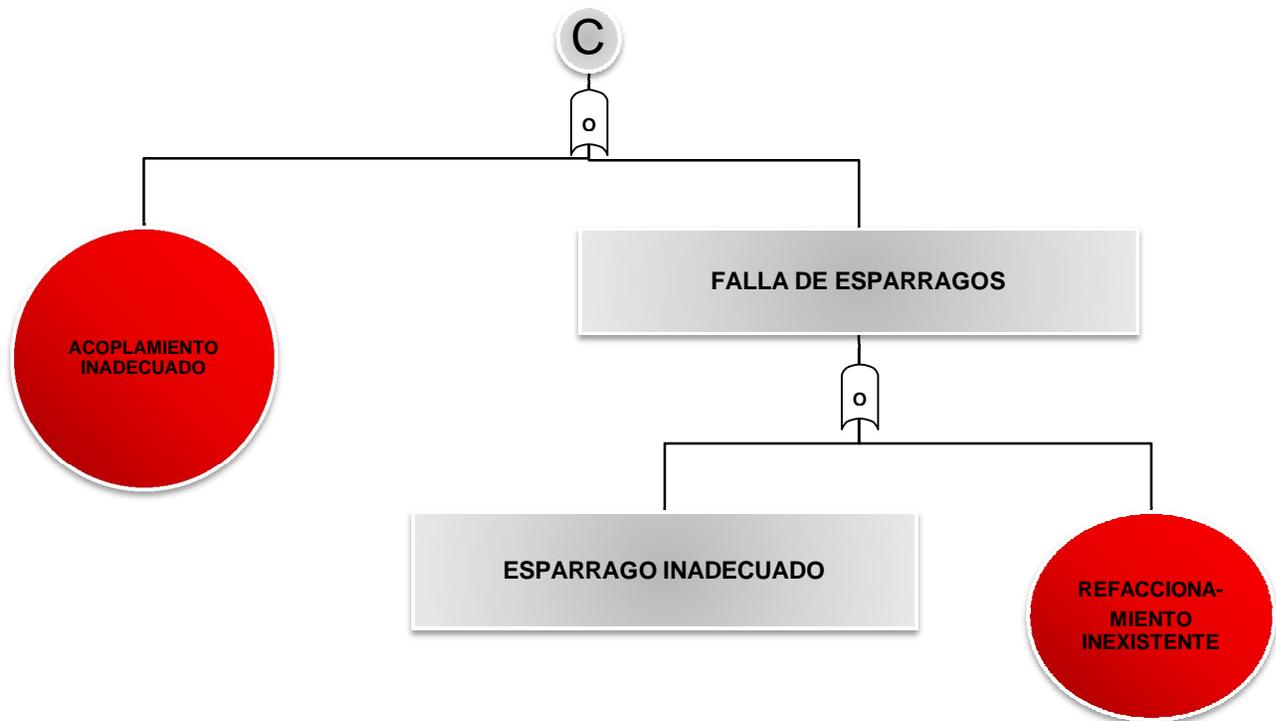


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

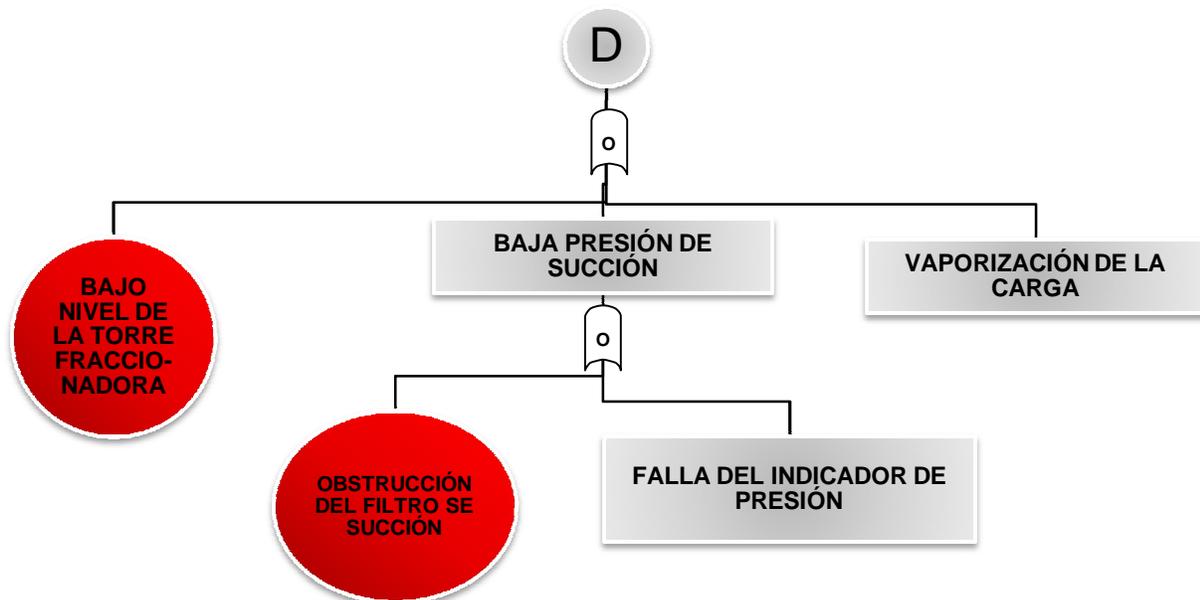


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

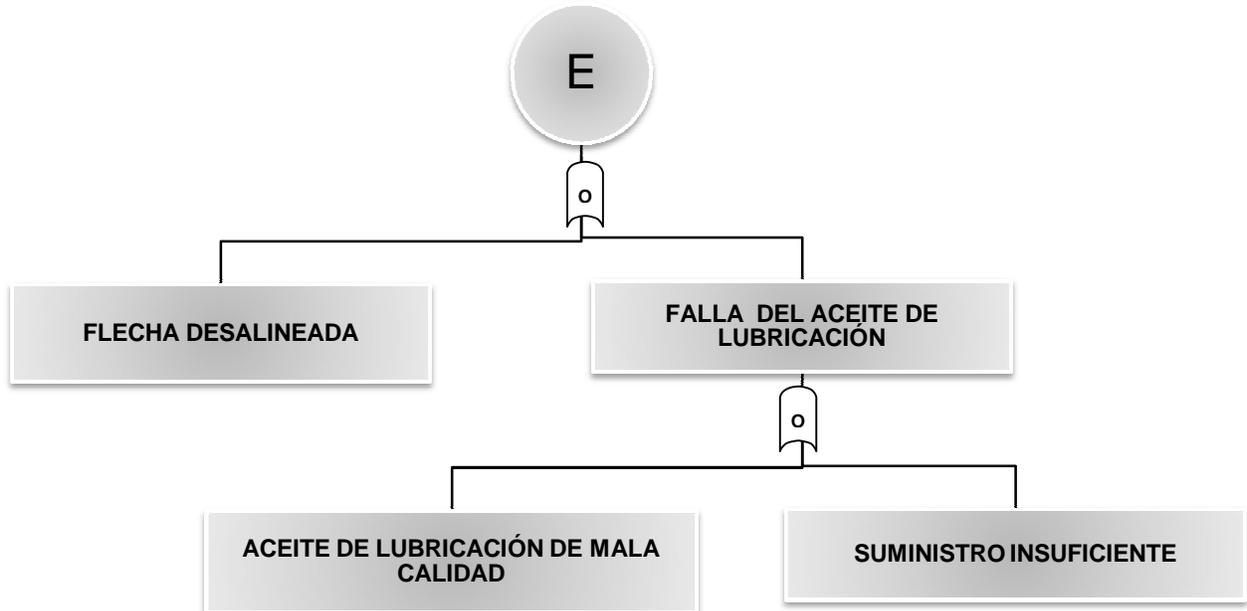


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

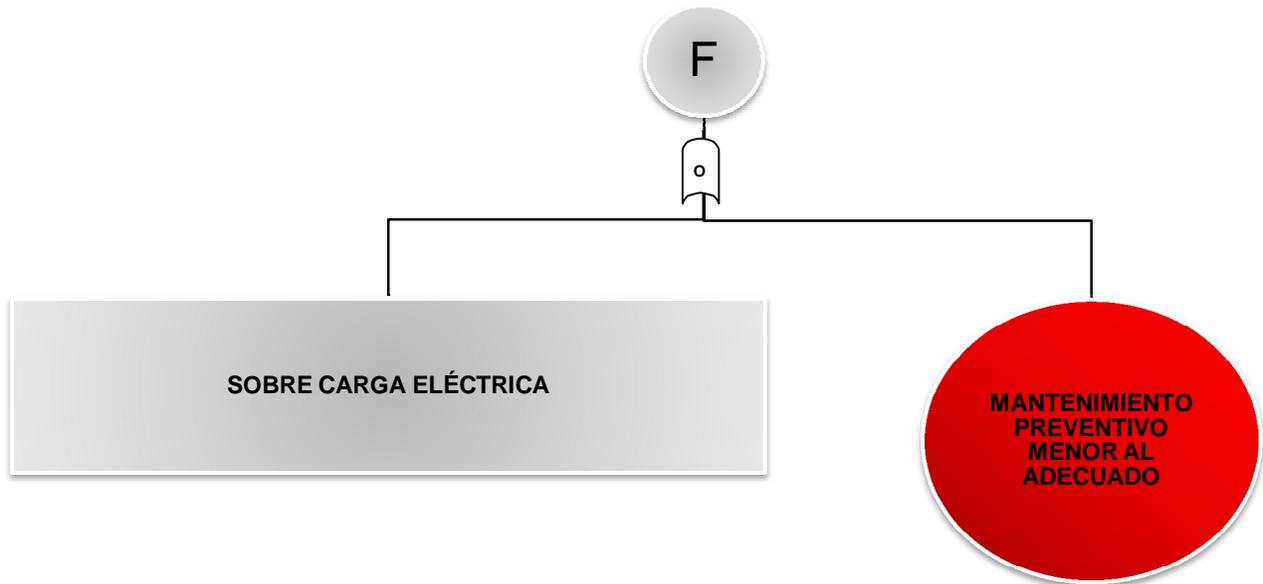


Fig.V.6 (Continuación) Desarrollo del árbol lógico del evento  
Fuente: Diseño propio  
Fecha: 9 de marzo de 2014

Una vez identificadas las hipótesis probables de acuerdo al contexto operacional, se identificaron las causas raíces que explican la ocurrencia de los modos de fallos obteniendo las causas físicas, humanas y latentes del sistema obteniendo los siguientes resultados:

**Causas físicas:** De todas las causas presentadas se tomaron las causas físicas las siguientes: sobrecalentamiento del motor, alineación inadecuada, desgaste de la línea por corrosión y obstrucción del filtro de succión por ser los eventos que en la práctica puede ser más factibles para verificar y que teóricamente permiten explicar de una manera comprensible el proceso desarrollado para encontrar las causas raíces del problema.

**Causas humanas:** Para el estudio de este tipo de causas se deberá tomar como evidencia la información de la planta para poder encontrar si no se realiza un oportuno mantenimiento de los elementos que conforman a la bomba las fallas de tipo humano podrían ser comprobadas por los históricos que se encuentran en el sistema de mantenimiento y del diálogo directo con el personal de operación y mantenimiento, de las causas humanas posibles tenemos el bajo nivel en la torre fraccionadora, refaccionamiento inexistente.

**Causas latentes:** Este tipo de causas son las que realmente ocasionan la cadena de eventos que producen el problema, la causa identificada para este evento es la del mantenimiento preventivo menor al adecuado esto nos lleva a la ausencia de una rutina de mantenimiento adecuado que involucre la revisión de los elementos de la bomba, lo que se convierte en una grave deficiencia para el sistema ya que al no realizarse la implementación de actividades preventivas esta presentara una tasa elevada de fallas.

## V.6. FASE III TOMA DE DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS DEL EVENTO

Una vez completado el análisis mediante el árbol y que se han determinado las causas raíces físicas, humanas y latentes sobre la situación de la bomba de fondos de la torre fraccionadora. Pasaremos a la fase III de la metodología que nos servirá para tomar las decisiones sobre las acciones correctivas durante las sesiones de mantenimiento a las que deberá ser sometido el equipo.

Las recomendaciones a las acciones que se ejecutarán con la finalidad de corregir o eliminar las causas que provocaron el evento no deseado, y de esta manera evitar la reaparición del mismo. Estas acciones correctivas se dividen en:

- Acciones correctivas
- Acciones de adaptación
- Acciones de monitoreo

El proceso a seguir para definir estas acciones correctivas es el siguiente:

1. Formular las acciones correctivas para las causas raíces físicas, humanas y latentes, así como aquellas que sólo contribuyen al problema.
2. Evaluar las alternativas y seleccionar las acciones correctivas.

3. Evaluar el impacto en otras áreas de la organización.
4. Evaluar el impacto en los recursos (humanos, económicos y materiales).
5. Evaluar el impacto en la normatividad que rige en la organización.
6. Asegurar la adecuación de las acciones correctivas.
7. Planificar la implantación.

Ya que una vez se siguieron los puntos anteriores, el sistema de bombeo de alquilero tendrá que poseer un programa de mantenimiento planificado, en donde se tendrán que aplicar los planes correctivos, en la tabla.V.3 se presentan algunas de las acciones correctivas:

**Tabla.V.4 Acciones correctivas propuestas en la bomba de alquilero**

Evento	Causas raíz	Acciones correctivas
Fuga e incendio de alquilero en la bomba de fondos, de la torre fraccionadora	<b>Físicas</b>	1. Actualizar y continuar con el programa de mantenimiento preventivo y predictivo a la bomba. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento al personal. 3. Mantener la operación y calidad de las materias primas dentro de los límites establecidos. 4. Asegurar la limpieza de filtros de succión. 5. Contar con aceite lubricante de repuesto y vigilar los niveles del mismo en el sistema de lubricación de la bomba 6. Cuando el motor de la bomba sea retirado por mantenimiento, en su reinstalación verificar la alineación de la flecha. 7. Rotular en el cuerpo de la válvula check el sentido del flujo, y verificar su instalación, cuando sea removida por mantenimiento.
	<b>Sobrecalentamiento del motor</b> Alineación inadecuada Desgaste de la línea por corrosión Obstrucción del filtro de succión	
	<b>Humanas</b>	
	<b>Bajo nivel en la torre fraccionadora</b> Refacciones inexistentes	
	<b>Latentes</b>	
	<b>Mantenimiento preventivo menor al adecuado</b>	

## V.7. FASE IV COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

En los siguientes párrafos se propondrá una serie de puntos para realizar un buen reporte o informe, comunicando los resultados que son en gran medida el éxito de la implantación de las recomendaciones, por lo que es importante la primera impresión que tendrán del mismo. Por esta razón, enseguida se enumerarán los puntos mínimos que deberá contener un reporte o informe de ACR.

1. Título del evento. Incluye el qué, cuándo, dónde, quién y el cómo de la situación. Indique el número de eventos que se han presentado.
2. Condiciones iniciales. Incluye la fecha, hora del evento, condición, configuración del equipo involucrado y eventos que generaron el problema entre otras cosas.
3. Secuencia del evento. Descripción detallada del evento, circunstancias que generaron el evento, método utilizado para descubrirlo, acciones automáticas, acciones de operación, fallas de equipo, fallas en las reglas de seguridad, higiene y medio ambiente, etc.
4. Causas del Evento. Descripción del porqué el problema ocurrió, incluyendo la causa principal del evento junto con cualquier otro factor que contribuya a la acción inadecuada.
5. Consecuencias del evento. Incluir las causas raíces físicas, humanas y latentes del evento o problema. Incluir las consecuencias del evento y cualquier suceso o efecto adverso que pudiera empeorar las condiciones del evento.
6. Acciones correctivas. Describir cualquier acción correctiva inmediata a ser tomada en el corto, mediano y largo plazo. Indicar claramente los responsables de su ejecución.
7. Aplicabilidad en otros lugares o locaciones.
8. Datos de soporte. Reportes o formatos aplicables, reportes de inconformidades, requerimientos de asistencia o apoyo de ingeniería, modificaciones o cambios en la planta, órdenes de trabajo, figuras, tablas, fotografías y otros documentos que sean necesarios, Mapa de Eventos y factores Causales desarrollado, etc.

## **V.8. FASE V CONTROL, SEGUIMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS ACCIONES TOMADAS**

La planta de alquiler deberá establecer mecanismos para el control de la implantación y ejecución de los resultados, lo cual garantizará la eliminación de las causas raíces del problema analizado. Las recomendaciones emitidas en el ACR son las que eliminarán el problema de una forma definitiva, por tal motivo, se hace necesario e importante diseñar un plan de seguimiento eficaz que permita la implementación adecuada y el cumplimiento satisfactorio de las mismas.

El sistema de seguimiento a las recomendaciones constituirá un paso importante en la eliminación definitiva del evento, ya que este incluirá los recursos materiales, técnicos y de personal que son necesarios para llevar a cabo las diversas actividades propuestas en el plan. Durante la implementación del mismo, el personal de mantenimiento y operación desempeñarán un papel fundamental, porque, serán ellos quienes con sus capacidades, habilidades y potencialidades participaran activamente en el mejoramiento continuo de los procesos de confiabilidad operacional.

## CONCLUSIONES

En este segmento del trabajo de tesis se presentaron las conclusiones, en concordancia con los objetivos perseguidos:

Al término del trabajo los objetivos generales y específicos planteados en un inicio fueron cumplidos, se describió la metodología del análisis causa raíz (ACR), al mismo tiempo que se dio una definición de ésta, se expuso un caso en el cual se muestra su aplicación.

Dentro del marco teórico y a manera de breviarío para el desarrollo de la tesis se mostraron los procesos que comúnmente suelen ser usados en instalaciones de refinación dando una definición de cada uno de éstos y poder así comprender su funcionalidad, también se mostraron algunos de los equipos de proceso, que pudieran generar o desencadenar eventos no deseados dentro de este entorno.

Dentro de este punto también se mostraron algunos aspectos de las tipologías de fallas, la clasificación y cómo estas pueden afectar al proceso productivo de una refinería. Otro de los puntos a tratar fue el de presentar las diferentes herramientas que son de utilidad para el desarrollo del ACR dando a conocer la importancia de cada una de estas al momento de realizar el análisis minuciosos, de tal forma que los riesgos que se identifican pueden ser reducidos o eliminados desde sus causas básicas, teniendo en cuenta que estos pueden desencadenar una tragedia.

Esta metodología de análisis de eventos es importante debido a su facilidad en la resolución de problemas recurrentes de manera segura. En ocasiones el ACR puede ser visto como un método correctivo, que actúa sobre los efectos producidos por causas latentes no identificadas. La aplicación de esta metodología está definida por un procedimiento, el cual permite integrar conocimientos teóricos y prácticos que fundamentan la construcción de estrategias adecuadas para la eliminación de fallas repetitivas.

En el caso de estudio se observó mediante una ejemplificación, realizado a una bomba en el sector de alquilación el desarrollo de la metodología dividido en fases, se describió desde la problemática y las posibles causas que ocasionaron la falla hasta llegar a las causas raíz del mismo, cabe decir que muchas veces no solamente se llega a una sola causa, sino que, como en el caso descrito fueron varias causas probables las que originaron la falla.

Por lo tanto se comprendió que muchas veces no solo una causa puede dar origen a una falla de esta magnitud y con esto se pudo dar una idea de que tan complejos son los procesos que se desarrollan en instalaciones dentro de una refinería y así mismo los equipos que intervienen en cada uno de estos por lo tanto las acciones no deben ser tomadas a la ligera aunque en ocasiones, posponer la acción correctiva de la causa raíz, muchas veces es común, que en la presión de la rutina diaria las personas responsables se hallen con frecuencia imposibilitadas de eliminar el problema de fondo.

En consecuencia se hace necesario el crear programas tales como el ACR para ayudar a recordar que tal vez el programa de mantenimiento preventivo que no se ejecuta está asociado a la cantidad de problemas que presentan los equipos, esto a su vez hace que la situación se convierta en la búsqueda de culpables y a que se evadan responsabilidades.

Es importante hacer resaltar que durante el proceso de realización del proyecto tesis fue el de dar a conocer la metodología ACR generando un panorama general y su principal funcionalidad dentro de la resolución de eventos no deseados enfocado a instalaciones de una refinería, esto puede dar hincapié a trabajos posteriores que pudiesen complementar o ahondar en este tema, lo cual generaría una plataforma de mayor conocimiento.

Otro punto a mencionar es el que debido a la competitividad que existe en el medio y entorno, el ACR constituye un proceso importante que puede ser aplicado satisfactoriamente en cualquier empresa u organización, ya que esta optimiza costos al proporcionar los elementos necesarios para atacar y eliminar los problemas que impiden obtener una mayor rentabilidad.

Para finalizar y resaltar la participación y el rol que desempeñamos los Ingenieros Químicos al momento de desarrollar la serie de pasos que integran esta metodología ampliando así la gama de actividades en la cual podemos desarrollarnos en la industria.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

### Términos

#### **Causa Raíz**

Es el origen de una falla en su estado inicial o punto de partida. En otras palabras es la razón esencial por la cual falla un material, equipo, máquina o sistema.

#### **Confiabilidad Operacional**

Se define como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial.

#### **Falla**

Falla es una condición no deseada que hace que el elemento estructural no desempeñe una función para la cual existe. Comparación de lo que está sucediendo con lo que debería suceder.

#### **Herramienta**

Es una serie de pasos elaborados a fin de facilitar la realización de una tarea que requiere de una aplicación correcta.

#### **Lluvia de Ideas (Brainstorming)**

Es un proceso didáctico y práctico mediante el cual se intenta generar creatividad mental respecto de un tema.

#### **Mantenimiento**

Conjunto de actividades que deben realizarse a instalaciones, equipos e instrumentos, con el fin de corregir o prevenir fallas.

#### **Metodología**

La metodología es aquella guía que se sigue a fin realizar las acciones propias de una investigación. En términos más sencillos se trata de la guía que nos va indicando qué hacer y cómo actuar cuando se quiere obtener algún tipo de investigación. Es posible definir una metodología como aquel enfoque que permite observar un problema de una forma total, sistemática, disciplinada y con cierta disciplina.

#### **Six Sigma**

Es una metodología de mejora de procesos, centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos, consiguiendo reducir o eliminar los defectos o fallas en la entrega de un producto o servicio al cliente.

## Abreviaturas

**ACR:** Análisis Causa Raíz

**ANSI:** Instituto Nacional Americano de Estandarización

**C.O:** Confiabilidad Operacional

**DOE:** Departamento de energía (en inglés)

**DMAIC:** Siglas (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar)

**E.T:** Equipo de Trabajo

**FCC:** Planta de desintegración catalítica

**GQM:** Siglas (Meta, Pregunta e Indicador) (en inglés)

**ICBM:** Misil balístico intercontinental

**K-T:** Herramienta Kepner-Tregoe

**M.C.C:** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**MON:** Índice de Octano en el Motor

**MORT:** Árbol de Omisiones y Riesgos Administrativos (en inglés)

**PEP:** Pemex Exploración y Producción

**RON:** Índice de Octano Investigado

**S.A:** Servicios Auxiliares

**SGC:** Sistema de Gestión de Calidad

**TOP:** Evento Top (en inglés)

**TPM:** Mantenimiento Productivo Total (en inglés)

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros:

- [1] Paul F. Wilson, Larry D. Dell and Gaylord F. Anderson (1993). Root Cause Analysis (A Total Quality Management). USA: ASQC Quality Press.
- [2] Lee N. Vanden Heuvel, Donald K. Lorenzo, Laura O. Jackson, Walter E. Hanson, James J. Rooney and David A. Walker (2008). Root Cause Analysis Handbook. USA: ABS Consulting.
- [3] Robert J. Latino and Kenneth C. Latino (2002). Root Cause Analysis (Improving Performance for Bottom-Line Results). USA: CRC Press.
- [4] R. Keith Mobley. (1999). Root Cause Failure Analysis. USA: Newnes.
- [5] Luis José Amendola. (2006). Gestión de Proyectos de Activos Industriales. España: UPV.
- [6] A.D. Livingston, G. Jackson and K. Priestley. (2001). Root Causes Analysis: Literature Review. HSE (Health and Safety Executive).ISBN: 0-7176-1966-4.
- [7] Zuñiga Vargas Angel. (2011). Mantenimiento Proactivo. ESPOL. ISBN: 978-9978-310-92-2
- [8] Dean L. Gano. (2011). Reality Charting Seven Steps to Effective Problem-Solving and Strategies for Personal Success. ISBN: 978-1-883677-13-8.

### Manuales:

- [1] Guide to Good Practices for Developing and Conducting Case Studies. (1998). U.S. Department of Energy.
- [2] “Guía para la Solución de Problemas Mediante la Metodología de Análisis Causa Raíz (ACR) en Pemex Exploración y Producción”. (2006) PEMEX.
- [3] Procedimientos para el Análisis de Incidentes (Árbol de Causas Raíz). (1998). PEMEX Refinación.
- [4] Guía Técnica para la Investigación y Análisis de Causas Raíz. (2007). PEMEX Dirección Corporativa de Operaciones.
- [5] Root Cause Analysis Guidance Document. (1992). U.S. Department of Energy.
- [6] Guía de Aprendizaje (Metodología de Análisis Causa Raíz (ACR)). PEMEX.

### Tesis:

- [1] Díaz Hernández, Jaime Alberto y Tasco Quintero, Jhon Alexander (2007). Aplicación de la Metodología Análisis Causa-Raíz (ACR) para la Reducción de Fallas en las Bombas de Subsuelo del Sistema de Bombeo Mecánico en Pozos Críticos del Campo la CIRA-

INFANTAS. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Petrolero, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

- [2] Vera Muñoz Hernando (2011). Aplicación de la Metodología Análisis Causa Raíz (RCA), para la Eliminación de un mal actor en Equipos Críticos de la Som-Ecopetrol S.A. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Mecánico, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- [3] Ortega Luz del Mar (2009). Propuesta de Acciones de Mantenimiento para los Sellos de las Bombas Centrifugas G-4515 A/B, Planta Hidrotratamiento de la Refinería Puerto la Cruz. Trabajo especial de grado, Universidad de Oriente, Venezuela.
- [4] Jesús Adolfo Martínez Calderón (2009). Propuesta para el incremento de la confiabilidad de los equipos críticos, basado en un Análisis Causa Raíz. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Mecánico, Universidad de Oriente, Venezuela.

#### **Artículos:**

- [1] Martínez Pérez F., Barroso Moreno A. Aplicación de la Tribología y el Análisis de la Causa Raíz (RCA) en Motores de Combustión Interna. Revista Ingeniería Mecánica, 11 de julio de 2008 ISSN: 1029-516X.
- [2] Ruiz López Pedro, Salinas Rodríguez González Carmen y Escribano Alcalde Juan. Análisis de Causas Raíz. Una Herramienta Útil para la Prevención de Errores. Revista Calidad Asistencial 22 de noviembre 2004.
- [3] Arellano Gómez Juan, Rea Soto Rogelio y Calixto Rodríguez Roberto. Integración de Arboles de Falla, Taxonomías y Diagramas de Niveles para Realizar Análisis de Causa Raíz. Boletín IIE diciembre 2012.
- [4] Ing. Linares Omar. Análisis Causa Raíz, una Herramienta Invaluable para el Diagnostico de Fallas. Boletín # 16 <http://www.widman.biz> 2004.
- [5] Ing. García Palencia Oliverio. El Análisis Causa Raíz, Estrategia de Confiabilidad Operacional. Reliability World Latín América 2005.
- [6] Ing. Gómez Calzada Leopoldo, Ing. Medina Márquez Marcial, Ing. Albores Velasco Aarón Tito. Folleto Técnico Refinería "Ing. Antonio Dovali Jaime" ,PEMEX 2000.

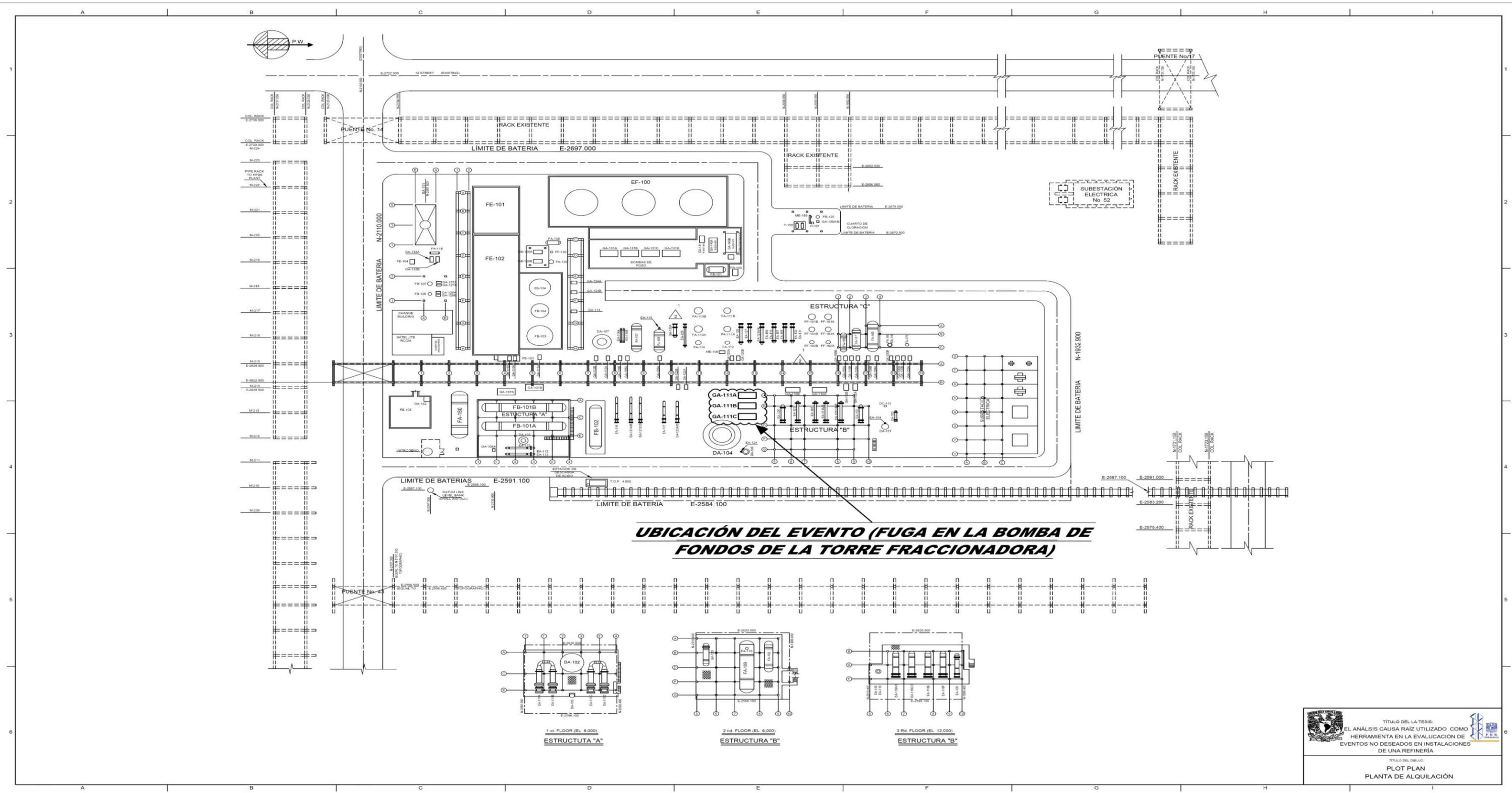
#### **Páginas WEB:**

- [1] Industry and Healthcare, Reliability Center Inc. <http://www.reliability.com/> 19 de noviembre 2013.
- [2] MECA EVOLUTION. [http://mecabloggetica.blogspot.mx/2013/10/analisis-de-causa-raiz-acr\\_9607.html](http://mecabloggetica.blogspot.mx/2013/10/analisis-de-causa-raiz-acr_9607.html) 24 de noviembre de 2013.

- [3] Confiabilidad. Net, La Cultura de Confiabilidad.  
<http://confiabilidad.net/articulos/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/> 23 de noviembre de 2013.
- [4] Secretaria de Energía. [http://www.sener.gob.mx/res/85/Refinación\\_Web.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/85/Refinación_Web.pdf) 8 de noviembre 2012.

# ANEXOS

A-1 Plot Plant de la Planta de Alquilación



## A-2 PEMEX SSPA

### SISTEMAS DE SEGURIDAD IMPLEMENTADOS POR PEMEX

Los accidentes ocurridos, marcaron un cambio radical, tanto en la manera de percibir los incidentes y accidentes como en la forma de prevenirlos y aprender de ellos. En este sentido PEMEX, instrumentó sistemas de administración para la Seguridad, Salud y Protección ambiental, en base a las prioridades y necesidades de cada uno de los organismos subsidiarios.

El desarrollo del sistema PEMEX-SSPA se integra por tres sistemas:

- Subsistema de Administración de la Seguridad de los Procesos (SASP)
- Subsistema de administración de salud en el trabajo (SAST)
- Subsistema de Administración Ambiental (SAA)

Estos tres subsistemas se basan en la aplicación de las doce Mejores Prácticas Internacionales en Seguridad, Salud y Protección Ambiental (MPI's), bajo un proceso de disciplina operativa y de aplicación única.

Las entidades responsables en los organismos subsidiarios y el corporativo de la administración de la seguridad, la salud y la protección ambiental. Éstas son: GASIPA (de PEMEX-Gas y Petroquímica Básica), **la SASIPA (de PEMEX-Refinación)**, la SSIPAC (de PEMEX-Exploración y Producción), la GCSIPA (de PEMEX-Petroquímica), la GCSIPA (de la Dirección Corporativa de Ingeniería y Desarrollo de Proyectos) y la SSS (de la Dirección Corporativa de Administración).

SASIPA tiene la facultad de dirigir o participar en el análisis de los incidentes que considere pertinentes. Siempre que se analice un incidente debe realizarse el análisis de causas raíz correspondiente, con el propósito de identificar sus causas Físicas, humanas o de sistemas, observando lo dispuesto en la edición vigente del documento normativo DG-SASIPA-SI-06101.

El Sistema de Seguridad, Salud y Protección Ambiental (SSPA) tiene como objetivo lograr la meta de cero lesiones, cero incidentes éticos o ambientales y cero conflictos laborales. Para lo anterior, Pemex ha implantado cinco herramientas fundamentales:

- Disciplina operativa (DO)
- Administración de la seguridad de los procesos (ASP)
- Integridad mecánica y aseguramiento de la calidad (IMAC)
- Doce mejores prácticas internacionales

En 2008, el índice de frecuencia acumulado global de la industria petrolera fue 0.47 accidentes por millón de horas-hombre laboradas con exposición al riesgo, 20.3 por ciento inferior al del año anterior, resultado de los avances en la sistematización y mejora del Sistema PEMEX-SSPA.

**ANUARIO ESTADÍSTICO PEMEX-2013**

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Índice de frecuencia (número de accidentes incapacitantes por millón de horas-hombre trabajadas)											
Petróleos Mexicanos	1.17	1.09	1.50	1.06	0.67	0.59	0.47	0.42	0.42	0.54	0.61
Pemex-Exploración y Producción	1.14	1.35	1.67	1.26	0.96	1.22	0.74	0.72	0.43	0.39	0.56
Pemex-Refinación	1.10	0.63	1.23	1.16	0.59	0.27	0.24	0.32	0.66	0.80	0.76
Pemex-Gas y Petroquímica Básica	1.01	0.92	0.38	0.26	0.07	0.10	0.53	0.10	0.18	0.20	0.35
Pemex-Petroquímica	0.88	1.13	2.00	1.13	0.70	0.48	0.80	0.45	0.29	0.68	0.49
Corporativo de Pemex	1.79	1.54	1.85	0.71	0.42	0.07	0.12	0.07	0.09	0.48	0.61

## A-3 Lista de Figuras, Tablas y Graficas

### FIGURAS

#### CAPÍTULO I

FIG. I.1. ESQUEMA GENERAL DE LAS ETAPAS DE REFINACIÓN .....	4
FIG. I.2. DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA (PRIMARIA) .....	5
FIG. I.3. DESTILACIÓN AL VACIO.....	6
FIG. I.4. DESINTEGRACION CATALITICA (FCC).....	7
FIG. I.5. PLANTA HIDRODESULFURADORA. ....	8
FIG. I.6. PLANTA REDUCTORA DE VISCOSIDAD.....	9
FIG. I.7. PLANTA DE COQUIZACIÓN .....	10
FIG. I.8. PLANTA DE ALQUILACIÓN.....	10
FIG. I.9. PLANTA DE REFORMACIÓN.....	11
FIG. I.10. PLANTA ISOMERIZADORA .....	12
FIG. I.11. PLANTA DE MTBE .....	13
FIG. I.12. PLANTA DE TAME .....	13
FIG. I.13. CONFORMACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES .....	14

#### CAPÍTULO II

FIG. II.1. ESQUEMA DE LOS PUNTOS QUE RODEAN AL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.....	21
FIG. II.2. CAPACIDAD DE UNA INSTALACIÓN DENTRO DE LA C.O.....	22
FIG. II.3. HERRAMIENTAS DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	23
FIG. II.4 SIMPLE ESCENATIO QUE PRODUCE UN EVENTO DE PÉRDIDA.....	24
FIG. II.5. CATEGORÍAS DEL ACR .....	28
FIG. II.6. CAUSAS DIRECTAS .....	35
FIG. II.7. CAUSAS BÁSICAS .....	35
FIG. II.8. DINÁMICA DE UN ACCIDENTE.....	36
FIG. II.9. ESQUEMA DE UN EVENTO (FALLAS, ACCIDENTES/INCIDENTES).....	37

#### CAPÍTULO III

FIG. III.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS .....	43
FIG. III.2. EJEMPLO DE UN PUERTA LÓGICA TIPO “O” .....	45
FIG. III.3. EJEMPLO DE UNA PUERTA LÓGICA TIPO “Y”. .....	46
FIG. III.4. ESTRUCTURA DEL DIAGRAMA MORT .....	49
FIG. III.5. ESQUEMA DE LA PRÁCTICA DE LOS 5 PORQUÉS .....	55
FIG. III.6. ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA (ESPIÑA DE PESCADO) .....	57
FIG. III.7. FORMATO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN DIAGRAMA DE EVENTOS Y FACTORES CAUSALES.....	60
FIG. III.8. ORGANIZACIÓN DE LOS EVENTOS .....	61
FIG. III.9. CONEXIÓN DE EVENTOS .....	61
FIG. III.10. CONEXIÓN DE EVENTOS RELACIONAS LÍNEAS DISCONTINUAS.....	61
FIG. III.11. DIAGRAMA DE LOS FACTORES CAUSALES.....	63
FIG. III.12. CÓMO SE INTEGRAN LAS BARRERAS PARA PROTEGER TANTO AL PROCESO, PERSONAL Y EQUIPO .....	63
FIG. III.13. TIPOS DE BARRERAS .....	64
FIG. III.14. DIAGRAMA CAUSA EFECTO .....	68

#### CAPÍTULO IV

FIG. IV.1. EQUIPO DE TRABAJO .....	72
------------------------------------	----

FIG. IV.2. FASES DEL ACR.....	75
-------------------------------	----

## **CAPÍTULO V**

FIG. V.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PLANTA DE ALQUILACIÓN.....	87
FIG. V.2. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA BOMBA (GA-111 A/B/C).....	88
FIG. V.3. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO.....	89
FIG. V.4. CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO.....	90
FIG. V.5. ESQUEMA DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DEL ACR.....	91
FIG. V.6. DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DEL EVENTO.....	95
FIG. V.6. (CONTINUACIÓN) DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DEL EVENTO.....	96
FIG. V.6. (CONTINUACIÓN) DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DEL EVENTO.....	97
FIG. V.6. (CONTINUACIÓN) DESARROLLO DEL ÁRBOL LÓGICO DEL EVENTO.....	98

## **TABLAS**

### **CAPÍTULO I**

TABLA I.1. FALLAS MÁS COMUNES EN SECTORES Y EQUIPOS.....	15
TABLA I.1. (CONTINUACIÓN) FALLAS MÁS COMUNES EN SECTORES Y EQUIPOS.....	16
TABLA I.1. (CONTINUACIÓN) FALLAS MÁS COMUNES EN SECTORES Y EQUIPOS.....	17

### **CAPÍTULO II**

TABLA II.1. EJEMPLOS DE FALLAS ESPORÁDICAS.....	32
TABLA II.2. EJEMPLOS DE FALLAS CRÓNICAS.....	33

### **CAPÍTULO III**

TABLA III.1. SIMBOLOS UTILIZADOS PARA LA REPRESENTACIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS ..	44
TABLA III.1. (CONTINUACIÓN) SIMBOLOS UTILIZADOS PARA LA REPRESENTACIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS.....	45
TABLA III.2. USO DE COLORES QUE SEÑALIZAN LOS ASPECTOS REVELADOS.....	47
TABLA III.3. PLANTILLA PARA DESCRIBIR EL PROBLEMA.....	52
TABLA III.4. HOJA DE TRABAJO DE ANÁLISIS DE PROBLEMAS.....	53
TABLA III.5. HOJA DE TRABAJO DEL ANÁLISIS DE BARRERAS.....	66

### **CAPÍTULO IV**

TABLA IV.1. APLICACIÓN Y LIMITANTES DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DEL ACR.....	79
TABLA IV.1. (CONTINUACIÓN) APLICACIÓN Y LIMITANTES DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DEL ACR ..	80
TABLA IV.2. INFORME DE RESUMEN DEL ACR.....	81

### **CAPÍTULO V**

TABLA V.1. CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA (GA-111 A/B/C).....	88
TABLA V.2. FALLAS REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA DE BOMBEO (GA-111 A/B/C).....	92
TABLA V.3. PRINCIPALES MODOS DE OCURRENCIA (FALLA) DE LA BOMBA (GA-111 A/B/C).....	93
TABLA V.4. ACCIONES CORRECTIVAS PROPUESTAS EN LA BOMBA DE ALQUILADO.....	100

## **GRAFICAS**

### **CAPÍTULO V**

GRAFICA V.1. ANÁLISIS DE LAS FALLAS REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA DE BOMBEO (GA-111 A/B/C)	92
--	----