

Selección de una Metodología para el Análisis de Incidentes en Operaciones Costa Afuera Con
Base en el Caso Macondo

Luis Eduardo Gutiérrez Osorio, Saúl Enrique Puentes Barrios

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero de Petróleos

Director

Néstor Fernando Saavedra Trujillo

M.Sc en Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímica
Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios padre todo poderoso, por darme vida, sabiduría y ser mi fortaleza y guía en este camino.

*A mi familia, especialmente a mis padres Lider y Esmelinda, por su amor y apoyo incondicional,
por ser mi mayor fuente de motivación, la razón de mis logros y los pilares de mi vida.*

*A mis hermanos, Paola y Felipe, por impulsarme a ser una mejor persona y por traerle alegría a
mi vida.*

A Saúl, por ser un increíble amigo y compañero de tesis.

*A mis amigos, Omar, Tapias, Jeffrey, Laura, Jhonatan, Herin, Maicol, Maiki, Chiscas, sebastian,
Jhonathan, Miguel, Nelson, Sergio, Julian y otros, por hacer de la universidad una de las
mejores etapas de mi vida y brindarme su apoyo en todo momento.*

*A todas aquellas personas que me brindaron un hogar tanto en Málaga como en Bucaramanga y
me hicieron parte de su familia.*

*A todas esas personas que aportaron en mi crecimiento personal y profesional durante mi etapa
universitaria.*

Luis Gutierrez.

Dedicatoria

A Dios por darme la fuerza y motivación para perseverar cada día para alcanzar mis logros. A mi padre Baldomero, A mi madre Mónica y a mis hermanas Andrea e Isabella, porque me han dado su apoyo en cada uno de los procesos y etapas de mi vida, porque con su gran esfuerzo yo puedo trabajar en mis metas, porque con su gran amor, unión y enseñanzas soy quien soy hoy en día. Porque son un pilar fundamental en mi vida y todo lo conseguido hasta ahora no sería posible sin ustedes.

A mis familiares quienes me han apoyado, me han dado palabras de aliento, me han felicitado, me han dado consejos y han estado conmigo a pesar de la distancia. A la familia Medina por acogerme en su hogar en Málaga y en Bucaramanga, Hacerme parte de su familia, darme su apoyo y cariño.

A María Fernanda Medina por todos estos años de convivencia y apoyo incondicional a través de esta etapa por lo momentos duros y por lo chéveres.

A mis amigos aquellos que a pesar de la distancia y de los distintos caminos que cada uno escogió para su vida siempre han estado ahí presentes ante cualquier necesidad, con los que he compartido muy buenos momentos.

A todos esos amigos que hice en la universidad con los cuales pude trabajar a lo largo de la carrera, con los que nos apoyamos mutuamente siempre, con los que pasé buenos momentos, con los que salí preocupado de un parcial, los que me brindaron todo su tiempo, apoyo, cariño durante toda la carrera.

A mi compañero de tesis por su amistad y todo su esfuerzo, apoyo y motivación a lo largo de estos años.

A todas las personas que han aportado un granito de arena en mi vida para cumplir mis metas y ser mejor persona cada día.

Saúl Puentes

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de formarnos como ingenieros, por sus espacios brindados y enseñanzas.

A la escuela de ingeniería de petróleos y a sus docentes, por su disposición y herramientas brindadas para el desarrollo integro de nosotros como profesionales.

Al ingeniero Néstor Fernando Saavedra Trujillo por sus observaciones, apoyo incondicional, guía constante, acompañamiento, y consejos para la realización de este trabajo de investigación.

Contenido

	Pág.
Introducción	
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Operaciones Costa Afuera	17
2.1 Antecedentes	17
2.2 Plataformas Petrolíferas	18
2.2.1 Unidades soportadas en el fondo.	19
2.2.1.1 Plataforma fixed jacket.	19
2.2.1.2 Plataforma Jack Up o auto elevable.....	19
2.2.1.3 Plataforma gravity based structure (GBS).	21
2.2.1.4 Plataforma de estructura flexible o compliant tower.	22
2.2.2 Unidades flotantes.....	22
2.2.2.1 Plataformas semisumergibles.....	22
2.2.2.2 Drillship o barcos de perforación.....	24
2.2.2.3 Plataformas con piernas tensionadas o TLP.	25
3. Caso de Estudio: Pozo Macondo	25
3.1 Inicios de Macondo.....	25

3.2 Ubicación Geográfica de Macondo	26
3.3 Diseño y Planeación del Pozo.....	27
3.4 Descripción General del Accidente	29
3.4.1 Antecedentes de las operaciones en Deepwater Horizon.	29
3.4.2 Hallazgos claves para la investigación del accidente.	30
3.4.2.1 La cementación del anular no aisló los hidrocarburos.....	31
3.4.2.2 El cemento del zapato no aisló los hidrocarburos.....	32
3.4.2.3 La prueba de presión negativa fue aceptada, aunque no se había establecido la integridad del pozo.....	32
3.4.2.4 El influjo no fue identificado hasta que hubo hidrocarburos en el riser.	33
3.4.2.5 Las acciones de respuesta de control del pozo no pudieron recuperar el control.	33
3.4.2.6 Desviar el lodo con gas al separador dio como resultado la ventilación de gas en la plataforma.	34
3.4.2.7 El sistema de incendio y gas no evitó la ignición de los hidrocarburos.	34
3.4.2.8 La BOP en modo de emergencia no selló el pozo.	35
4. Gestión del Riesgo	36
4.1 Marco Legal y Normativo.....	36
4.1.1 Norma ISO 31000.....	36
4.1.2 Norma ISO 31010.....	37
4.1.3 PMBOK.	37
4.1.4 Ley 1523 del 2012.	37
4.1.5 Decreto 2157 del 2017.....	39
4.2 ¿Qué es el Riesgo?.....	40

4.3 Procesos de la gestión de los riesgos	41
4.3.1 Planificación en la gestión de riesgos.....	42
4.3.2 Identificación de los peligros.....	43
4.3.3 Análisis de Riesgo.....	46
4.3.3.1 Análisis de riesgo cualitativo.....	48
4.3.3.2 Análisis de riesgo cuantitativo.....	49
4.3.3.3 Análisis de riesgo semicuantitativos.....	49
4.3.4 Planificación de respuesta a los riesgos.....	49
4.3.5 Controlar los riesgos.....	51
5. Metodologías para el análisis de riesgos.....	51
5.1 Metodologías de análisis de riesgo cualitativos.....	51
5.1.1 HAZOP.....	52
5.1.2 Matriz de valoración de riesgo (RAM).....	56
5.1.3 Análisis preliminar de riesgos.....	58
5.1.4 ¿Qué pasa sí?.....	59
5.1.5 Análisis de causa raíz.....	60
5.1.5.1 Los cinco por qué.....	60
5.1.5.2 Diagrama causa-efecto (espina de pescado).....	61
5.1.5.3 Análisis de capa de protección (LOPA).....	64
5.2 Metodologías de análisis cuantitativo.....	64
5.2.1 Árbol de fallas.....	66
5.2.2 Árbol de sucesos.....	68
5.2.3 Simulación Monte Carlo.....	69

5.3 Metodologías de análisis de riesgo semicuantitativos	70
5.3.1 Análisis modal de fallos y efectos (FMEA).....	70
5.3.2 Índice Dow para incendio y explosiones.	71
6. Metodologías de análisis de riesgos basadas en las barreras de defensa	73
6.1 Modelo del queso suizo.	74
6.2 Tripod Delta.	76
6.3 Modelo de Bowtie.....	79
6.4 Tripod Beta	81
6.4.1 Terminología del método tripod beta.....	82
6.4.2 Procedimiento del método tripod beta.	84
7. Criterios para la selección de metodologías de análisis de riesgo	85
8. Accidentes comunes registrados en las operaciones costa fuera	90
8.1 Principales Factores que Generan Incidentes en Operaciones Costa Afuera	98
8.1.1 Factores Meteorológicos.....	99
8.1.1.1 Clima.....	99
8.1.1.2 Vientos.....	100
8.1.1.3 Mareas.....	101
8.1.1.4 Oleaje.....	101
8.1.1.5 Corrientes Marinas.....	102
8.1.2 Factores Mecánicos.....	102
8.1.2.1 Equipos de superficie.....	103
8.1.2.2 Equipos de Fondo.	104
8.1.3 Factores Geológicos.....	105

8.1.3.1 Gas somero.....	105
8.1.3.2 Hidratos de Gas.....	105
8.1.3.3 Gases Ácidos.....	106
8.1.4 Factores Humanos.....	106
8.1.5 Factores Geopolíticos.....	107
8.1.6 Factores organizacionales.....	107
9. Aplicación de metodologías a un escenario en Colombia	108
9.1 Desarrollo del escenario de perforación en la costa caribe.....	110
9.1.1 Desarrollo del análisis de riesgos.....	111
9.2 Desarrollo del escenario de un Blowout en la costa caribe	120
9.2.1 Desarrollo del análisis de riesgo.....	121
9.3 Resultados de la aplicación de metodologías de análisis de riesgo recreando escenarios basados en el Macondo.....	124
10. Comparación de las metodologías Seleccionadas.....	126
10.1 Modelo de Bowtie.....	126
10.2 Modelo del queso suizo	128
10.3 Tripod beta.....	128
10.4 Uso complementario de las metodologías	129
11. Conclusiones.....	131
12. Recomendaciones	133
Referencias bibliográficas.....	134

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Plataforma Fixed Jacket.	20
Figura 2. Plataforma Jack Up.....	20
Figura 3. Plataforma GBS (gravity based structure).....	21
Figura 4. Plataforma semisumergible Deepwater Horizon.....	23
Figura 5. Ubicación geográfica de pozo Macondo.	26
Figura 6. Geología y diseño original del pozo Macondo.....	28
Figura 7. Barreras que no funcionaron y la relación de las barreras con los factores críticos.....	30
<i>Figura 8.</i> Procesos para la gestión de riesgos.....	41
Figura 9. Metodologías de análisis de riesgo vs nivel de riesgo.....	47
Figura 10. Entrada de Datos y análisis para sesiones HAZOP.	54
Figura 11. Matriz de valoración de riesgos de Ecopetrol, decisiones. Ecopetrol.	57
Figura 12. Matriz de valoración de riesgos de Ecopetrol consecuencias y probabilidad.	58
Figura 13. Diagrama espina de pescado.	61
Figura 14. Fases diagrama causa efecto.....	63
Figura 15. Proceso de análisis de riesgo cuantitativo.	65
<i>Figura 16.</i> Metodología de árbol de fallas	66
Figura 17. Cuantificación del árbol de sucesos.	69
Figura 18. Guia de aplicación de metodología índice dow.....	72

Figura 19. Diagrama del modelo queso suizo.....	74
Figura 20. Modelo tripod Delta.	76
Figura 21. Esquema Bowtie.....	80
Figura 22. Procedimiento tripod Beta.....	85
Figura 23. Etapas del análisis de riesgos.	85
Figura 24. Gas en caribe colombiano.	108
Figura 25. Tripod Beta en caso de Blowout con base en caso macondo.	122
Figura 26. Barreras que no funcionaron y la relación de las barreras con los factores críticos.	123

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas de las metodologías de análisis de riesgo cualitativas	48
Tabla 2. Ventajas y desventajas de las metodologías de análisis de riesgo cuantitativos	49
Tabla 3. Palabras guías y su significado del método HAZOP	53
Tabla 4. Grupo de tipos de fallas	77
Tabla 5. Criterios de selección de metodologías.	88
Tabla 6. Eventos no deseados en operaciones costa afuera.	91
Tabla 7. Falla en los Equipos de cubierta para los Sistema de Maquinaria.	93
Tabla 8. Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos eléctricos	94
Tabla 9. Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos Mecánicos	95
Tabla 10. Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos de control y seguridad.	96
Tabla 11. Falla en los equipos submarinos.	97
Tabla 12. Riesgos asociados a las actividades de perforación.....	112
Tabla 13. Amenazas según modelo Bowtie.....	115
Tabla 14. Consecuencias según modelo Bowtie.....	117
Tabla 15. Resultados de la matriz de valoración de riesgos	118
Tabla 16. Modelo Tripod beta Para pozo Macondo	121

Resumen

Título: Selección de una metodología para el análisis de incidentes en operaciones costa afuera con base en el caso macondo*.

Autores: Luis Eduardo Gutierrez Osorio
Saúl Enrique Puentes Barrios**

Palabras claves: costa afuera, incidentes, metodologías, riesgos, caribe colombiano.

Descripción:

Actualmente en Colombia las actividades exploratorias costa afuera muestran un gran crecimiento y dichas actividades presentan un gran riesgo asociado. Por lo que considerando el contexto se realizó este trabajo con el objetivo de contribuir al análisis de riesgos de incidentes costa afuera basados en el incidente ocurrido en el 2010 en el pozo Macondo.

La gestión de riesgos es el proceso de identificar, analizar y responder a factores de riesgo a lo largo de la vida de un proyecto y en beneficio de sus objetivos. Esto es de suma importancia pues una buena gestión de riesgos previene de manera proactiva la ocurrencia de incidentes. Basados en el PMBOK y en la norma ISO 31000 se seleccionaron 20 metodologías que podrían ser aplicables en distintas fases de la gestión de riesgo, así como también se identificaron criterios para la selección de dichas metodologías según la fase y la necesidad individual de cada proyecto. A través de la revisión bibliográfica se identificaron 6 factores de riesgos importantes a considerar.

El resultado de la investigación fue la selección de las metodologías Bowtie y Tripod beta para el análisis de incidentes de dos escenarios distintos en la costa caribe colombiana, así como la aplicación complementaria del modelo del queso suizo y una valoración semicuantitativa a través de una matriz de valoración de riesgos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímica Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Néstor Fernando Saavedra Trujillo M.Sc en Ingeniería de Petróleos

Abstract

Title: Selection of methodology to analyze offshore incidents based on Macondo blowout *

Author: Luis Eduardo Gutierrez Osorio
Saúl Enrique Puentes Barrios **

Keywords: Offshore, incidents, methodologies, risk, Caribbean offshore

Description:

Currently in Colombia the offshore exploration activities are showing a great growth and that activities have an inherent risk with them. Therefore, in this context this investigation was done with the objective of contributed to analyze offshore incidents based on Macondo blowout in 2010.

The risk management is the process of identify, analyze, and respond to different risk factors through the life project and looking for the benefit in their objectives. This is important because a good risk management prevent in a proactive way incident. Based on PMBOK and ISO 31000 twenty methodologies were chosen which could be used in different phases in the risk management in the same way were identified criteria to select the methodologies depending on the phase and the need of the project. Through a bibliography review of different global data bases were found 27 kind of recurring events that can generate incidents and were found the commons fails in different equipment on board and subsea that are present in perforation units. Thus defining 6 important risk factors to consider.

The investigation result was the selection of bowtie and Tripod beta methodologies to analyze incidents in two different scenarios in the Colombian Caribbean cost, as well as the complementary application of the swizz cheese model and the risk assessment matrix.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímica Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Néstor Fernando Saavedra Trujillo M.Sc en Ingeniería de Petróleos

Introducción

La industria petrolera es la más influyente e importante para la economía colombiana por esto es de gran importancia su continuo avance y optimización, sin embargo, en los últimos años se enfrenta un gran reto en la ampliación de reservas nacionales, lo que ha impulsado nuevas áreas de trabajo en el país como aumentar el recobro en yacimientos maduros, yacimientos en rocas generadoras y la exploración costa afuera. En el mundo las reservas offshore representan cerca del 30%. Países como Estados Unidos, México y Brasil son unos de los grandes productores de nuestro continente, por lo cual son los ejemplos y guías más cercanas para impulsar el desarrollo de nuestro país. La industria offshore sin duda alguna es una gran apuesta por sus grandes inversiones y oportunidades, pero también representan un gran riesgo ambiental, económico y humano. Es necesario tomar todas las precauciones y hacer todas las preparaciones logísticas para impulsar el desarrollo y el avance de la industria offshore colombiana de manera eficaz, segura y rentable. Es aquí donde nace la necesidad de establecer métodos para analizar riesgos potenciales antes, durante y después de cada una de las operaciones a realizarse en Colombia en aras de evitar incidentes como los ocurridos en el Golfo de México en el pozo Macondo (2010) y el incendio en la plataforma Abkatun A-Permanente (2015).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Seleccionar una metodología para el análisis de incidentes en operaciones costa afuera con base en el caso Macondo.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los principales factores que generan incidentes en operaciones costa afuera.

Describir y analizar las diferentes metodologías para análisis de riesgos que se adapten al caso estudio.

Comparar los resultados de las aplicaciones de las diferentes metodologías para así seleccionar la que mejor se adapte al escenario colombiano

2. Operaciones Costa Afuera

El creciente aumento en la demanda energética, basada principalmente en los hidrocarburos, hace que estos se agoten y sean cada vez más difíciles de encontrar. Por esa razón la exploración se ha dirigido hacia otros sitios poco explotados tales como los mares y los océanos.

La exploración y producción de petróleo y gas natural en las regiones costa afuera son operaciones más complejas que las tradicionales. Abarca la búsqueda, procesamiento e interpretación de los datos geológicos, petrofísicos y geoquímicos provenientes de las pruebas realizadas bajo el agua, con la posterior perforación de un pozo tanto en mar abierto, mares interiores y lagos. Para ello se usan plataformas, barcos, hidrófonos y sistemas que sustituyen las técnicas y equipos tradicionales usados en tierra firme.

2.1 Antecedentes

La localización y extracción de petróleo a mediados del siglo XIX en Estados Unidos ya era suficientemente difícil, pero la búsqueda continuó hacia un lugar poco explorado como lo fue costa afuera y el primer pozo perforado intencionalmente sobre agua fue en 1897 y alcanzó una profundidad de 250 pies en Summerland Beach, California. Más tarde, ese mismo año, se construyó un muelle perpendicular a la costa y con ello la industria petrolera costa afuera, había nacido. En 1898, había dos muelles con 18 pozos y en 1902 había 221 pozos en 16 muelles.

También se realizaron perforaciones sobre aguas internas. El primer pozo perforado estaba en Caddo Lake, Texas, en 1911. Una de las áreas más grandes de perforación de aguas internas, el Lago de Maracaibo en Venezuela, no tuvo su primer pozo perforado sino hasta abril de 1924.

Una plataforma de perforación llamada el McBridell se convirtió, sin querer, en la primera embarcación semi-sumergible del mundo, en 1932. Se suponía que la plataforma debía perforar un pozo en Garden Island Bay, Louisiana, mientras flotaba, pero fue cargada con tanto equipo y material de perforación que descansó sobre el fondo del lago cuando el pozo fue perforado. La plataforma fue, desde ese entonces, únicamente operada de esta manera.

En 1928 se llenó una patente por Louis Giliasso, para construir la primera plataforma semisumergible intencional, el Giliassoll. En noviembre 17 de 1933 el Giliassoll se estableció en aproximadamente 10 pies de agua en el Lago Pelto, Louisiana y perforo su primer pozo a 5700 pies.

Durante los 50's, muchos ex-buques navales y plataformas fueron convertidos en barcos de perforación y así emergió en 1956, la primera embarcación flotante de perforación a escala completa. Una sucesión de barcazas de variados diseños y de distintas compañías continuaron hasta que se completaron las pruebas y con ello se diseñaron las embarcaciones semisumergible a principios de los 60.

2.2 Plataformas Petrolíferas

Una plataforma petrolífera es una estructura de grandes dimensiones cuya función es extraer petróleo y gas natural de los yacimientos ubicados bajo el lecho marino. Las primeras unidades, eran simples plataformas terrestres llevadas dentro de aguas poco profundas y fijadas a

una estructura para perforar en el agua, las cuales fueron evolucionando hasta llegar a las plataformas que conocemos actualmente.

La mayoría de las plataformas son portátiles, es decir, perforan un pozo en un sitio mar adentro y después se mueven para perforar en otro lugar.

2.2.1 Unidades soportadas en el fondo.

Consiste en una estructura vertical hecha de secciones o tramos de acero tubulares cimentados en el fondo del mar, con una cubierta colocada en la parte superior proporcionando el área para la instalación del equipo de perforación, instalaciones de producción y áreas habitacionales.

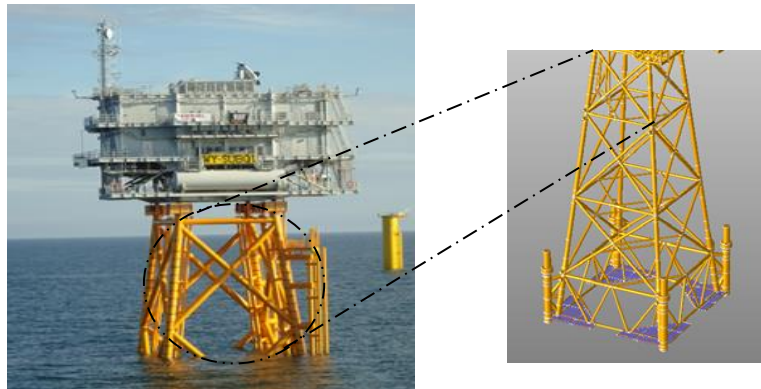
2.2.1.1 Plataforma fixed jacket. Se caracterizan por encontrarse plantadas sobre el suelo marino extendiendo su estructura de base telescópica por encima de la superficie de lámina de agua. La denominación de tipo jacket se le da debido a que sus piernas, generalmente tubulares en acero, envuelven sus pilotes de acero, que son los encargados de proporcionar la rigidez y estabilidad de la estructura formando así un sistema de protección o camisa de fuerza. Estas plataformas son empleadas en láminas de agua de hasta 500 metros.

2.2.1.2 Plataforma Jack Up o auto elevable. Es un tipo de plataforma especial usada para perforación y reparación de pozos. Tiene la capacidad de moverse de una localización a otra, por medio de autopropulsión o por medio de remolcadores. Así, la perforación es su función principal, ya sea de pozos exploratorios o de desarrollo. Una vez que se encuentra en la posición deseada, las piernas son bajadas hasta alcanzar el fondo marino. Cuando las columnas o piernas se

encuentran asentadas en el lecho marino, la cubierta es elevada más allá del nivel del agua, hasta tener una plataforma de perforación estable.

Estas plataformas se utilizan normalmente en profundidades de 120 metros, pueden alcanzar hasta los 170 metros de lámina de agua.

Figura 1.
Plataforma Fixed Jacket.



Nota. Adaptada de Project Smart Explorer y Engineering offshore solutions (2012). Recuperado de <https://www.2b1stconsulting.com/jacket/> y <http://www.offshoretechllc.com/projects/fixed-platforms>.

Figura 2.
Plataforma Jack Up.



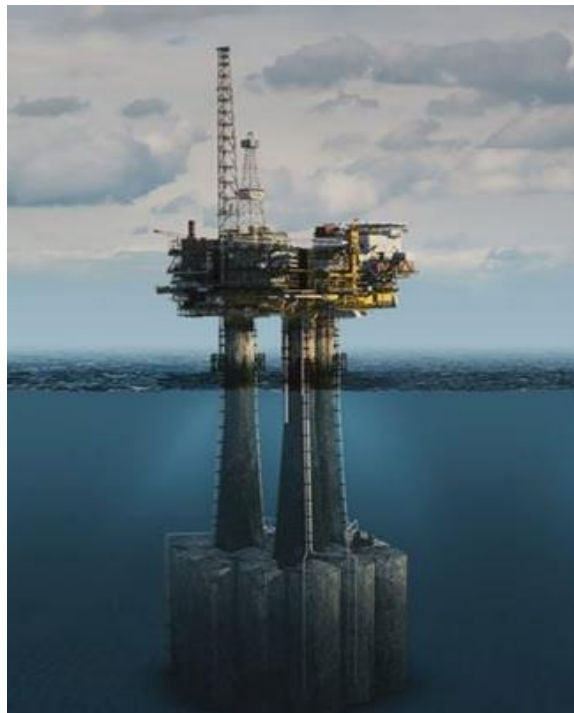
Nota. Adaptado de ministerio de recursos naturales Ecuador (2012). Recuperado de <https://www.flickr.com/photos/82038657@N08/8091728679>

2.2.1.3 Plataforma gravity based structure (GBS). Se tratan de estructuras de soporte que se mantienen fijas en su lugar de colocación gracias a su propio peso. Generalmente están construidas de hormigón reforzado con acero que contiene una serie de espacios libres internos que permiten controlar la flotación (o boyancia) hasta su lugar de colocación.

Las GBS normalmente no proporcionan una capacidad de almacenamiento de hidrocarburos. Se instalan lastrando los compartimientos con agua de mar y sus profundidades de operación no superan los 300 metros de lámina de agua.

Figura 3.

Plataforma GBS (gravity based structure).



Nota. Adaptado de COCOA. (2018). Tipos de plataformas marinas y estructuras offshore.
Recuperado de <https://ccocoa.com/tipos-de-plataformas-marinas-y-estructuras-offshore/>

2.2.1.4 Plataforma de estructura flexible o compliant tower. Consiste en una torre enrejada flexible apoyada sobre la cimentación a gran profundidad. Están diseñadas de forma que son capaces de soportar importantes fuerzas y flexiones laterales. El empleo de elementos flexibles reduce la resonancia y la amplitud de las fuerzas ondulatorias del oleaje.

“Están pensadas para profundidades de entre 350 y 900 metros, aunque actualmente la estructura flexible más profunda es la torre Chevron Petronius en aguas de 535 metros de profundidad” (Angel, 2016).

2.2.2 Unidades flotantes.

Son estructuras las cuales permanecen en flotación debido al principio de Arquímedes y usadas principalmente para llegar a operar en láminas de agua mayores que las unidades soportadas en fondo.

2.2.2.1 Plataformas semisumergibles. Es un tipo especial de embarcación flotante sustentada principalmente en estructuras grandes de tipo pontón, sumergidas por debajo de la superficie del mar. Las cubiertas de operación se encuentran elevadas aproximadamente 100 pies por encima de los pontones en grandes columnas de acero. Este diseño presenta la ventaja de tener sumergida la mayor parte del área de los componentes en contacto con el mar y de minimizar la

carga proveniente de las olas y el viento. Una de las ventajas de estas plataformas es que se pueden operar en tirantes de agua entre 200 y 2500 metros.

Es imprescindible que la plataforma permanezca en posición sobre la superficie del mar, dentro de un círculo con radio de tolerancia determinado por los equipos que se encuentran por debajo de ésta. Los sistemas responsables de la posición de la unidad flotante son dos: el sistema de anclaje y el sistema de posicionamiento dinámico.

Estas plataformas se encuentran posicionadas normalmente utilizando un sistema de anclaje que se compone de 8 a 12 líneas de cables y/o cadenas y sus respectivas anclas, que actúan como resortes que producen fuerzas capaces de restaurar el sistema flotante a una posición dentro de su radio de operación cuando ésta es modificada por la acción de las olas, vientos y corrientes marinas. El posicionamiento dinámico consiste esencialmente en un sistema que compensa automáticamente las fuerzas naturales (olas, viento y corriente) para mantener la plataforma en una posición fija, controla la posición y el rumbo de la misma exclusivamente con el uso de propulsión activa.

Para trasladar una plataforma semisumergible se retira agua de lastre de los pontones para que el equipo tenga mayor flotación y pueda moverse con más facilidad sobre la superficie del mar. La mayoría de estas plataformas cuentan con sistemas de propulsión propios ubicados en los pontones, es decir son autopropulsables.

Las plataformas semisumergibles pueden ser utilizadas para operaciones de perforación y reparación o como plataformas de producción dependiendo únicamente del equipo del que este provistas.

Figura 4.

Plataforma semisumergible Deepwater Horizon.



Nota. Adaptado de Hiskes, J. (2010). Gulf oil rig in danger of tipping after explosi3n. Recuperado de <https://grist.org/article/2010-04-21-workers-found-safe-but-gulf-oil-rig-in-danger-of-tipping/>

2.2.2.2 Drillship o barcos de perforaci3n. Un barco perforador es tambi3n un sistema de perforaci3n flotante, tienen gran movilidad ya que son autopropulsados y poseen cascos aerodin3micos semejantes a los de un buque normal, por tal motivo se puede elegir a un buque perforador para realizar pozos en localizaciones remotas, convirti3ndose en la mejor opci3n. Las principales ventajas son: se pueden mover a velocidades razonablemente altas con bajo consumo de energ3a, la forma y capacidad de la cubierta le permite cargar una gran cantidad de equipo y material para perforar, por lo que no requiere de un frecuente reabastecimiento y permite realizar operaciones en aguas ultra profundas (hasta 3700 metros).

Estos barcos utilizan anclas que les permiten situarse en el yacimiento a perforar, pero cuando perforan en aguas profundas y ultra profundas requieren de posicionamiento din3mico controlado por ordenadores conectados a sofisticados sensores electr3nicos. Una vez iniciada las actividades de perforaci3n, el perforador indica a los ordenadores la posici3n que debe mantener

el barco mientras se perfora. Este sistema restaura la posición de la plataforma dentro de su radio de trabajo, modificada por los efectos de las corrientes, el oleaje y la fuerza del viento.

El movimiento vertical es el mayor problema cuando se usa este tipo de unidad flotante, debido a su superficie de contacto con el mar comparado con una plataforma semisumergible, el buque desarrolla respuestas más grandes de movimiento vertical.

2.2.2.3 Plataformas con piernas tensionadas o TLP. En yacimientos de aguas profundas, las plataformas de patas tensionadas han sido desarrolladas para generar el potencial económico de los nuevos descubrimientos. Se emplean para la perforación en aguas con profundidades mayores a 600 metros. Están sujetas mediante cables de ancla fijados en el fondo marino y se mantiene en la superficie mediante columnas flotantes.

Mientras que las unidades semisumergibles y los barcos de perforación se utilizan sólo para la perforación, las TLP (Tension Leg Platform) tienen mayor ventaja en cuanto a versatilidad para perforar, recuperar y producir pozos, casi en forma simultánea (Gil, 2015, p.33).

3. Caso de Estudio: Pozo Macondo

3.1 Inicios de Macondo

En marzo de 2008, BP pagó un poco más de \$ 34 millones al Servicio de Gestión de Minerales por un contrato de arrendamiento exclusivo para perforar el bloque 252 del cañón de

Mississippi, un área de nueve millas cuadradas en el Golfo de México. Aunque el área del Cañón de Mississippi tiene muchos campos petroleros productivos, BP sabía relativamente poco sobre la geología del Bloque 252: Macondo sería su primer pozo. BP planeó perforar el pozo a 20.200 pies, tanto para aprender más sobre la geología del área como también, según los datos geológicos disponibles, pensó que podría encontrar un yacimiento de petróleo y gas que justificara la instalación de equipos de producción en el pozo. En ese momento, BP habría tenido buenas razones para esperar que el pozo fuera capaz de generar grandes ganancias. (National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling [GPO-OILCOMMISSION], 2011, p.89)

Para este entonces, BP se asoció para este proyecto de perforación con Anadarko Petroleum (25%) y MOEX Offshore (10%), pero siguió siendo el operador y propietario mayoritario (65%). Como operador BP fue responsable de todos los aspectos de diseño y desarrollo del pozo.

3.2 Ubicación Geográfica de Macondo

El pozo Macondo, fue perforado por la plataforma semisumergible Deepwater Horizon, de la compañía Hyundai y arrendada a la empresa BP Exploration & Production Inc., en el bloque 252 del Cañón de Mississippi, en el offshore de Louisiana, en el Golfo de México Central, Estados Unidos. Localizado aproximadamente a 48 millas de la costa más cercana, a 114 millas desde el puerto de envío Fourchon, Louisiana y a 154 millas de la base de helicópteros de Houma, Louisiana. (BP report, 2010, p.15)

Figura 5.

Ubicación geográfica de pozo Macondo.

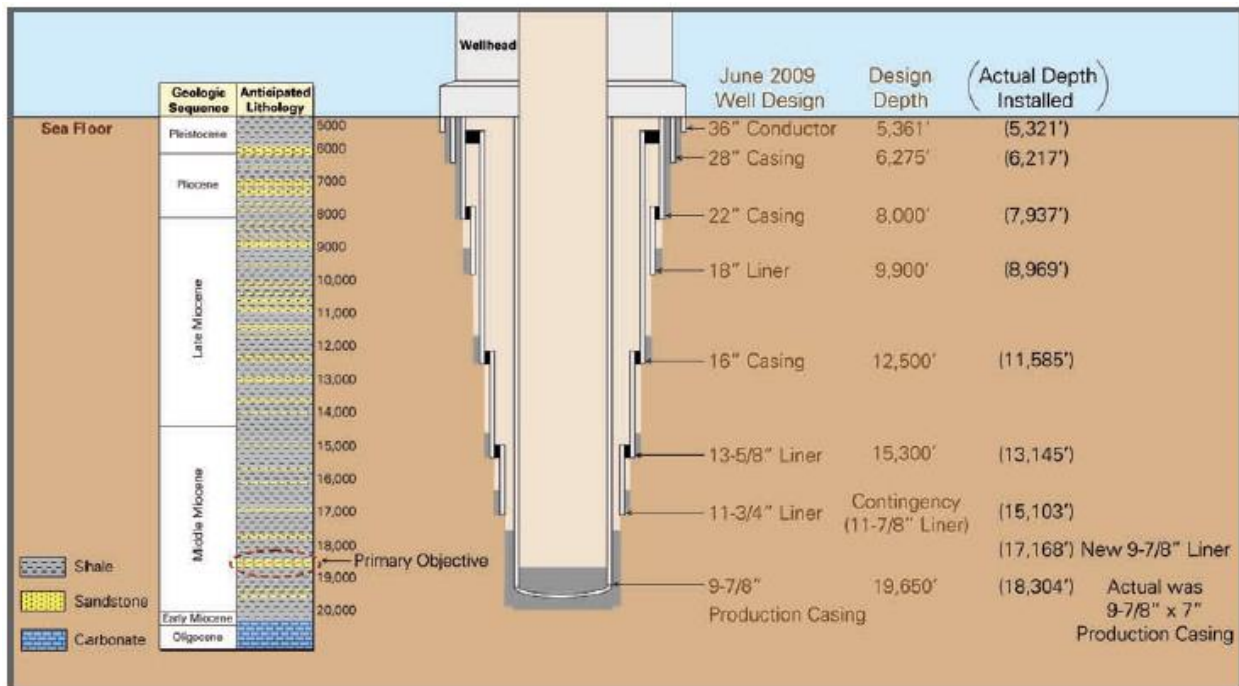


de BP y contratistas especializados, los cuales estimaron la presión de poro y los esfuerzos de las formaciones geológicas que se iban a atravesar durante la perforación. A finales de junio del 2009 se había completado un diseño de ingeniería detallado, una evaluación de riesgos y una revisión por pares de diseño. El plan original del pozo abarcó todos los elementos del diseño del pozo, incluidos los equipos y las operaciones del pozo, el lodo, las brocas, el diseño del revestimiento, los planes de cementación y las pruebas de presión.

El plan original del pozo consistía en ocho corridas de revestimiento. (Figura 6.) Sin embargo, durante la perforación, se necesitaron nueve corridas, incluyendo un revestimiento de producción de 9 7/8 pulg. X 7 pulg.

Figura 6.

Geología y diseño original del pozo Macondo.



Nota. Adaptado de Deepwater Horizon Accident Investigation Report (2010, P.16)

3.4 Descripción General del Accidente

Para poder entender el origen del accidente lo mejor es ser objetivo, para lo cual se analizará teniendo en cuenta el reporte oficial de BP (Deepwater Horizon Accident Investigation Report) y el reporte a el presidente de los Estados Unidos (Deep Water The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling)

El inicio y avance del accidente de Deepwater Horizon se debió a una serie compleja e interrelacionada de fallas mecánicas, juicios humanos, diseño de ingeniería, implementación operativa e interacciones de equipo. Múltiples compañías, equipos de trabajo y circunstancias estuvieron involucradas con el tiempo. (BP report, 2010, p.31).

La explosión del pozo se produjo debido a que se combinaron una serie de factores de riesgo, descuidos y errores directos los cuales abrumaron las salvaguardas destinadas a evitar que tal evento ocurriese. Pero la mayoría de los errores y descuidos en Macondo se remontan a una sola falla general: una falla de la administración. Una mejor gestión por parte de BP, Halliburton y Transocean seguramente habría evitado el estallido al mejorar la capacidad de las personas involucradas para identificar los riesgos que enfrentan y evaluarlos, comunicarlos y abordarlos adecuadamente. Un reventón en aguas profundas no era una inevitabilidad estadística. (GPO-OILCOMMISSION, 2011, p.90).

3.4.1 Antecedentes de las operaciones en Deepwater Horizon.

Deepwater Horizon, se construyó en 2001, era una unidad de perforación semisumergible de quinta generación, equipada con posicionamiento dinámico. La unidad empleó un sistema de

perforación automatizado y un sistema BOP de 15,000 psi y había operado en profundidades de agua (WD) mayores a 9,000 pies. La plataforma había perforado pozos de hasta 35,055 pies en los nueve años que había sido propiedad y operada por Transocean bajo contrato con BP en las aguas profundas del Golfo de México.

Deepwater Horizon llegó a Macondo el 31 de enero del 2010, el equipo realizó trabajos de mantenimiento en la BOP, incluida la realización de pruebas de presión antes de llevarla al pozo el 8 de febrero del 2010. Posteriormente, se realizó otra prueba de presión exitosa en la BOP cuando ya había sido adjuntada la plataforma a la boca del pozo.

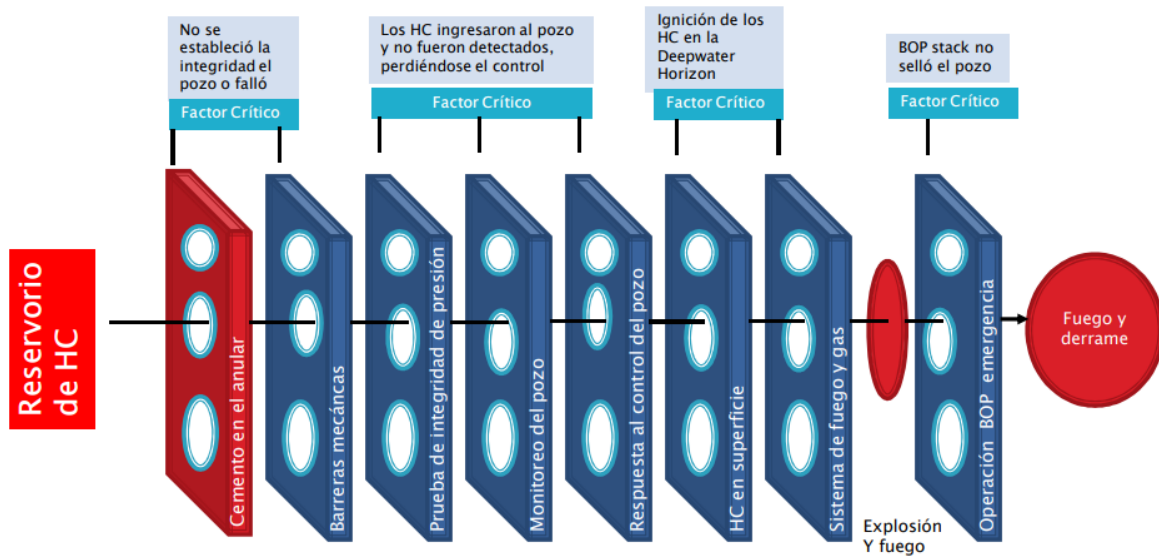
Según el reporte de BP (2010) en el momento del accidente, la última sección de revestimiento se había introducido en el pozo y se había cementado para aislar las zonas de hidrocarburos. Se llevaron a cabo pruebas de integridad, y 8,367 pies por encima se estaba circulando con agua de mar en preparación para el abandono temporal del pozo. Los pasos restantes eran colocar un tapón de cemento en el revestimiento e instalar una manga de cierre en el conjunto del sello del colgador del revestimiento antes de desconectar el BOP y suspender el pozo.

3.4.2 Hallazgos claves para la investigación del accidente.

Según el reporte de BP (2010) la investigación de este complejo accidente se convirtió en cuatro investigaciones vinculadas sobre los hechos y las causas subyacentes a estos factores críticos. De estas investigaciones surgieron ocho hallazgos claves.

Figura 7.

Barreras que no funcionaron y la relación de las barreras con los factores críticos.



Nota. Adaptado de Deepwater Horizon Accident Investigation Report (2010, p.32)

3.4.2.1 La cementación del anular no aisló los hidrocarburos. El cemento del anular no pudo evitar que los hidrocarburos migraran hacia el pozo. El análisis del equipo de investigación identificó una probable explicación técnica del fracaso. Las interacciones entre BP y Halliburton y las deficiencias en la planificación, diseño, ejecución y confirmación del trabajo de cemento redujeron las perspectivas de un trabajo de cemento exitoso.

Antes de perforar la sección de producción del pozo hasta 18,360 pies de profundidad, se instaló un revestimiento de 9 7/8 pulg. a 17,168 pies. Esta última sección del hueco fue difícil de perforar debido a una reducción en el gradiente de fractura en el fondo del pozo. Esta condición requería seleccionar el peso de lodo correcto para mantener el sobrebalance en la formación y evitar pérdidas de fluido al pozo. Teniendo en cuenta el estrecho margen entre la presión de poro y el gradiente de fractura, se evaluaron varias opciones antes de seleccionar el diseño del revestimiento de producción, la formulación de cemento y el plan de colocación.

El equipo de investigación no encontró indicios de que los hidrocarburos ingresaron al pozo antes o durante el trabajo de cementación. Para determinar cómo ingresaron los hidrocarburos

al pozo después de la operación, el equipo de investigación evaluó el diseño de la lechada de cemento, la colocación de cemento y las pruebas de confirmación de la colocación.

3.4.2.2 El cemento del zapato no aisló los hidrocarburos. Después de que el cemento del anular no aisló efectivamente el yacimiento, una falla mecánica permitió el ingreso de los hidrocarburos al pozo. El equipo de investigación determinó tres posibilidades de ingreso del influjo:

- **Ingresó a través del zapato del revestimiento.**
- **Ingresó a través del sello del colgador del revestimiento.**
- **Ingresó a través del revestimiento y componentes de producción.**

La evidencia disponible y el análisis realizado por el equipo de investigación lleva a concluir que el flujo inicial hacia el pozo atravesó el zapato del revestimiento.

3.4.2.3 La prueba de presión negativa fue aceptada, aunque no se había establecido la integridad del pozo. Aproximadamente 10,5 horas después de la finalización del trabajo de cementación, comenzó la prueba de integridad de presión positiva. Después de completar con éxito la prueba de presión positiva a 2.700 psi, se realizó la prueba de presión negativa.

Una prueba de presión negativa se realiza simulando una reducción de la presión hidrostática desplazando el lodo con un fluido de menor densidad, esta es importante para determinar la capacidad del cemento para aislar fluidos del yacimiento al pozo.

El objetivo de la prueba de presión negativa era probar la capacidad de las barreras mecánicas (zapato del revestimiento, conjunto del sello del colgador del revestimiento y el revestimiento de producción) para resistir los diferenciales de presión que ocurrirían durante

operaciones posteriores: la reducción de la cabeza hidrostática debido al uso de agua de mar y la desconexión del BOP y riser.

El equipo de investigación concluye que los resultados de la prueba de presión negativa indicaron que no se había establecido la integridad del pozo. Esta situación no se reconoció en el momento de la prueba, por lo tanto, no se tomaron medidas correctivas.

3.4.2.4 El influjo no fue identificado hasta que hubo hidrocarburos en el riser. Un requisito fundamental para las operaciones seguras de perforación y terminación (D&C) es mantener el control del pozo y evitar la entrada de hidrocarburos. Durante todas las fases de estas operaciones, los indicadores de retorno de fluido, presión y flujo deben ser monitoreados continuamente para detectar el influjo lo antes posible. En el pozo Macondo, la tripulación de la plataforma aparentemente no reconoció los indicios significativos de afluencia de hidrocarburos hasta cuando ya estaban en el riser.

3.4.2.5 Las acciones de respuesta de control del pozo no pudieron recuperar el control. Cuando se produce un influjo, la respuesta rápida es fundamental. El equipo de la plataforma necesita procedimientos efectivos y debe implementarlos de manera rápida para mantener el control sobre las condiciones afectadas en el pozo.

Los miembros claves del equipo de la plataforma deben estar capacitados y demostrar sus competencias. Sus acciones deben ser correctas e inmediatas, especialmente cuando se ha perdido el control del pozo y el flujo de hidrocarburos ha aumentado.

Los protocolos de cierre de Transocean no abordaron completamente cómo responder en situaciones de emergencia de alto flujo después de que se perdió el control del pozo. Las acciones

de control de pozos tomadas antes de la explosión sugieren que el equipo de la plataforma no estaba lo suficientemente preparado para manejar una situación de control de pozos en aumento.

3.4.2.6 Desviar el lodo con gas al separador dio como resultado la ventilación de gas en la plataforma. El separador de lodo y gas (MGS) elimina solo pequeñas cantidades de gas arrastrado en el lodo. Una vez separado, el gas se ventila a la atmósfera en un lugar seguro. Cuando el equipo de la plataforma desvió un alto flujo hacia el MGS, el sistema se vio colapsado, generando así emanación de gas en la plataforma.

3.4.2.7 El sistema de incendio y gas no evitó la ignición de los hidrocarburos. Para entornos operativos donde podrían estar presentes sustancias peligrosas, los niveles secundarios de los sistemas de protección son normalmente parte del diseño. En Deepwater Horizon, los niveles secundarios de los sistemas de protección incluían un sistema de incendio y gas y la clasificación eléctrica de ciertas áreas de la plataforma.

El sistema de incendio y gas detecta el gas hidrocarburo e inicia alarmas de advertencia cuando se exceden los límites aceptables. Para algunas alarmas, una función automatizada se inicia cuando se detecta gas más allá de los límites aceptables. Esta función automatizada evita principalmente la entrada de gas a ubicaciones vulnerables a través del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Cuando se detecta gas, el sistema de incendio y gas cierra y apaga los HVAC.

Las áreas en la plataforma están clasificadas eléctricamente, según la probabilidad de la presencia de hidrocarburos. Los equipos en áreas clasificadas eléctricamente deben cumplir con

los criterios del código de diseño que reducen la posibilidad de proporcionar una fuente de ignición.

Debido a la baja probabilidad de que los hidrocarburos estén presentes antes de que un pozo produzca, solo una pequeña área de Deepwater Horizon se clasificó eléctricamente. Las dos áreas principales clasificadas eléctricamente estaban dentro del piso de la plataforma y debajo de la cubierta, donde el lodo que regresaba del pozo podía transportar algunos hidrocarburos residuales. Si una mezcla inflamable migrara más allá de estas áreas, el potencial de ignición sería mayor.

Las unidades calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) de la sala de máquinas de Deepwater Horizon no fueron diseñados para dispararse automáticamente al detectar gas; Se requería activación manual. Este diseño probablemente se seleccionó para que los falsos disparos de detección de gas no interrumpieran el suministro de energía a los propulsores, que mantienen la plataforma posicionada dinámicamente en la estación. El sistema HVAC probablemente transfirió una mezcla rica en gas a las salas de máquinas, creando así una fuente potencial de ignición.

3.4.2.8 La BOP en modo de emergencia no selló el pozo. Ninguno de los métodos de emergencia disponibles para operar la BOP tuvo éxito en aislar el pozo. Los diferentes métodos disponibles no eran completamente independientes; por lo tanto, las fallas individuales podrían afectar a más de un método de emergencia de operación BOP. Finalmente, la única forma de aislar el pozo en el BOP era cerrar un solo componente, el ariete de corte ciego (BSR); ese ariete tenía que cortar la tubería de perforación y sellar el pozo, lo cual nunca ocurrió.

Según el informe de la junta de seguridad química de los Estados Unidos, la BOP de alta presión que debía cerrar el flujo de petróleo y gas hacia la superficie no selló bien dado que la tubería de perforación esta doblada (por razones que la industria de perforación en alta mar aún desconoce). Este doblez impidió que el ariete de corte ciego de la BOP funcionara correctamente, en lugar de cortar y sellar limpiamente la tubería de perforación del pozo lo que hizo fue pinchar la tubería descentrada y pandeada, enviando enormes volúmenes adicionales de petróleo y gas hacia la superficie e iniciando el derrame aquí ya mencionado.

4. Gestión del Riesgo

La gestión del riesgo se define como los procesos o estrategias utilizados para aceptar, reducir, evitar, transferir o mitigar los riesgos en una compañía. Los objetivos de esta consisten en aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en los proyectos.

4.1 Marco Legal y Normativo

4.1.1 Norma ISO 31000.

La norma ISO 31000 es una norma internacional que ofrece las directrices y principios para gestionar el riesgo de las organizaciones la cual tiene por objetivo que organizaciones de todos los tipos y tamaños puedan gestionar los riesgos en la empresa de forma efectiva, por lo que recomienda que las organizaciones desarrollen, implanten y mejoren continuamente un marco de

trabajo cuyo objetivo es integrar el proceso de gestión de riesgos en cada una de sus actividades. La norma es fundamentalmente una guía de buenas prácticas para las actividades relacionadas con la gestión de riesgos.

4.1.2 Norma ISO 31010.

Es un complemento de la norma ISO 31000 enfocada en las técnicas de la evaluación de riesgos, con el propósito de identificar lo que puede suceder en diferentes situaciones, que pueden afectar a la consecución de los objetivos propuestos. En esta se encuentran listadas una gran cantidad de metodologías para el análisis de riesgos así como sus funciones ventajas y desventajas. Orientado a facilitar la selección e implementación de técnicas útiles para la evaluación del riesgo.

4.1.3 PMBOK.

La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos o PMBOK por sus siglas en inglés es un libro desarrollado por el Project Management Institute, que establece una serie de buenas prácticas relacionadas con la gestión, administración y dirección de proyectos. En este libro se presenta un capítulo especial relacionado a la gestión de riesgos del proyecto. El PMBOK es un referente en cuanto a todos los procesos de Gestión de proyectos enfocado en 10 aspectos principales y uno de estos es el riesgo desde una perspectiva mucho más administrativa que la encontrada en las normas ISO.

4.1.4 Ley 1523 del 2012.

Expedida por el Congreso de la república de Colombia en abril del 2012 en la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Según esta ley la gestión del riesgo en Colombia es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres. El propósito Principal es el de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible, con el fin de asegurar los derechos, la seguridad territorial, mejorar la calidad de vida e intereses colectivos de las poblaciones y las comunidades en riesgo, siendo esta responsabilidad de todas las autoridades y los habitantes del territorio colombiano. En la ley se establecen los siguientes aspectos importantes para el territorio nacional:

- La ley 1523 de 2012 concierne la gestión de riesgos, cuyo proceso es proceso es el de identificar, analizar y responder a factores de riesgo a lo largo de una empresa y en beneficio de sus objetivos.
- La gestión de riesgos adecuada implica el control de posibles eventos futuros, además, es proactiva, en lugar de reactiva.
- La ley 1523 de 2012, ofrece disposiciones para que las empresas empiecen a implementar esta norma.
- Las entidades públicas y privadas deben cumplir con la ley 1523 de 2012 y con los procedimientos destinados a prevenir, proteger y atender a los trabajadores de los efectos de las enfermedades y los accidentes que puedan ocurrirles con ocasión o como consecuencia del trabajo que desarrollan.

- Las disposiciones vigentes de salud ocupacional relacionadas con la prevención de los accidentes de trabajo y enfermedades laborales y el mejoramiento de las condiciones de trabajo hacen parte integrante de la gestión de riesgo, contempladas en la Ley 1523 de 2012.

4.1.5 Decreto 2157 del 2017.

Es el que se encarga de acoger todas las directrices para la elaboración de un plan de gestión del riesgo en las entidades públicas y privadas, en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. Este decreto es el encargado de adoptar los lineamientos para la elaboración de un plan de gestión del riesgo y tiene como objetivo desarrollar el conocimiento, promover procesos de reducción y manejo de riesgos y desastres ante un evento no deseado. Para el decreto 2157 de 2017 la gestión de riesgo es el proceso de identificar, analizar y cuantificar la probabilidad de daño ocurrido en un evento.

Como aspectos importantes a destacar del decreto se tienen los siguientes:

- En el ámbito organizacional se enfoca en la identificación de peligros y la evaluación de riesgos ya sean internos y externos, priorizando los riesgos desde el más bajo al más alto, por muy bajo que el riesgo sea debemos tener un plan de contingencia para atender la emergencia en cualquier momento que se presente.

- Facilita la gestión del riesgo lo que permite una intervención preventiva, la priorización de medidas de acción y la conformación de los planes de emergencia y contingencia, los profesionales del SGSST, dentro de su plan de formación deben capacitar al personal en temas de plan de prevención, preparación y puesta en marcha ante una

emergencia, primeros auxilios, brigadas contra incendios, que se deben realizar por lo menos dos veces en el año, acompañado de simulacros.

- El artículo 42, realiza un enfoque técnico al sistema de gestión del riesgo buscando garantizar que el paso a paso en la valoración, identificación de los contextos en la gestión del riesgo, esta tiene sus principios, como el de fortalecer la toma de decisiones en respuesta ante los riesgos y reducir las pérdidas para la operación de la organización, elaborando un concienzudo análisis donde se evalúan debilidades oportunidades fortalezas y amenazas.

4.2 ¿Qué es el Riesgo?

El termino riesgo no posee un consenso mundial en cuanto a su definición este puede ser usado con una ligera diferencia en su concepto dependiendo el contexto en se use, por ejemplo, para Vose (2008) el riesgo es un evento aleatorio que puede o no ocurrir y en caso tal de que ocurra este tendrá un impacto negativo en los objetivos de las organizaciones, definiendo así 3 elementos, el escenario, su probabilidad de ocurrencia y el tamaño del impacto si este ocurre. Por otro lado, Broder y Tucker (2012) lo definen como la posible ocurrencia de un evento indeseado. En la guía para identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional GTC 45 (2010) se define como la combinación de la probabilidad de que ocurra un evento o exposición al peligro y la severidad del daño que puede ser causado por el evento.

No se debe confundir el riesgo con el peligro. Si bien ambos términos están relacionados, el peligro es una fuente, situación o acto con potencial de daño o afectación al bienestar al personal, de la población, medio ambiente o instalaciones. Por lo tanto, el riesgo y el peligro coexisten entre

sí, una vez identificado el peligro (como fuente de daño) se procede a evaluar el riesgo asociado a este en función de la probabilidad y la afectación que este podría producir.

Los riesgos de un proyecto tienen su origen en la incertidumbre que está presente en cada uno de ellos, los riesgos podemos clasificarlos de la siguiente manera:

a. Riesgos conocidos: son aquellos que han sido identificados y analizados, lo que hace posible planificar respuestas para tales riesgos.

b. Riesgos desconocidos: son aquellos por el hecho de no haber sido identificados no se pueden gestionar de manera proactiva y por lo tanto se les debe asignar una reserva de gestión.

c. Riesgo inherente: es aquel que es propio del trabajo o proceso, que no puede ser eliminado del sistema. Es el riesgo intrínseco de cada actividad, sin tener en cuenta los controles y medidas de reducción del riesgo

d. Riesgo residual: es el riesgo remanente después de la gestión de riesgo, este puede contener riesgos desconocidos.

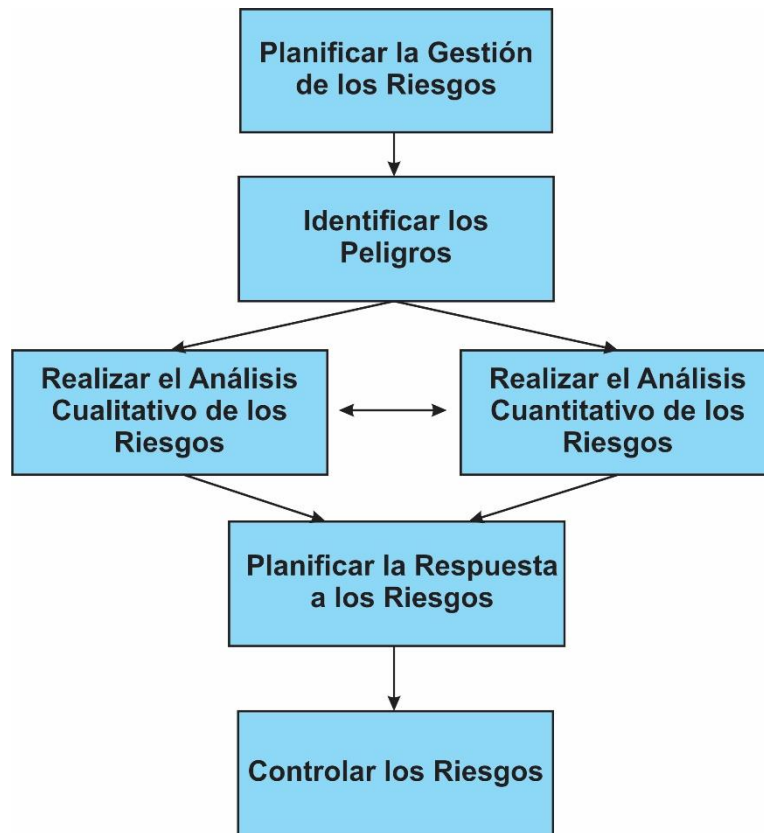
e. Riesgo tolerable: es el riesgo que se acepta en un contexto basado en los valores actuales de la sociedad o la empresa a cargo de un determinado proyecto

4.3 Procesos de la gestión de los riesgos

Es el proceso sistemático de una o más metodologías usadas para gestionar los riesgos. En la Figura 8 se ven los procesos de la gestión de riesgo según el Project Management Institute (PMI,2013)

Figura 8.

Procesos para la gestión de riesgos.



Adaptada de guía de PMBOK (2013). Project Management Institute.

4.3.1 Planificación en la gestión de riesgos.

Es el proceso de definir cómo realizar las actividades de gestión de riesgos de un proyecto. Es importante plantearse un pequeño número de preguntas que se necesitan responder, teniendo en cuenta que el propósito de un análisis de riesgo es proveer información que ayude a tomar mejores decisiones que presentan un grado de incertidumbre. Las preguntas son las siguientes:

- ¿Qué se quiere saber y por qué?, aquí es necesario considerar dos cosas. Primero organizar las preguntas que necesitan respuestas de críticas a interesantes, generalmente los modelos no son capaces de abarcar todos los puntos en consideración, así, se facilitara la determinación de que factores pueden ser tratados por apartes con métodos más simples.

Segundo tratar con el equipo encargado del análisis de riesgo bajo qué condiciones y restricciones se está trabajando (regulaciones o políticas de la compañía)

- ¿Qué asunciones son aceptables?, Aquí es necesario definir sí: ¿es posible asumir o no algo?, ¿bajo qué criterio voy a hacer esa asunción?, ¿qué tan conservativo se debe ser en las asunciones?
- ¿Cuál es el “timing” ?, es un error adicionar el análisis de riesgo de un proyecto al final de la fase de planeación, un análisis de riesgos hecho correctamente es parte integral de la planeación de cualquier proyecto la identificación y las acciones de gestión del riesgo, ayudaran a tomar decisiones tempranas sobre el curso del proyecto e incluso ayudaran a las estimaciones de costos y control sobre el mismo.

4.3.2 Identificación de los peligros.

Es la fase en la cual se determinan las fuentes potenciales de daño para una organización o proyecto, así como también el momento en donde se reconocen sus características. En algunas metodologías la identificación es el primer paso para el análisis de riesgo y por ende este se encuentra implícito en ellas, sin embargo, en el proceso de la identificación es donde se genera una perspectiva que ayudara a decidir cuales metodologías se adaptan mejor al problema identificado.

En su investigación Garrido, Morano, Ferreira y Haddad realizaron una clasificación de distintas metodologías usadas para la identificación de análisis de riesgos en la industria de las construcciones en Brasil. Se enumerarán y explicarán algunas metodologías en el orden correspondiente a la clasificación obtenida por dicha investigación:

- **Lista de chequeo:** se basa en el desarrollo de una lista de cumplimientos o características con los que deben contar las instalaciones, equipos o el proyecto en si la cuales son marcadas simplemente con un “si” o un “no”. Esta puede ser aplicada fácilmente y en un tiempo relativamente corto, pero no establece prioridades en las deficiencias observadas y su utilidad dependerá de la calidad de la lista. (PMBOK-PMI. 2013)

Durante el análisis de riesgo pueden ayudar a entender el contexto, identificar riesgos y agrupar riesgos por varios propósitos. Estas deben ser creadas basadas en la experiencia de fallos y aciertos en el pasado

- **Identificación causa raíz:** es un proceso grafico usado en la investigación y categorización de las causas esenciales de riesgo en un proyecto, este se divide en cuatro fases: recolección de información, hacer un mapa de factores causales, identificación de la causa raíz y recomendación, generación e implementación. (Morano, Martins, Ferreria.2006)

- **Diagramas de flujo:** es una herramienta grafica que muestra los pasos de un proceso, esta técnica es aplicada para una mejor comprensión del riesgo o los elementos interrelacionados

- **Construcción de escenarios:** es la construcción hipotética de escenarios que representan los procesos a ser desarrollados a través de la construcción lógica de cada evento, así como su interacción y su resultado. El análisis es realizado a través de la definición detallada del escenario y la exploración de los riesgos asociados a este. Pueden ser considerados en el análisis los siguientes parámetros:

1. Cambios en tecnología
2. Posibles decisiones a futuro que pueden tener variedades de resultados
3. Cambios en el macro ambiente (regulaciones, demografía, etc)
4. Necesidades del proyecto y sus posibles variaciones

- **Lluvia de ideas:** Es una técnica grupal que busca estimular y empoderar al grupo a generar de ideas relacionadas a uno o más temas de cualquier naturaleza, está dividida en dos fases: primero la fase de generación en la cual todos los participantes presentan tantas ideas como sea posible y segundo la fase de selección en la cual cada participante defiende su idea con el fin de convencer a los demás, con la finalidad de filtrarlas y seleccionarlas en el consenso grupal.

Una lluvia de ideas efectiva requiere esfuerzos para garantizar que los pensamientos de los otros en el grupo son usados para estimular la creatividad de cada participante. Es recomendable contar con un moderador experto que provea la estimulación necesaria al grupo pero que no limite el pensamiento, también es función del moderador direccionar al grupo para cubrir todas las áreas relevantes y asegurarse de que todas las ideas sean anotadas para su posterior análisis

- **Entrevistas:** Consiste en la realización de entrevistas a los participantes experimentados del proyecto, a los interesados y a los expertos en la materia con el fin de ayudar a identificar los riesgos o para indagar sobre los acontecimientos o serie de sucesos que pudieron haber ocurrido. Las entrevistas son estructuradas y poseen una serie de preguntas preparadas que buscan obtener información relevante de un tema específico que el investigador quiera abarcar.

Es importante que las preguntas sean abiertas, sean simples, se use un lenguaje apropiado para el entrevistado y que cada pregunta abarque un solo tema. Se deben preparar preguntas que busquen clarificar las respuestas de las entrevistas y ser cuidadosos con hacer preguntas ambiguas o difíciles de entender

- **Técnica Delphi:** Esta técnica consiste en un procedimiento que busca ganar consenso de opinión de un grupo de expertos. Buscando recolectar y comparar juicios sobre un tema en particular a través de un conjunto secuencial de preguntas.

Un hecho importante de la técnica Delphi es que los expertos expresan sus opiniones individual e independientemente y de manera anónima mientras se tiene acceso a las opiniones de los otros expertos a medida que el proceso avanza.

Para lograr la efectividad de esta técnica de evaluación se necesita un proceso adecuado para la identificación de riesgos:

1. Detección del problema y formulación.
2. Escoger el grupo o los grupos de expertos en el tema a tratar.
3. Formación del equipo encargado de la ejecución de la técnica.
4. Formación de otro grupo encargado de la supervisión del método.
5. Desarrollar un cuestionario.
6. Repartir el primer cuestionario entre los miembros del grupo.
7. La información obtenida del primer cuestionario es analizado y discutido.
8. Se realiza un segundo cuestionario combinando las respuestas; haciendo un consenso hasta llegar al equilibrio.

4.3.3 Análisis de Riesgo.

Según la Agencia de seguridad, energía y Ambiente (ASEA) de México el análisis de riesgo es:

La aplicación sistemática de una o más metodologías específicas para identificar peligros y evaluar riesgos de un proceso o sistema, con el fin de determinar metodológicamente los escenarios de riesgo y verificar la existencia de dispositivos, sistemas de seguridad, salvaguardas

y barreras suficientes ante las posibles amenazas que propiciarían la materialización de algún escenario de riesgo identificado (P.6).

Los procesos de análisis de riesgos pueden ser divididos en metodologías cualitativas, cuantitativas y semicuantitativas, los primeros buscan identificar el riesgo mediante escalas que resumen de manera visual e intuitiva las dimensiones relativas de cada riesgo, mientras los segundos tratan de cuantificar los riesgos de acuerdo con su probabilidad e impacto y los semicuantitativos son una combinación entre ambos procesos. La Figura 9, muestra que metodología debe usarse dependiendo de la jerarquización, prioridad y tolerancia asignada al riesgo durante la fase de identificación.

Figura 9.

Metodologías de análisis de riesgo vs nivel de riesgo.



Nota. Adaptada de ASEA, SEMARNAT. Guía para la elaboración de análisis de riesgo del sector hidrocarburos. Recuperado de

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/343905/GUIA_ANALISIS_DE_RIESGO.pdf

4.3.3.1 Análisis de riesgo cualitativo. Son métodos usualmente descriptivos y no implican exactamente la cuantificación del riesgo, estos proveen información y soporte para futuras investigaciones cuantitativas. Estas son muy útiles para proveer información necesaria para la gestión del riesgo. Algunas de las ventajas y desventajas se encuentran en la Tabla 1.

- Las metodologías cualitativas pueden ser preferibles cuando:
- Se realizan tareas rutinarias
- Cuando la teoría, la información o la experticia es limitada
- Se tienen grandes incertidumbres que pueden afectar el resultado final de un análisis de riesgo exitoso y veraz
- Cuando otros métodos son demasiado costosos y tienen una baja probabilidad de un análisis exitoso
- Cuando el análisis cuantitativo podría dar resultados inconclusos

Tabla 1.

Ventajas y desventajas de las metodologías de análisis de riesgo cualitativas

Ventajas	Desventajas
Son sencillos de realizar	Son subjetivos
Poco costosos	Los resultados pueden variar según las personas involucradas
Utilizan la experiencia de los ingenieros	Se requiere un análisis cuantitativo posteriormente para complementarlo

Nota: Adaptado de: Tamayo, Hincapié. (2006). Un estado del arte del análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos en proyectos.

4.3.3.2 Análisis de riesgo cuantitativo. Son métodos de ingeniería y formulaciones matemáticas, combinadas con información estadísticas de fallas para producir resultados numéricos de consecuencias de accidentes y sus frecuencias o probabilidades de ocurrencia. Una vez priorizados los riesgos con un análisis cuantitativo es función del análisis cuantitativo realizar una evaluación probabilística de este. (Tamayo, Hincapié.2016)

Tabla 2.

Ventajas y desventajas de las metodologías de análisis de riesgo cuantitativos

Ventajas	Desventajas
Emplean métodos probabilísticos y estadísticos para la determinación de riesgos Los resultados son más exactos Son objetivos	Son más costosos Requieren de mayor tiempo No son recomendables para procesos simples

Nota: Adaptado de: Tamayo, Hincapié. (2006). Un estado del arte del análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos en proyectos.

4.3.3.3 Análisis de riesgo semicuantitativos. Son métodos que no poseen el rigor ni el detalle de un análisis cuantitativo, pero, suponen un avance hacia ello desde los métodos cualitativos, ya que estos dan una clasificación relativa y numérica del riesgo asociado. Lo característico de este tipo de metodologías es la asignación numérica, subjetiva, a los riesgos identificados mediante los métodos cualitativos (Mejia.2006).

4.3.4 Planificación de respuesta a los riesgos.

Es el proceso de desarrollar opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas a los objetivos del proyecto. En esta fase de la gestión los riesgos son abordados en función de su prioridad, así, introduciendo recursos y actividades en plan de desarrollo del proyecto. Generalmente las respuestas a los riesgos se encuentran en alguna de las siguientes categorías según Vose (2008):

- Excesivo. Se están disponiendo demasiado recursos para gestionar un riesgo en comparación al nivel de protección que este requiere.
- No hacer nada. Porque el costo es demasiado alto o no hay nada que pueda ser hecho, usualmente para los riesgos de muy baja probabilidad.
- Recolectar más información. Se necesita un mejor entendimiento del riesgo.
- Adicionar una contingencia. El riesgo posee un umbral aceptable y la forma factible de solucionarlo es a través de una acción, equipo o procedimiento adicional que mitigue la probabilidad de ocurrencia y su impacto.
- Reducir. La estimación del riesgo fue muy alta, se debe tomar una aproximación menor del riesgo
- Compartir. El riesgo es dividido con socios o contratistas que pueden soportar y ayudar a solucionar el impacto de dicho riesgo
- Transferir. El riesgo es transferido a un tercero, junto con la responsabilidad de una respuesta.
- Eliminar. Cuando el riesgo es demasiado alto el proceso se debe hacerse de otra manera, eliminando así este. Es posible encontrar nuevos riesgos que no se habían identificado en el proceso.

- Cancelar el proyecto. Si no se encontró una solución viable a los riesgos el proyecto no se podrá realizar.

4.3.5 Controlar los riesgos.

En esta fase se implementan los planes de respuesta a los riesgos, se da seguimiento a los riesgos identificados, se monitorean los riesgos residuales, se identifican nuevos riesgos y se evalúa la efectividad del proceso de gestión de riesgo a través del proyecto. Un proceso importante en esta fase el registro de los riesgos, el cual es un documento o base de datos que lista los riesgos identificados y los propietarios de dichos riesgos, las respuestas acordadas, las acciones de control para evaluar la eficacia de los planes de respuesta, las respuestas a los riesgos, los síntomas y señales de advertencia de riesgos, los riesgos residuales y secundarios, una lista de riesgos de baja prioridad y las reservas para contingencias.

5. Metodologías para el análisis de riesgos

5.1 Metodologías de análisis de riesgo cualitativos

Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos es el proceso de priorizar riesgos para análisis o acción posterior, evaluando y combinando la posibilidad de ocurrencia e impacto de dichos riesgos. El beneficio clave de este proceso es que permite a los directores de proyecto reducir el nivel de incertidumbre y concentrarse en los riesgos de alta prioridad. (PMI,2013)

A continuación, se expondrán algunos métodos usados para el análisis de riesgo cualitativo.

5.1.1 HAZOP.

Conocido como “Estudio de Peligros y Operabilidad” (Hazard and Operability study, HAZOP) es un examen estructurado y sistemático de un producto, proceso, procedimiento o sistema, existente o previsto. Es una técnica inductiva para identificar los riesgos que se pueden producir para las personas, los equipos, el entorno y/o los objetivos de la organización. En los casos en que sea posible, el estudio proporcionará una solución para el tratamiento del riesgo.

Parte de la premisa de que los riesgos, los accidentes o los problemas de operatividad se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas "palabras guía". La metodología cuenta con 6 etapas

1. Definición del área de estudio: consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una determinada instalación de proceso, considerada como el área objeto de estudio, se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o líneas de proceso que corresponden a entidades funcionales propias: línea de carga a un depósito, separación de disolventes, reactores, etc.

2. Definición de los nudos: en cada uno de estos subsistemas o líneas se deberán identificar una serie de nudos o puntos claramente localizados en el proceso. Cada nudo deberá ser identificado y numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido del proceso

para mejor comprensión y comodidad. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nudo vendrá caracterizado por variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, etc.

La facilidad de utilización de esta técnica requiere reflejar en esquemas simplificados de diagramas de flujo todos los subsistemas considerados y su posición exacta.

El documento que actúa como soporte principal del método es el diagrama de flujo de proceso, o de tuberías e instrumentos.

3. Aplicación de las palabras guía: las palabras guía se utilizan para indicar el concepto que representan a cada uno de los nudos definidos anteriormente que entran o salen de un elemento determinado. Se aplican tanto a acciones (reacciones, transferencias, etc.) como a parámetros específicos (presión, caudal, temperatura, etc.). La Tabla 3 presenta algunas palabras guía y su significado.

4. Definición de las desviaciones a estudiar: para cada nudo se plantea de forma sistemática todas las desviaciones que implican la aplicación de cada palabra guía a una determinada variable o actividad. Para realizar un análisis exhaustivo, se deben aplicar todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión las desviaciones que no tengan sentido para un nudo determinado.

Paralelamente a las desviaciones se deben indicar las causas posibles de estas desviaciones y posteriormente las consecuencias de estas desviaciones.

Tabla 3.

Palabras guías y su significado del método HAZOP

Palabra guía	Significado
NO	Ausencia de la variable la cual se aplica.
MÁS	Aumento cuantitativo de una variable.
MENOS	Disminución cuantitativa de una variable.
INVERSO	Analiza la inversión en el sentido de las variables. Se obtiene el efecto contrario al que se pretende.
ADEMÁS DE	Aumento cualitativo. Se obtiene algo más que las intenciones del diseño.
PARTE DE	Disminución cualitativa. Parte de lo que debería ocurrir sucede según lo previsto.
DIFERENTE DE	Actividades distintas respecto a la operación normal.

Nota: Adaptado de Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos (guiar), Universidad de Zaragoza. Recuperado de https://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/HAZOP.htm#Recursos

5. Sesiones HAZOP: Las sesiones HAZOP tienen como objetivo la realización sistemática del proceso descrito anteriormente, analizando las desviaciones en todas las líneas o nudos seleccionados a partir de las palabras guía aplicadas a determinadas variables o procesos. Se determinan las posibles causas, las posibles consecuencias, las respuestas que se proponen, así como las acciones a tomar.

Toda esta información se presenta en forma de tabla (Figura 10) que sistematiza la entrada de datos y el análisis posterior.

Figura 10.

Entrada de Datos y análisis para sesiones HAZOP.

Planta:								
Sistemas:								
Nudo	Palabra guía	Desviación de la variable	Posibles causas	Consecuencias	Respuestas	Señalización	Acciones a tomar	Comentarios

Columna	Contenido
Posibles causas	Describe numerándolas las distintas causas que pueden conducir a la desviación
Consecuencias	Para cada una de las causas planteadas, se indican con la consiguiente correspondencia en la numeración las consecuencias asociadas
Respuestas del sistema	Se indicará en este caso:
	1. Los mecanismos de detección de la desviación planteada según causas o consecuencias: por ejemplo, alarmas 2. Los automatismos capaces de responder a la desviación planteada según las causas: por ejemplo, lazo de control
Acciones a tomar	Propuesta preliminar de modificaciones a la instalación en vista de la gravedad de la consecuencia identificada o a una desprotección flagrante de la instalación
Comentarios	Observaciones que complementan o apoyan algunos de los elementos reflejados en las columnas anteriores

Nota. Adaptado de Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos (guiar), Universidad de Zaragoza. Recuperado de https://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/HAZOP.htm#Recursos.

6. Informe final: El informe final consta de los siguientes documentos:

- Esquemas simplificados con la situación y numeración de los nudos de cada subsistema.
- Formatos de recogida de las sesiones con indicación de las fechas de realización y composición del equipo de trabajo.
- Análisis de los resultados obtenidos. Se puede llevar a cabo una clasificación cualitativa de las consecuencias identificadas.
- Listado de las medidas a tomar. Constituye una lista preliminar que debería ser debidamente estudiada en función de otros criterios (coste, otras soluciones técnicas,

consecuencias en la instalación, etc.) y cuando se disponga de más elementos de decisión lista de los sucesos iniciadores identificados.

5.1.2 Matriz de valoración de riesgo (RAM)

Es una herramienta para la evaluación cualitativa de los riesgos y facilita la clasificación de las amenazas a la salud, seguridad, medio ambiente, relación con clientes, bienes e imagen de la empresa. Los ejes de la matriz según la definición de riesgo corresponden a las consecuencias y a la probabilidad.

Para determinar el nivel de las consecuencias se utiliza una escala de “0” a “5”; para evaluar la probabilidad se utiliza una escala de “A” a “E”, basándose en la experiencia o evidencia histórica en que las consecuencias identificadas se han materializado dentro de la industria, empresa.

Esta metodología consta de 5 pasos:

1. Evaluación de las consecuencias: Esta debe hacerse basándose en lo que podrá ocurrir o podría haber ocurrido bajo condiciones levemente diferentes (consecuencias potenciales estimadas) o en lo que realmente ocurrió, dependiendo la actividad que se esté evaluando o clasificando, a saber.

2. Evaluación de la probabilidad: Corresponde al eje horizontal de la matriz, el cual representa la medición de probabilidad de la ocurrencia del evento, con la consecuencia identificada. La escala se define como:

- A- No ha ocurrido en la industria.
- B- Ha ocurrido en la industria.
- C- Ha ocurrido en nuestra empresa.

D- Sucede varias veces por año en nuestra empresa.

E- Sucede varias veces por año en la unidad, superintendencia o departamento.

3. Clasificación de los riesgos: La evaluación y clasificación de los riesgos debe hacerse teniendo en cuenta los siguientes tres elementos:

- El primero es la categoría de consecuencia con la cual está relacionada la evaluación: Personas (PE), Económica (EC), Ambiental (MA), Cliente (CL) e Imagen (IM).
- El segundo corresponde a la gravedad de las consecuencias: 0-5.
- El tercero corresponde al nivel de probabilidad del suceso: A-E. La intersección de la fila elegida con la columna seleccionada corresponde a la clasificación del riesgo. Los incidentes pueden tener consecuencias en las cinco categorías

Figura 11.

Matriz de valoración de riesgos de Ecopetrol, decisiones. Ecopetrol.

COLOR	RIESGO	TOMANDO DECISIONES	PARA EJECUTAR TRABAJOS
VH	Muy Alto	Intolerable.	Buscar alternativas. Si se decide hacer el trabajo, la alta dirección (Vicepresidente o Director) define el equipo para la elaboración del ATS y lo aprueba.
H	Alto	Deben buscarse alternativas que presenten menor riesgo. Si se decide realizar la actividad se requiere demostrar cómo se controla el riesgo y los cargos de niveles iguales o superiores a Gerente, Gerente General, Gerente de Negocio o Jefe de Unidad deben participar y aprobar la decisión.	Buscar alternativas. Si se decide hacer el trabajo, el Gerente, Gerente General, Gerente de Negocio, Jefe de Unidad o Jefe de Departamento del área involucrada nombra el equipo para elaborar ATS y lo aprueba.
M	Medio	No son suficientes los sistemas de control establecidos; se deben tomar medidas que controlen mejor el riesgo.	El coordinador nombra el equipo para elaborar ATS y lo aprueba.
L	Bajo	Se deben gestionar mejoras a los sistemas de control establecidos (procedimientos, listas de chequeo, responsabilidades, protocolos, etc.).	Efectuar Tres Ques: • ¿Qué puede salir mal o fallar? • ¿Qué puede causar que algo salga mal o falle?
N	Ninguno	Riesgo muy bajo, usar los sistemas de control y calidad establecidos (procedimientos, listas de chequeo, responsabilidades, protocolos, etc.)	• ¿Qué podemos hacer para evitar que algo salga mal o falle?

Nota. Adaptado de Ecopetrol. (2008). Uso de la matriz de valoración de riesgos- RAM.

4. Estimar las consecuencias reales o potenciales: dependiendo del caso se analizará la categoría seleccionada, al ser una metodología cualitativa no se requieren datos precisos, busque el consenso de la mayoría del equipo que hace el análisis. En la Figura 11, se puede apreciar la categorización de las consecuencias según la clasificación de riesgos que corresponda.

5. Analizar: una vez escogidos los valores de consecuencias y probabilidad, busque dentro de la matriz el punto de intercepción, el cual corresponderá a la valoración de ese riesgo. En la Figura 12, se tiene el formato ECP-DRI-F-045 Matriz de valoración de riesgos de Ecopetrol.

Figura 12.

Matriz de valoración de riesgos de Ecopetrol consecuencias y probabilidad.

CONSECUENCIAS						PROBABILIDAD				
						A	B	C	D	E
Personas	Economica	Ambiental	Cientes	Imagen de la Empresa		No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento
Una o mas fatalidades	Catastrofica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M ○	M ○	H ○	H ○	VH ○
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L ○	M ○	M ○	H ○	H ○
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N ○	L ○	M ○	M ○	H ○
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N ○	N ○	L ○	L ○	M ○
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N ○	N ○	N ○	L ○	L ○
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N ○	N ○	N ○	N ○	N ○

Nota. Adaptado de Ecopetrol. (2008). Uso de la matriz de valoración de riesgos- RAM.

5.1.3 Análisis preliminar de riesgos

También conocido como análisis preliminar de riesgos. Es un método ampliamente usado para la localización y detección de riesgos o peligros y para garantizar los caminos de mitigación de estos. Se usa para un primer análisis en la fase de diseño y desarrollo inicial de cualquier proceso, producto o sistemas. (OHSAS 18001, 2015).

Fundamentalmente consiste en una lista de peligros y causas enfocada en los siguientes temas:

- Materiales o materias primas
- Límites de los equipos empleados
- Entorno o ambiente en que se desempeña el proyecto
- Interacciones de los sistemas empleados
- Operaciones
- Demás peligros identificados

Se finaliza la metodología con un informe del resultado, en él se añaden medidas correctivas o preventiva para cada peligro.

5.1.4 ¿Qué pasa sí?

Esta técnica es un método inductivo que utiliza información específica de un proceso para generar una serie de preguntas que son pertinentes durante el tiempo de vida de una instalación, así como cuando se introducen cambios al proceso o a los procedimientos de operación. Consiste en definir tendencias, formular preguntas, desarrollar respuestas y evaluarlas, incluyendo la más amplia gama de consecuencias posibles. Información específica obtenida de los diagramas de

procesos y diagramas de tuberías e instrumentación así como también de los manuales y procedimientos estándares son utilizadas para generar una lista verificación y plantear una serie de preguntas empleando la pregunta ¿Qué pasa sí?, las cuales son contestadas colectivamente por el grupo de trabajo y resumidas en forma tabular.

5.1.5 Análisis de causa raíz.

El análisis de causa raíz (RCA, por sus siglas en inglés) es el proceso de descubrir las causas raíz de los problemas para identificar soluciones adecuadas. El RCA asume que es mucho más efectivo prevenir y resolver sistemáticamente los problemas subyacentes en lugar de sólo tratar los síntomas ad hoc y apagar incendios.

El análisis de la causa raíz se puede realizar con una colección de principios, técnicas y metodologías que pueden aprovecharse para identificar las causas raíz de un evento o tendencia. Al ver más allá de la causa y el efecto superficial, el RCA puede mostrar en qué punto los procesos o sistemas fallaron o causaron un problema en primer lugar. El análisis causa raíz cuenta con un gran número de metodologías y técnicas.

5.1.5.1 Los cinco por qué. Es una técnica sistemática de preguntas utilizada durante la fase de análisis de problemas para buscar posibles causas principales de un problema. La técnica requiere de un equipo que pregunte “¿Por Qué?” al menos cinco veces. Cuando sea difícil para el equipo responder, es posible que se haya identificado la causa más probable. Los pasos para esta metodología son:

1. realizar una sesión de lluvia de ideas

2. Una vez se hayan identificado las causas probables preguntar: ¿Por qué es así? O ¿Por qué está pasando eso?
3. Continuar preguntando por qué al menos cinco veces, con el objetivo de profundizar en las causas. Es posible que se tenga que ir más allá de los 5 “¿por qué?” en algunas ocasiones.
4. Es importante nunca salirse del ¿Por qué? y entrar en el ¿Quién? O en el ¿Cómo? El objetivo del análisis es estudiar el proceso

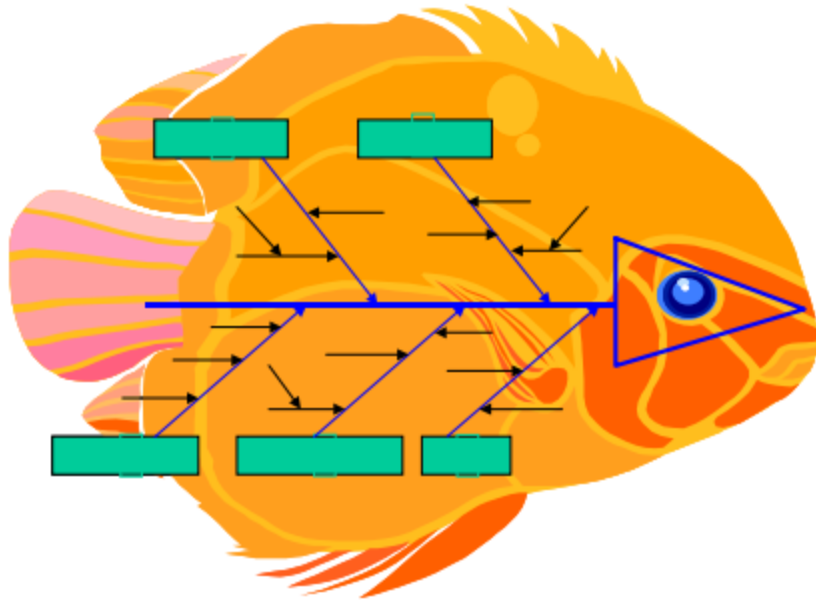
5.1.5.2 Diagrama causa-efecto (espina de pescado). Es una herramienta de análisis que nos permite obtener un cuadro, detallado y de fácil visualización, de las diversas causas que pueden originar un determinado efecto o problema. Esta metodología no es una herramienta para resolver un problema su fin es explicarlo, es decir, analizar sus causas.

El diagrama de causa-efecto es especialmente útil para:

- a. Determinar las posibles causas de un problema.
- b. Agrupar estas causas en diferentes categorías o factores.
- c. Orientar las posteriores acciones correctoras hacia las causas identificadas (especialmente si se identifican las causas principales).
- d. Proporcionar un nivel común de comprensión. Al final de la reunión, el diagrama causa-efecto es el mismo para todos, con independencia de las causas que cada uno, individualmente, fuese capaz de identificar.
- e. Reflejar la dispersión del conocimiento del equipo. Cuanto más ramificado esté un diagrama causa-efecto, será señal de una mayor diversidad de causas identificadas.

Figura 13.

Diagrama espina de pescado.



Nota. Adaptado de Escuela técnica superior de ingenieros industriales – Universidad de Vigo. Gestión de calidad, la seguridad y el medio ambiente (4º organización industrial).

La metodología del diagrama causa-efecto consta de cuatro fases:

1. Reunión de análisis previa: en esta fase se determina el problema a analizar y el grupo de personas que deben intervenir en el análisis. Para posteriormente convocar al grupo y anunciarles el problema concreto que se va a analizar

2. Reunión de análisis: Una vez planteado el problema al grupo analista se realiza una reunión en donde el grupo va dando sus opiniones, de forma ordenada, sobre las posibles causas que cada uno identifica para dicho problema (es posible aplicar la metodología de lluvia de ideas). Mientras el coordinador del grupo anota cada una de las ideas. Una vez se han agotado las opiniones el coordinador del grupo dibuja el diagrama en una pizarra.

En el triángulo de la “cabeza del pez” se escribe el problema considerado. A continuación, se identifica los factores o grupos de causas en que éstas pueden clasificarse y se les asigna una

flecha que entronca en “espina” principal del pez. Habitualmente los factores suelen estar predefinidos como las “5 emes” que son:

1ª M: Maquinas

2ª M: Mano de obra

3ª M: Método

4ª M: Materiales

5ª M: Medio (entorno de trabajo)

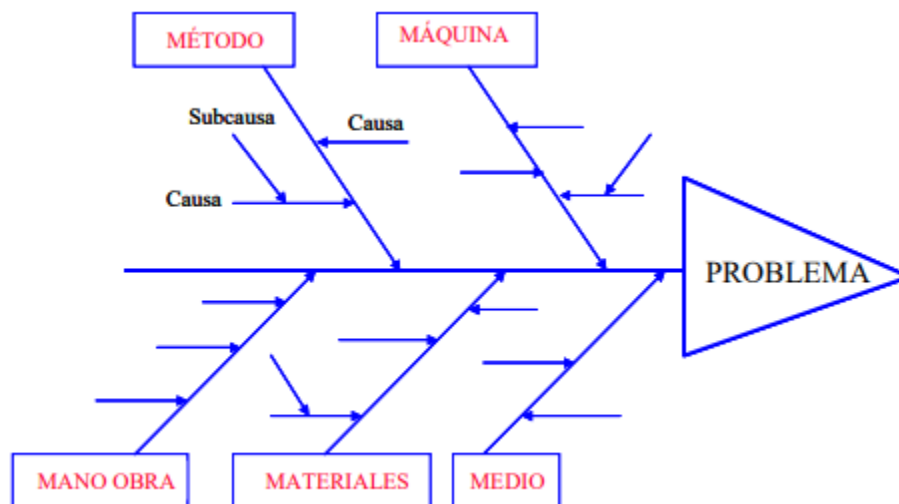
3. En la tercera fase de la metodología el coordinador y el grupo de analistas, asigna a cada una de las causas identificadas a uno de los títulos o conjunto de causas definidos, utilizando flechas paralelas a la espina central y escribiendo de nuevo la causa al lado de cada flecha. Cuando aparecen causas que lo sean, a su vez, de otras causas. Se pueden añadir flechas que entronquen a las causas y son conocidas como subcausas.

En la figura 14, se observa el diagrama luego de realizar las tres primeras fases

4. Finalmente, se determina cual es el orden de importancias de las causas identificadas.

Figura 14.

Fases diagrama causa efecto.



Nota. Adaptado de Escuela técnica superior de ingenieros industriales – Universidad de Vigo. Gestión de calidad, la seguridad y el medio ambiente (4º organización industrial).

5.1.5.3 Análisis de capa de protección (LOPA). Este método utiliza rigurosas reglas para simplificar y estandarizar las definiciones de las capas de protección independientes y los sucesos desencadenantes. Si se siguen estas reglas, la evaluación de riesgos dará una aproximación del orden de magnitud del riesgo de una combinación causa-efecto determinada situación.

Las capas de protección son dispositivos empleado para proteger y mejorar la seguridad y desempeño de un equipo o proceso, estas pueden ser físicas o administrativa y se clasifican en 5 tipos: barreras que promueven, barreras que previenen, barreras que disuaden, barreras que detectan y barreras que compensan.

El procedimiento de esta metodología es el siguiente:

1. Identificar el objetivo a estudiar, proceso que se desea analizar por prevención o incidente que se desea analizar en retrospectiva.
2. Identificar un peligro particular del objetivo.
3. Determinar las consecuencias de la situación de peligro.
4. Identificar y enumerar todas las barreras correspondientes a este peligro
5. Analizar los requisitos de independencia, especificidad, fiabilidad y auditabilidad. Para cada capa de protección.
6. Formular recomendaciones específicas

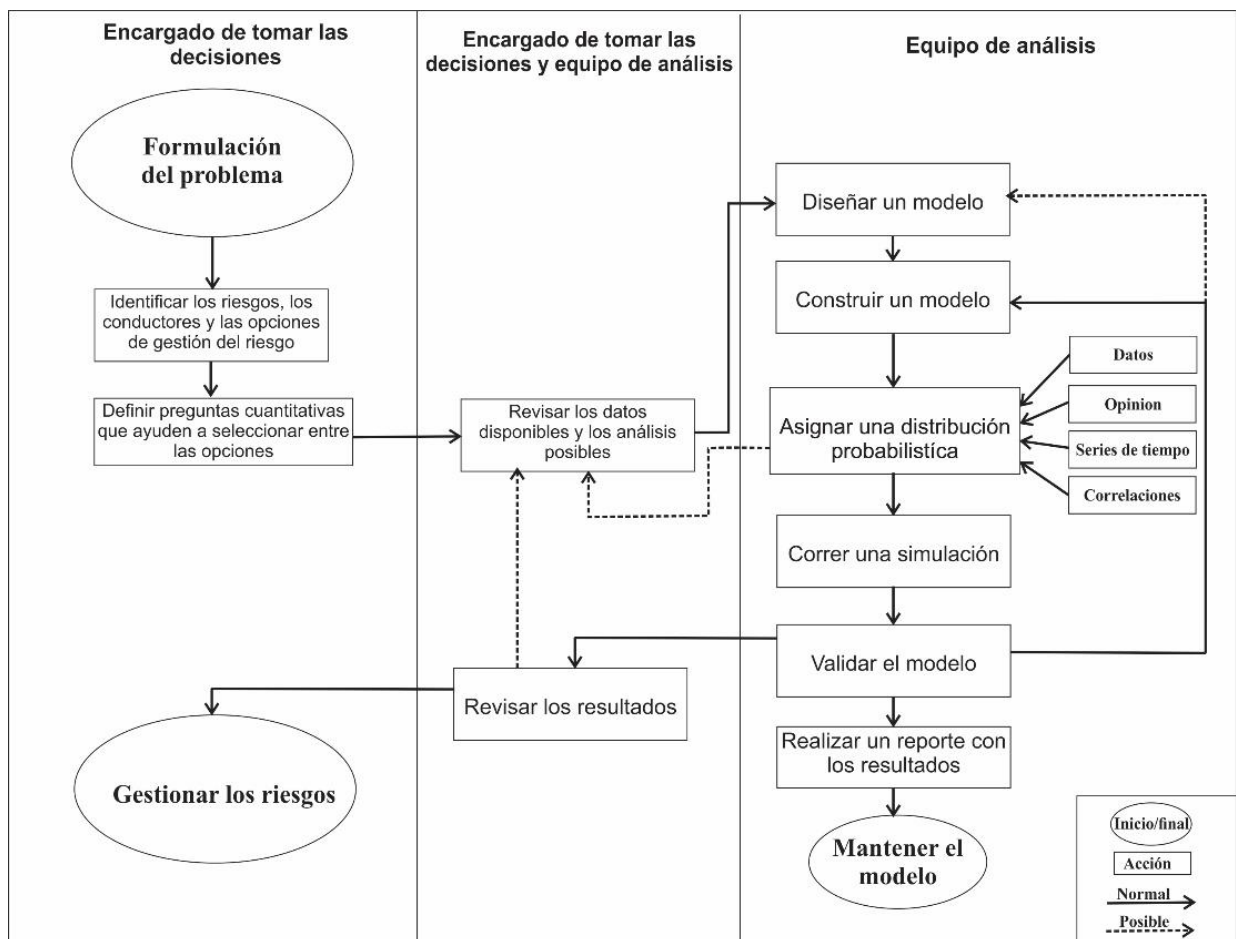
5.2 Metodologías de análisis cuantitativo

Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos generales del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que genera información cuantitativa sobre los riesgos para apoyar la toma de decisiones a fin de reducir la incertidumbre del proyecto. (PMI, 2013)

El proceso de análisis de riesgo cuantitativo es posterior al análisis cualitativo, una vez priorizados los riesgos se realiza el análisis numérico de los impactos de ellos sobre el proyecto. En la figura 15 se describe el esquema general para el análisis de riesgos cuantitativos.

Figura 15.

Proceso de análisis de riesgo cuantitativo.



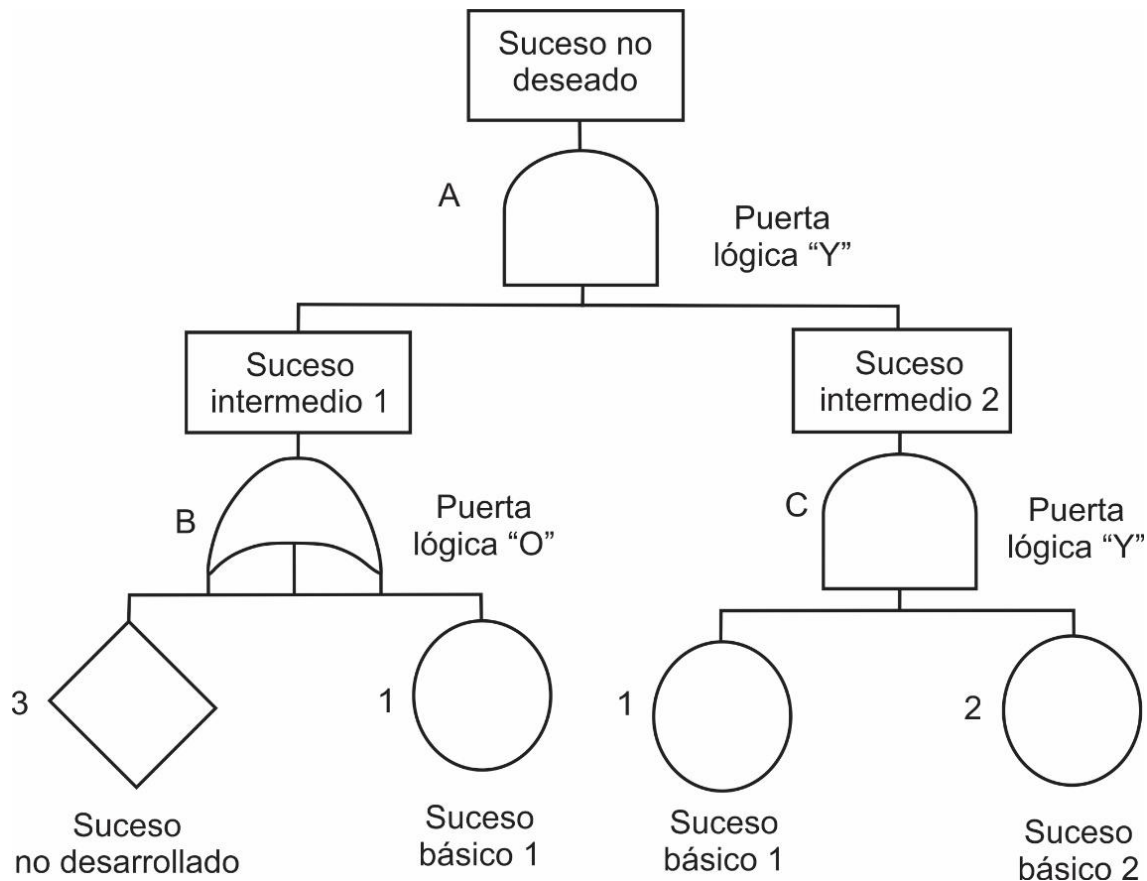
Nota. Adaptado de Vose, D. (2008). Risk Analysis A quantitative guide.

5.2.1 Árbol de fallas.

Se trata de una metodología deductiva de análisis, basado en las leyes de algebra de Boole, que parte de la previa selección de un suceso no deseado o evento que se pretende evitar, con el fin de averiguar los orígenes de este. Estos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados cualitativos y cuantitativos, así como también, pueden ser usados para analizar hacia atrás el origen de determinado suceso indeseado. La Figura 16, muestra el esquema de un árbol de fallas.

Figura 16.

Metodología de árbol de fallas



Nota. Adaptado de Ministerio de trabajo y asuntos sociales España. NTP 333: análisis probabilístico de riesgos: metodología del “árbol de fallos y errores”.

El desarrollo del árbol de fallas consiste en la descomposición sistemática de un suceso complejo no deseado en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos para los cuales se les puede calcular la probabilidad de fallos. En este proceso de descomposición se recurre a una serie de puertas lógicas que representan a los operadores del algebra correspondientes a las leyes del algebra de Booles. El árbol de fallas puede ser analizado cualitativamente a través del análisis de las puertas lógicas o cuantitativamente a través de la determinación de valores probabilísticos.

Para la valoración de la probabilidad global de aparición del "suceso no deseado" se realizan los siguientes pasos:

1. Se asignan valores probabilísticos a los sucesos primarios.
2. Se determinan las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la aparición del "suceso no deseado": establecimiento de los "conjuntos mínimos de fallos".
3. Se calcula la probabilidad de cada una de las vías de fallo representada por los conjuntos mínimos de fallos, la cual es igual al producto (intersección lógica en álgebra de Boole) de las probabilidades de los sucesos primarios que la componen.
4. Se calcula la "probabilidad de que se produzca el "acontecimiento final", como la suma de las probabilidades (unión lógica de todos los N conjuntos mínimos de fallo en álgebra de Boole) de los conjuntos mínimos de fallo, como límite superior, ya que matemáticamente debería restarse la intersección de éstos.

5.2.2 *Árbol de sucesos.*

El árbol de sucesos es una sencilla técnica de análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos que permite estudiar procesos secuenciales de hipotéticos accidentes a partir de sucesos iniciales indeseados, verificando así la efectividad de las medidas preventivas existentes.

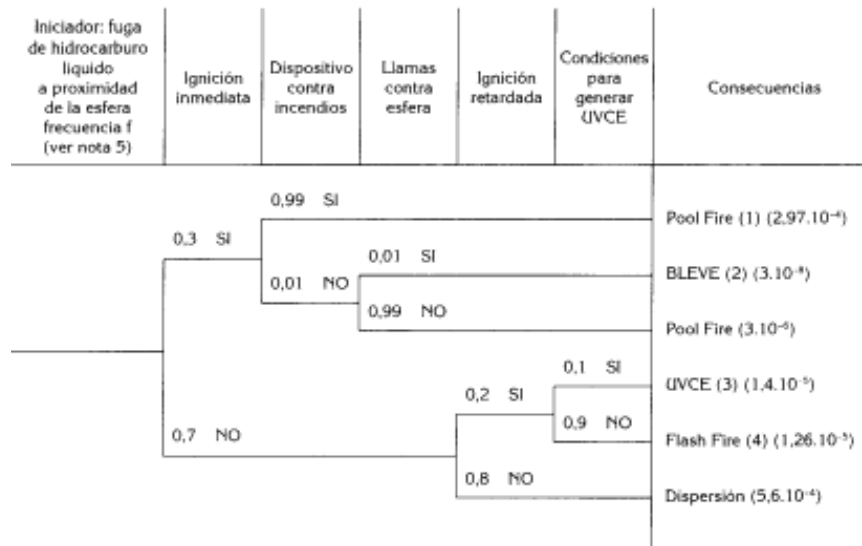
El proceso para el desarrollo de un árbol de sucesos es el siguiente:

1. Etapa previa, familiarización con la planta.
2. Identificación de sucesos iniciales de interés.
3. Definición de circunstancias adversas y funciones de seguridad previstas para el control de sucesos.
4. Construcción de los árboles de sucesos con inclusión de todas las posibles respuestas del sistema.
5. Clasificación de las respuestas indeseadas en categorías de similares consecuencias.
6. Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de sucesos.
7. Cuantificación de las respuestas indeseadas.
8. Verificación de todas las respuestas del sistema

La cuantificación del árbol se da realizando un producto de las frecuencias del suceso iniciador y las frecuencias de las respuestas indeseadas o factores condicionantes.

Figura 17.

Cuantificación del árbol de sucesos.



Nota. Adaptado de: Protección civil España. guía técnica: métodos cuantitativos para el análisis de riesgos. Recuperado de

http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/Metodos_cuantitativos/cuant_252.htm.

5.2.3 Simulación Monte Carlo.

Es una técnica matemática computarizada que permite tener en cuenta el riesgo en análisis cuantitativos y tomas de decisiones. Esta técnica es utilizada por profesionales de campos tan dispares como los de finanzas, gestión de proyectos, energía, manufacturación, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, transporte y medio ambiente.

La simulación Monte Carlo ofrece a la persona responsable de tomar las decisiones una serie de posibles resultados, así como la probabilidad de que se produzcan según las medidas

tomadas. Muestra las posibilidades extremas, los resultados de tomar la medida más arriesgada y la más conservadora, así como todas las posibles consecuencias de las decisiones intermedias

La simulación Monte Carlo realiza el análisis de riesgo con la creación de modelos de posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores, una distribución de probabilidad para cualquier factor con incertidumbre inherente. Luego, calcula los resultados una y otra vez, cada vez usando un grupo diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad. Dependiendo del número de incertidumbres y de los rangos especificados, para completar una simulación Monte Carlo puede ser necesario realizar miles o decenas de miles de recálculos.

5.3 Metodologías de análisis de riesgo semicuantitativos

En este tipo de metodologías se busca darle una cuantificación al riesgo dándole valores a parámetros cualitativos con el fin de cuantificarlos y obtener resultados numéricos del riesgo. Sin embargo, no poseen la precisión de los análisis cuantitativos al tener la subjetividad de quien realiza el análisis.

5.3.1 Análisis modal de fallos y efectos (FMEA).

Es un método que permite relacionar de manera sistemática una relación de fallos posibles, con sus consiguientes efectos, resultando de fácil aplicación para analizar los cambios en el diseño o modificaciones en el proceso. El método permite identificar las consecuencias de la

materialización de los riesgos, la frecuencia y la eficacia de los planes de mitigación actuales. El desarrollo de la metodología es el siguiente:

1. Identificar la operación y/o función a analizar.
2. Identificar el modo de fallo posible del proceso.
3. Analizar los efectos potenciales en caso de fallos.
4. Profundizar en las causas del fallo, relacionando con la mayor amplitud posibles todas

las causas de fallo concebibles que pueda asignársele a cada modo de fallo.

5. Analizar las medidas de control actuales y previstas.
6. Determinar la gravedad (G) en un índice de 1 a 10.
7. Determinar la frecuencia (F) en un índice de 1 a 10.
8. Determinar la detectabilidad (D) en un índice de 1 a 10.
9. Calcular el índice de prioridad de riesgo (IPR). Donde $IPR = D * G * F$.
10. Tomar una acción correctora.

5.3.2 Índice Dow para incendio y explosiones.

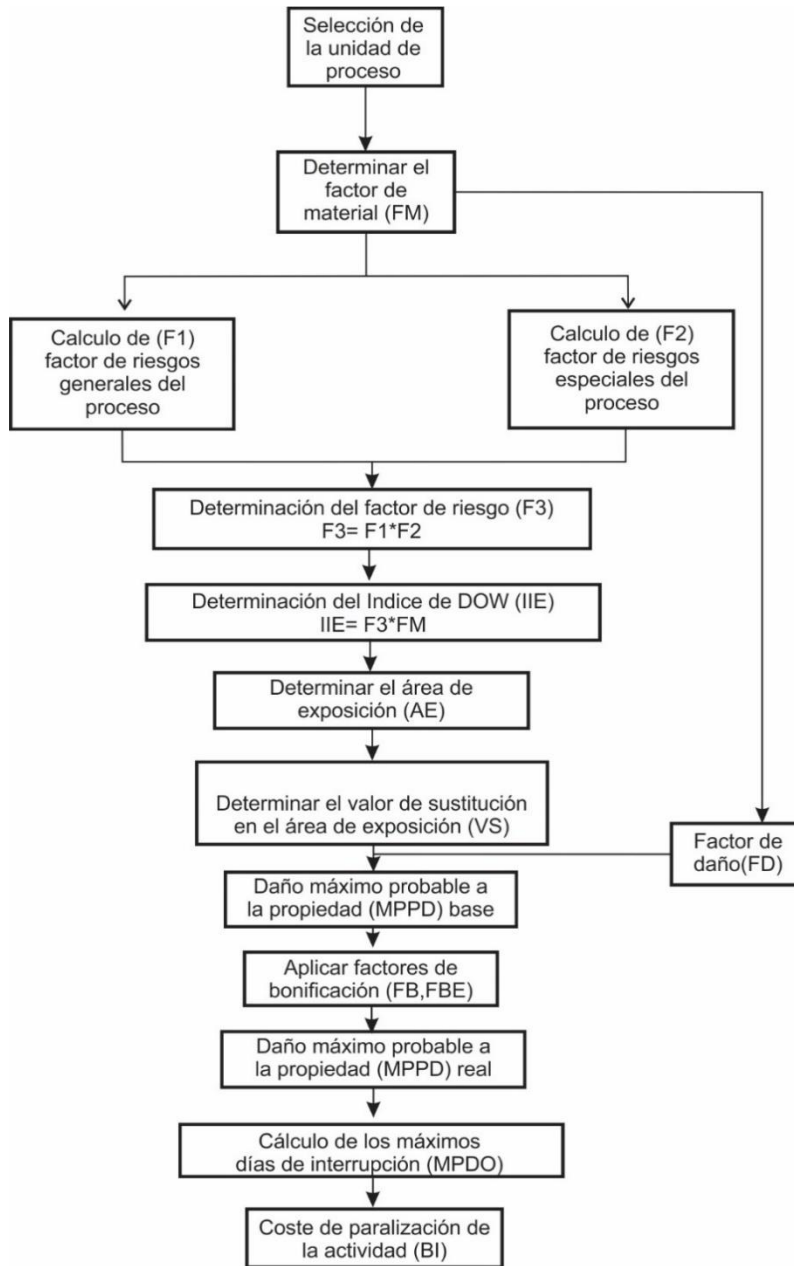
Es una herramienta para la evaluación objetiva paso a paso de la posibilidad real de un incendio, explosión y reactividad de equipos de proceso y su contenido en la industria química. Su propósito es servir como guía para seleccionar el método de protección contra incendios adecuado y ofrecer información clave para ayudar a evaluar el riesgo general de incendio y explosión. La Figura 18 muestra el proceso de esta metodología.

1. Dividir la planta química en estudio en unidades de proceso para cada una de las cuales se determinará su índice de incendio y explosión (IIE).

2. Determinar el Factor de Material (FM) para cada Unidad.
3. Evaluar los factores de riesgo, considerando las condiciones generales de proceso (reacciones exotérmicas o endotérmicas, transporte de material, accesos, etc.) (F1) y los riesgos específicos del proceso/producto tóxico peligroso, operación en vacío, operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad, y otra (F2).
4. Calcular el Factor de Riesgo (F3) y el Factor de Daño (FD) para cada unidad determinada en 1.
5. Determinar los Índices de Incendio y Explosión (IIE) y el Área de Exposición para cada Unidad de Proceso seleccionada (AE).
6. Calcular el valor de sustitución del equipo en el área de exposición (VS).
7. Calcular el Daño Máximo Probable a la Propiedad (MPPD), tanto básico como real, por consideración de los factores de bonificación (FB y FBE).
8. Determinar los Máximos Días de Interrupción (MPDO) y los costes por Paralización de la Actividad (B1) en estos días.

Figura 18.

Guía de aplicación de metodología índice dow.



Nota. Adaptada de DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide. Sexta edición,

1987.

Recuperada

de

http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/metodos_cualitativos/cuali_221.htm

6. Metodologías de análisis de riesgos basadas en las barreras de defensa

En el desarrollo de la investigación del caso Macondo fue utilizado el modelo del queso suizo para representar la penetración de las amenazas a través de las diferentes barreras clasificados en factores organizacionales, ambiente laboral, acciones individuales y de equipo y la ausencia o fallo de barreras.

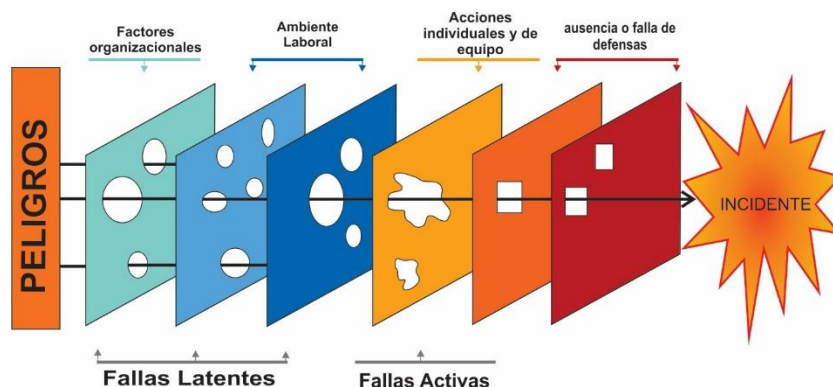
Los modelos para el análisis de riesgo son enfoques que ayudan a comprender como ocurren las fallas de un proceso u organización. Estos no son métodos ya que no poseen diagramas, pasos o una guía procedimental como si lo tienen las metodologías de análisis de riesgo.

6.1 Modelo del queso suizo.

Este modelo fue creado por James T. Reason en el año 1990, con el fin de explicar porque ocurren fallas, accidentes, desastres y fallas en sistemas sociotécnicos complejos. Los sistemas sociotécnicos son aquellos que involucran un trabajo conjunto y sincronizado entre el factor humano y tecnológico.

Figura 19.

Diagrama del modelo queso suizo.



Nota. Adaptado de Enhance, Perú. Recuperado de <http://enhanceperu.com/site/wp-content/uploads/2018/05/Guia-Investigaci%C3%B3n-Incidentes-ICAM.pdf>.

El modelo busca mostrar a través de una representación gráfica y estructurada de cada componente de una organización y su vulnerabilidad. Cualquier componente que deseé ser analizado de un proceso u organización puede considerarse como un segmento, rebanada de queso suizo, y ninguno de estos elementos es perfecto ni impermeable a los fallos por lo que su vulnerabilidad es representada con los agujeros de dicho queso. Un incidente ocurrirá cuando se alinean estos puntos vulnerables, fallos o imperfecciones en cada segmento.

La premisa principal de este método es que los procedimientos actuales cuentan con una serie de barreras de protección sociotécnicas que son vulneradas con pequeños fallos que de manera individual posiblemente no hubieran generado un incidente catastrófico, pero en conjunto y en presencia de un factor o agente desencadenante lo harán.

J. Reason planteo las siguientes ideas que condujeron a la estructuración del modelo:

- Los accidentes generalmente son causados por la coincidencia o convergencia de múltiples factores.
- Los factores pueden variar desde actos individuales hasta errores organizativos o sistémicos.
- Las fallas que pueden contribuir a un evento catastrófico no tienen un impacto significativo cuando ocurren de forma aislada.
- Los seres humanos son propensos a errores operativos y, por lo tanto, requieren sistemas que estén diseñados adecuadamente para mitigar estos riesgos.

- Muchos factores que contribuyen a un accidente están latentes, es decir, a veces están alineados pero inactivos, esperando el desencadenante que los desencadenará en cualquier momento

Bajo los planteamientos anteriores se pueden definir dos términos. Las fallas activas, son aquellos errores y violaciones de los procedimientos o normativas que tienen un efecto adverso inmediato, por lo general asociados a los operadores. Las fallas latentes, son acciones o decisiones en las cuales sus consecuencias pueden estar inactivas por un largo tiempo y solo convirtiéndose evidentes cuando se combinan con factores desencadenantes locales (fallas activas, fallas técnicas o condiciones atípicas del sistema).

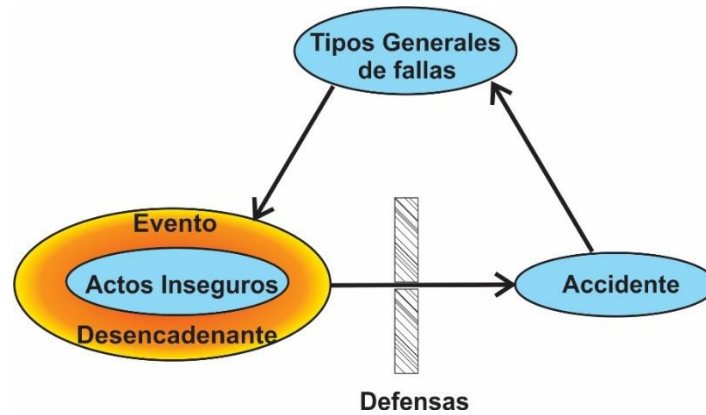
A partir de este modelo se generaron metodologías como la Tripod Delta, Bow Tie y la Tripod Beta. Todas estas metodologías están basadas en los mismos principios, el error humano individual y organizacional y el error en las barreras de protección de las distintas operaciones. Para el correcto uso de ellas es ideal integrarlo con otras metodologías de análisis de riesgo y con el plan de gestión de riesgo.

6.2 Tripod Delta.

Es un modelo basado en las metodologías de listas de chequeos buscando garantizar la seguridad de los procesos. Este fue desarrollado por el trabajo conjunto de la Universidad de Leiden, la Universidad de Manchester y la compañía petrolera Shell. El concepto central del modelo es el de fallas latentes y tiene un énfasis especial referente al error humano organizacional e individual.

Figura 20.

Modelo tripod Delta.



Nota. Adaptado de Energy Institute London. (2015). Guidance on using tripod beta in investigation and analysis of incidents, accidents and business losses.

El modelo del triángulo delta es una herramienta diagnóstica desarrollada para ayudar a identificar problemas antes de que las fallas latentes tengan una posible activación. Consta de tres premisas bases:

1. Los accidentes ocurren cuando las defensas fallan
2. La infortunada secuencia de eventos envuelve uno o más actos inseguros en el contexto de una condición desencadenante, sea de origen técnico o humano.
3. Detrás de un acto o condición insegura hay un historial de causas, clasificado dentro un limitado grupo de tipos de fallas (GTF)

Tabla 4.

Grupo de tipos de fallas

Grupo de tipos de fallas	
Hardware	HW
Mantenimiento	MM
Objetivos Incompatibles	IG

Comunicación	CO
Defensas	DF
Diseño	DE
Procedimiento	PR
Gestión interna	HK
Organización	OR
Entrenamiento	TR

Nota: Adaptado de Hudson P.T.W, Reason J.T, Wagenaar W.A, Bentley P.D, Primrose M, y Visser J.P. (1993). Tripod Delta: Proactive Approach to Enhanced Safety.

Para el desarrollo del método se usa una metodología de lista de chequeo seguido por un estructurado diagnóstico para definir acciones preventivas. La lista es desarrollada a través de un número de preguntas indicadoras. Un indicador es un señalador de que algo no está tan bien como debe o podría ser.

Al realizar esta serie de preguntas para cada uno de los elementos del GTF, el método apunta a encontrar a través de respuestas inaceptables identificar la presencia de problemas potenciales. Se debe realizar una base de datos de preguntas a ser utilizadas en listas de chequeos para condiciones o procedimientos específicos. Estas preguntas deben ser realizadas con base en la experiencia, el correcto seguimiento procedimental, normatividad de la empresa y local, así como también basados en la estadística y base de datos recolectados a través del tiempo en las operaciones de la compañía. Los encargados de formular los indicadores para cada uno de los GTF debe ser un grupo de especialistas, ingenieros y operadores que posean dominio y conocimiento de las operaciones involucradas. Este mismo grupo será el encargado de generar un perfil de estado de fallo a través de las siguientes tres etapas:

- Definir un mundo perfecto, entendido como un conjunto de todas condiciones deseadas para cada uno de los GTF.
- Generar los indicadores, estos deben ser pequeños, objetivos y preferiblemente indicar que las condiciones deseables definidas en el mundo perfecto estas siendo o no cumplidas. Las respuestas de estas preguntas deben ser del tipo Si/No.
- Validar los indicadores a través de la aceptación de la gerencia en términos de su relevancia, objetividad y entendimiento.

Una vez construido el banco de indicadores la lista de chequeo se construye seleccionando un número de indicadores para cada uno de los GTF usualmente 20 para cada uno. Se recomienda el uso de software realice esta tarea para garantizar que ningún indicador usado en anteriores listas de chequeo sea repetido inmediatamente en las siguientes. El análisis del perfil será realizado por expertos de acuerdo con el número de respuestas negativas obtenidas dándole un puntaje entre 0 y 20, donde el mejor resultado es 0 y 20 el peor escenario.

6.3 Modelo de Bowtie

El método Bowtie es un sistema de gestión que incorpora técnicas de análisis cualitativo que permite visualizar el riesgo al que se está enfrentando en una sola perspectiva y de fácil entendimiento. El diagrama tiene la forma de una corbata, creando una clara distinción entre la gestión de riesgos proactiva (preventiva) y reactiva, además, es un diagrama causal, lo que significa que modela escenarios de riesgo que podrían ocurrir e identifica qué barreras controlan ese escenario en particular. Bowtie se ha popularizado dado a su simplicidad y a que permite combinar la causa (árbol de falla) y la consecuencia (árbol de eventos) por lo tanto también es posible realizar un análisis cuantitativo y evaluar el riesgo.

Este método de análisis se utiliza con una matriz de riesgos para categorizar los diferentes escenarios, y luego llevar a cabo un análisis más detallado de las fallas y eventos, determinando los de más alto riesgo.

Un diagrama de Bowtie puede crearse fácilmente mediante la definición de las partes del proceso y respondiendo las preguntas secuencialmente:

1. Evento que debe prevenirse: ¿Cuál es el evento top? ¿Qué pasa si el peligro es liberado?
2. Amenazas que pueden causar que el evento ocurra: ¿Qué puede causar la liberación del peligro?, ¿Cómo se puede perder el control?, ¿Las causas pueden producir directamente el evento iniciador?, ¿Las causas actúan de manera independiente?
3. Consecuencias de que ocurra el evento: ¿Cómo se puede desarrollar el evento?, ¿Cuáles son las potenciales consecuencias?
4. Controles para evitar que ocurra el evento: ¿Cómo se puede prevenir la liberación del peligro?, ¿Cómo se mantiene el control?
5. Controles para mitigar las consecuencias o medidas de recuperación: ¿Cómo se puede limitar la severidad del evento?, ¿Cómo se pueden minimizar los efectos?

Figura 21.

Esquema Bowtie.



Nota. Adaptado de Cuevas, C. (2014). Gerencia HSEC taller de bowtie. Recuperado de: <https://www.slideshare.net/CarlosCuevaGallegos/264256638-metodobowtie>.

Con 5 elementos principales anteriores se tiene un desarrollo general del Bowtie, sin embargo, es posible agregar 5 elementos adicionales en desarrollo con el fin de hacer el modelo lo más completo posible:

1. Factores de escalamiento: son todas las causas por las cuales una barrera puede fallar o perder su efectividad este responde a las preguntas ¿Cómo pueden los controles de causas y medidas de recuperación fallar?, ¿Cómo puede ser minimizada su efectividad?

2. Control de los factores de escalamiento: responde a la pregunta ¿Cómo se puede evitar el efecto de los factores de escalamiento?

3. Evaluación de la efectividad: responde a las preguntas ¿Cuán a menudo no funciona la barrera?, ¿Cuán confiable es la barrera?, ¿Es independiente?, ¿Qué tan independiente es del factor humano?

4. Evaluación de la aceptación: responde a las preguntas ¿Las barreras proveen el control adecuado de las causas y las consecuencias?

5. Encargado de la barrera: es posible en la metodología agregar que departamento y que profesional son los encargados de correcto funcionamiento de los distintos controles.

6.4 Tripod Beta

Tripod Beta es un método para analizar incidentes en paralelo con investigación, (Energy Institute London, 2015). Se utiliza principalmente para incidentes complejos de alto riesgo, ya que

es un método muy extenso y detallado. Es un diagrama causal que modela la secuencia del accidente directo, las barreras que deberían haber estado en su lugar y las razones por las cuales las barreras no funcionan.

Un árbol tripod Beta se construye en tres pasos. El primer paso es hacer la pregunta: "¿qué pasó?". Todos los eventos que ocurrieron en el incidente se enumeran como una cadena de eventos. El siguiente paso es identificar las barreras que no pudieron detener esta cadena de eventos. La pregunta que se hace en este paso es: "¿Cómo sucedió?". Cuando se identifican todos los eventos y las barreras fallidas en el medio, se analiza la razón del fracaso de estas barreras. La última pregunta para este paso es: "¿Por qué sucedió?". Para cada una de las barreras fallidas se identifica una ruta de causalidad.

Dentro de los beneficios de usar tripod Beta están:

- Es un proceso riguroso, sistemático y minucioso;
- El proceso se puede auditar y es probable que dos investigadores diferentes lleguen a los mismos hallazgos;
- La representación visual del tripod Beta ayuda a tener una mejor comprensión, promover ideas y sugerir líneas para futuras investigaciones;
- El proceso reduce el tiempo y el esfuerzo en la investigación y el análisis de incidentes, ya que el análisis continuo proporciona dirección para la investigación.

6.4.1 Terminología del método tripod beta.

En el diagrama tripod beta se encuentran distintos elementos con los cuales se desarrolla la misma:

Objeto: Corresponde a aquel elemento que existe y es afectado por un peligro, el cual hace que se alteren sus condiciones y lo obliga a cambiar parcial o totalmente.

Agente: Representa un cambio, un factor de alteración de las propiedades del objeto. Tiene las propiedades y las condiciones para cambiar, perjudicar o dañar al objeto sobre el que actúa. En este elemento se encuentran ubicados los peligros.

Evento: Es el acontecimiento causado como resultado del cambio de estado del objeto que fue afectado negativamente por el agente.

Barreras: Son todas las acciones preventivas que habían sido contempladas y analizadas al momento de la planeación de la perforación con el objetivo de prevenir la materialización de los peligros. Las barreras son esenciales para el desarrollo de la metodología pues a través de estas el investigador entenderá como se pudo haber evitado el evento y lo conducirá a la causa raíz del incidente.

En el modelo las barreras son divididas en dos:

- **Barreras de control:** son las barreras que se encontraban presentes en el lugar donde fueron contempladas en el momento de la planeación pero que fallaron al realizar su función de prevenir y controlar el peligro una vez se presentó. La posición de estas barreras en el diagrama es entre el agente y el evento, a partir de ellas se desarrolla la ruta del método tripod beta en busca de la causa raíz.
- **Barreras de defensa:** son las barreras que debieron haber estado en el lugar de la exposición del peligro, pero por alguna razón no se encontraban ahí para impedir que el objeto se viera afectado. La posición de estas barreras en el diagrama es entre el objeto y el evento, así mismo es posible desarrollar la ruta del método tripod beta en busca de la causa raíz

Causas: son todas aquellas condiciones, parámetros o hechos que hicieron que las barreras fallaran. El método contempla tres tipos de causas en una “ruta” y son las siguientes:

- Causa inmediata: representa la razón por la cual la barrera fue vencida, ya sea por una acción, omisión o suceso ocurrido en un momento determinado, también son conocidas como fallas activas.
- Precondición: corresponde al contexto en el que se desarrolla el evento situacional el cual influye directamente en la ocurrencia de la causa inmediata.
- Causa raíz: son deficiencias o anomalías que dan lugar a la ocurrencia de la causa inmediata generando las fallas de las barreras. Se caracterizan porque han estado presentes en la operación antes de que cualquier secuencia de incidentes se reconocida, es decir, antes de que las barreras fallen o de que se generen las precondiciones. Encontrar la causa raíz es el objetivo para poder corregir y evitar a futuro que se repitan los mismos eventos.

6.4.2 Procedimiento del método tripod beta.

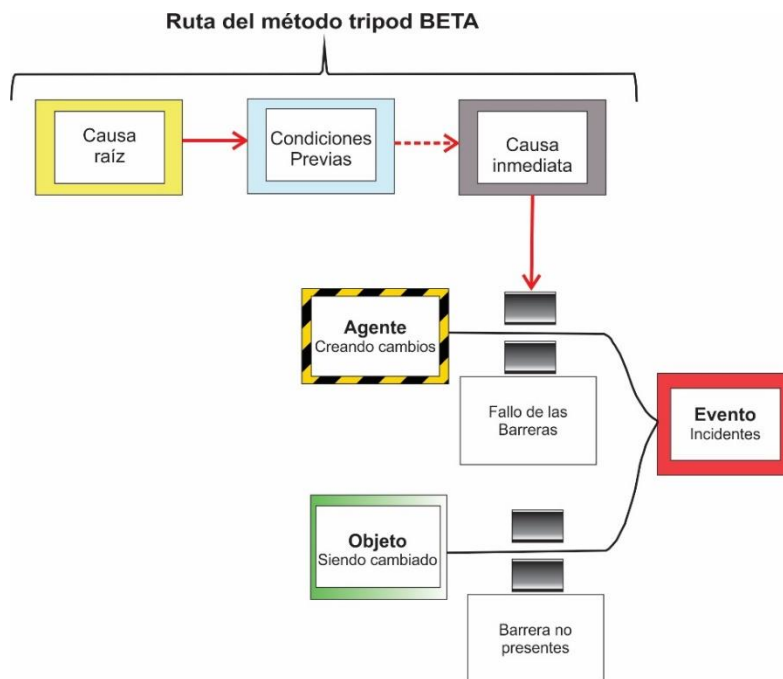
1. El primer paso para el desarrollo del método es responder la pregunta ¿Qué pasó?, al responder esta pregunta deben identificarse el objeto, el agente y el evento. Considerando que para un mismo objeto pueden haber más de un evento y un agente.

2. Realizar la pregunta ¿Por qué pasó?, el objetivo de este paso es determinar los tres tipos causas contempladas en la ruta del método. En este paso se sugiere recurrir a métodos de análisis de causa raíz como apoyo complementario.

3. Realizar el paso número 4 para cada una de las barreras hasta encontrar todas las posibles causas raíz

Figura 22.

Procedimiento tripod Beta.



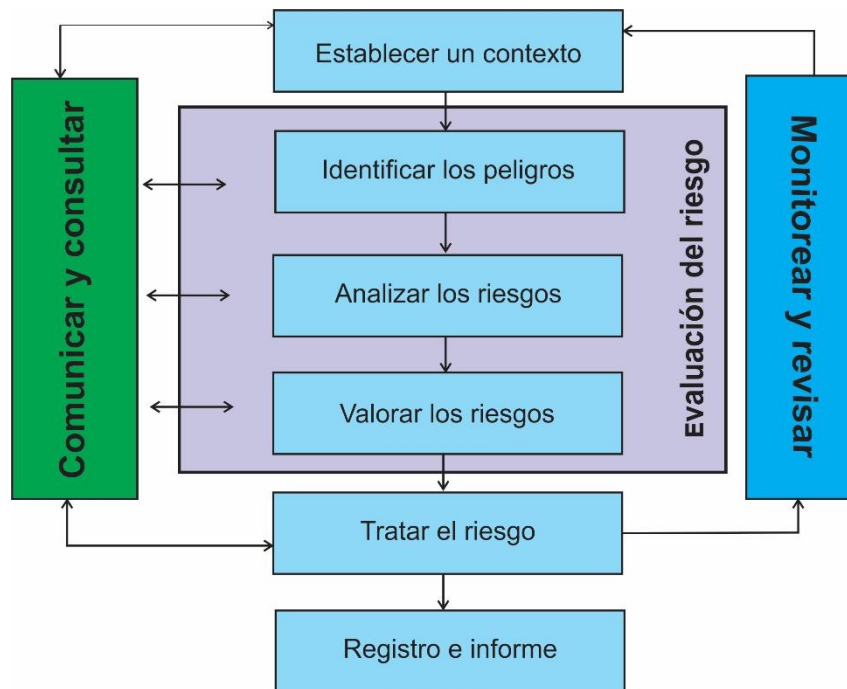
Nota. Adaptado de Energy Institute London. (2015). Guidance on using tripod beta in investigation and analysis of incidents, accidents and business losses.

7. Criterios para la selección de metodologías de análisis de riesgo

El análisis de riesgos es un proceso metódico que se encuentra dividido en diferentes etapas, dicho proceso por lo general involucrara dos o más metodologías para su desarrollo. Según la norma ISO 31000:2018 son las siguientes:

Figura 23.

Etapas del análisis de riesgos.



Nota. Adaptado de NSAI standards. (2019). Risk management – risk assessment techniques.

1. Establecer un contexto: El propósito del establecimiento del alcance, contexto y criterios es adaptar el proceso de la gestión del riesgo, para permitir una evaluación del riesgo eficaz y un tratamiento apropiado del mismo. El alcance, el contexto y los criterios implican definir el alcance del proceso, y comprender los contextos.

2. Identificación del riesgo: El propósito de la identificación del riesgo es encontrar, reconocer y describir los riesgos que pueden ayudar o impedir a una organización lograr sus objetivos. Para la identificación de los riesgos es importante contar con información pertinente, apropiada y actualizada.

3. Análisis del riesgo: El propósito del análisis del riesgo es comprender la naturaleza del riesgo y sus características incluyendo, cuando sea apropiado, el nivel del riesgo. El análisis del riesgo implica una consideración detallada de incertidumbres, fuentes de riesgo, consecuencias, probabilidades, eventos, escenarios, controles y su eficacia.

Teniendo en cuenta que un mismo evento puede tener múltiples causas y consecuencias y puede afectar a múltiples objetivos.

4. Valoración del riesgo: El propósito de la valoración del riesgo es apoyar a la toma de decisiones e implica comparar los resultados del análisis del riesgo con los criterios del riesgo establecidos para determinar cuándo se requiere una acción adicional.

5. Tratamiento del riesgo: El propósito del tratamiento del riesgo es seleccionar e implementar opciones para abordar el riesgo. El tratamiento del riesgo implica un proceso iterativo de:

- Formular y seleccionar opciones para el tratamiento del riesgo;
- Planificar e implementar el tratamiento del riesgo;
- Evaluar la eficacia de ese tratamiento;
- Decidir si el riesgo residual es aceptable;
- Si no es aceptable, efectuar tratamiento adicional.

6. Seguimiento y revisión: El propósito del seguimiento y la revisión es asegurar y mejorar la calidad y la eficacia del diseño, la implementación y los resultados del proceso. El seguimiento continuo y la revisión periódica del proceso y sus resultados debería ser una parte planificada del proceso de la gestión del riesgo, con responsabilidades claramente definidas. El seguimiento y la revisión deberían tener lugar en todas etapas del proceso, incluyendo planificar, recopilar y analizar información, registrar resultados y proporcionar retroalimentación.

7. Comunicación y consulta: El propósito de la comunicación y consulta es asistir a las partes interesadas pertinentes a comprender el riesgo, las bases con las que se toman decisiones y las razones por las que son necesarias acciones específicas. La comunicación

busca promover la toma de conciencia y la comprensión del riesgo, mientras que la consulta implica obtener retroalimentación e información para apoyar la toma de decisiones. Una coordinación cercana entre ambas debería facilitar un intercambio de información basado en hechos, oportuno, pertinente, exacto y comprensible, teniendo en cuenta la confidencialidad e integridad de la información, así como el derecho a la privacidad de las personas.

8. Registro e informe: El proceso de la gestión del riesgo y sus resultados se deberían documentar e informar a través de los mecanismos apropiados. El registro e informe pretenden:

- Comunicar las actividades de la gestión del riesgo y sus resultados a lo largo de la organización;
- Proporcionar información para la toma de decisiones;
- Mejorar las actividades de la gestión del riesgo;
- Asistir la interacción con las partes interesadas, incluyendo a las personas que tienen la responsabilidad y la obligación de rendir cuentas de las actividades de la gestión del riesgo.

Los criterios para seleccionar las metodologías de análisis de riesgo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5.

Criterios de selección de metodologías.

Criterio	Descripción	Indicador
Aplicación	Como es usada la técnica en la evaluación de riesgos	Análisis iniciales y generar contexto. Identificación de riesgos

Criterio	Descripción	Indicador
		Determinación de fuentes, causas y conductores de riesgos. Analizar barreras de control. Entendimiento de consecuencias y probabilidades.
Información inicial requerida	La cantidad de información requerida para usar la metodología.	Alta, media, baja
Nivel de experticia	Experticia requerida para hacer uso de la metodología	Alta: requiere entrenamiento significativo y especialistas. Media: Requiere poco entrenamiento. Baja: Es intuitivas.
Cualitativo-Cuantitativo-Semicuantitativo	¿Qué tipo de metodología es?	Cualitativo Cuantitativo Semicuantitativo
Esfuerzo aplicado	Tiempo y costos requeridos	Alto, medio, bajo
Aplicabilidad en la evaluación del riesgo	Nivel de aplicabilidad en la evaluación del riesgo	Muy aplicable: MA Aplicable: A No aplicable NA:

Nota: Adaptado de *Adaptado de NSAI standards. (2019). Risk management – risk assessment techniques.*

Se realizó una comparativa entre las distintas metodologías presentes en los capítulos 3 y 4 teniendo en cuenta los criterios mencionados en la Tabla 5, basados en las normas ISO 31000 e ISO 31010. Esta comparativa se encuentra en el Anexo A. El objetivo de la comparación de las

distintas metodologías es orientar y facilitar su uso según sea la necesidad. Considerando que quien realice el análisis determinará cada uno de los criterios para la situación en particular.

8. Accidentes comunes registrados en las operaciones costa fuera

Alrededor del mundo existen países con gran desarrollo histórico en la exploración y explotación de hidrocarburos en operaciones costa afuera, lo que les ha permitido recolectar información de los distintos tipos de accidentes, incidentes o problemas menores que pudieran haber ocurrido.

Existen diferentes bases de datos como:

SINTEF: Es una base de datos especializada en la evaluación de riesgos de distintos eventos de blowouts que han ocurrido desde 1955 en el Golfo de México, el Mar del Norte y la Plataforma Continental Noruega.

OREDA: Es una base de datos perteneciente a SINTEF la cual está especializada en el análisis de riesgos y fallos de equipos y maquinas en las plataformas de explotación y exploración

Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE): Es la agencia federal de Estados Unidos encargada de promover la seguridad en el trabajo, proteger el medio ambiente y conservar recursos offshore a través de regulaciones y vigilancia. Cuenta con una base de datos con registro de distintos incidentes registrados en el Golfo de México, Alaska, el Pacífico y la plataforma continental exterior.

Health and Safety Executive: Es una entidad reguladora independiente de Reino Unido la cual posee una base de datos de accidentes laborales presentados en las operaciones costa afuera del país.

International Association of Oil & Gas Producers: Es una asociación global que busca mejorar la seguridad, proteger el medio ambiente y el desarrollo social. Así como compartir el conocimiento y buenas prácticas para lograr mejores condiciones de trabajo sanas, seguras, responsables con el medio ambiente, y socialmente responsables.

Estas son algunas de las bases de datos de las cuales se puede acceder más fácilmente a la información, así que serán las tenidas en cuenta para el desarrollo de la investigación.

A través de la recolección de información de distintas bases de datos se realizó la Tabla 6 donde se reportan los principales tipos de eventos que ocurren en las operaciones offshore y las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 donde se reportan los equipos y maquinas que se encuentra normalmente en las instalaciones costa afuera que pueden ser útiles en algunas metodologías donde sea necesario analizar los equipos y maquinarias involucradas en procesos de las operaciones comunes de las actividades de exploración y explotación.

Tabla 6.

Eventos no deseados en operaciones costa afuera.

N°	Tipo de Evento	Detalles
1	Problemas de anclaje	Problemas relacionados con líneas de anclaje, dispositivos de amarre, cabestrantes y “fairleads”
2	Blowout	Flujo no controlado de gas, aceite u otro fluido proveniente del yacimiento de la cual se pierde el control

N°	Tipo de Evento	Detalles
3	Zozobramiento	Pérdida de la estabilidad que puede generar desplazamientos o movimientos rotacionales a causa de las condiciones climáticas
4	Colisión	Contacto accidental entre plataformas offshore y embarcaciones u otras plataformas
5	Grúa	Cualquier incidente relacionado con el uso de grúas
6	Explosión	Cualquier tipo de incidente que se genere por una explosión
7	Caída de objetos	Peligros relacionados con las caídas de objetos desde que cualquier superficie en la plataforma o hacia el mar
8	Fuego	Cualquier tipo de incidente que se genere por la aparición de fuego en la plataforma
9	Hundimiento	Hundimiento o pérdida de boyancia de una unidad
10	Helicóptero	Accidentes relacionados con helicópteros
11	Filtraciones	Filtración de agua en las plataformas, embarcaciones o compartimientos que puedan generar la pérdida potencial de la boyancia o problemas de estabilidad
12	Escora	Inclinación no controlada de la unidad
13	Sistemas de propulsión	Problemas relacionados con los sistemas de propulsión
14	Unidad fuera de posición	Unidad que se encuentra fuera de la posición esperada o derivando fuera de control
15	Derrame	Liberación de material contaminante causados por las plataformas o embarcaciones relacionadas con los procesos de la industria petrolera
16	Estructural	Ruptura o fallas por fatiga la unidad estructural o sus soportes
17	Heridos o Fallecimientos	Accidentes que puedan generar en los trabajadores fracturas, laceraciones, contusiones, dislocaciones, amputaciones, pérdidas del conocimiento o algún otro daño al trabajador que necesiten de atención médica y en el peor de los casos la muerte.

N°	Tipo de Evento	Detalles
18	Exposición química	Contacto o exposición con sustancias químicas que pongan en riesgo la salud de los trabajadores
19	Riesgo biológico	Afectación de la salud de los trabajadores por afecciones biológicas como virus, bacterias y otros
20	Remolcamiento	Incidentes relacionados con el transporte de unidades flotantes tirando de ellas
21	Clima	Todo evento que haya sido provocado por las condiciones climáticas presentes en la locación
22	Ductos	Incidentes relacionados con tuberías que transportan fluidos y sus accesorios
23	Tanques de almacenamiento	Incidentes relacionados con tanques de almacenamientos o recipientes cerrados
24	Sistemas de monitoreo, control, detección y cierre	Eventos generados por la falla en sistemas de monitoreo, control, detección y cierre de accionamiento automático en presencia de amenazas
25	Caída de Risers o pipeline	Incidentes en el cual el riser o pipeline caen a fondo, se desprenden o sufren algún tipo de daño
26	Transporte	Incidentes generados durante las actividades de transporte de tierra a plataforma
27	Atentados y sabotajes	Todo acto provocado por terceros de forma malintencionada que genere riesgos potenciales y vulnere las barreras de defensa de cualquier tipo de sistema o procesos

Tabla 7.

Falla en los Equipos de cubierta para los Sistema de Maquinaria.

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
Compresores	Centrífugos	Lectura anormal del instrumento
	Turbinas	
	Reciprocantes	Ruptura

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
	Tornillo	producción errática
	Aeroderivada	Fugas externas o internas
	Industrial	Falla para iniciar a demanda
	Centrifugas	Falla para detenerse a demanda
	Reciprocantes	producción demasiado alta o baja
	Rotativa	Problemas menores
Turbinas de gas	Aeroderivada	Ruido
	Industrial	Recalentamiento
Bombas	Centrifugas	Detenimiento repentino
	Reciprocantes	Deficiencias estructurales
	Rotativa	Vibración
Motores de combustión	Gas	Desviación de los parámetros
	Diesel	
		Lectura anormal del instrumento
	Funciones combinadas	Ruptura, Vibración
Turboexpander		producción errática
		Fugas externas o internas
	Procesamiento de gas	Falla para iniciar a demanda
		Problemas menores
	Tratamiento de gas	Detenimiento repentino
		Problemas menores

Tabla 8.

Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos eléctricos

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
Generadores eléctricos		Lectura anormal del instrumento
		Ruptura
	Conducidos por motor	Falla en la frecuencia de salida*

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
		Falla al sincronizar*
		Falla para iniciar a demanda
		Falla para detenerse a demanda
		Falla en el voltaje de salida*
	Conducidos por turbinas	Problemas menores
		Ruido
		Recalentamiento
		Detenimiento repentino
		Deficiencias estructurales
Motores eléctricos	Compresores	Vibración
		Desviación de los parámetros producción errática
		Fugas externas o internas
	Bombas	producción demasiado alta o baja

Nota: Los tipos de fallo con asterisco (*) solo pertenecen a los generadores eléctricos

Tabla 9.

Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos Mecánicos

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
		Lectura anormal del
	Fin fan.	instrumento
		Transferencia de calor
	Platos compactos.	insuficiente
Intercambiadores de calor	Platos convencionales.	Fugas externas o internas
	Tubos y corazas	Problemas menores
	Calentadores a fuego directos.	Deficiencias estructurales
Calentadores y hervidores	Calentadores / hervidores eléctricos.	Taponamiento

	Calentadores a fuego indirectos.	Desviación de los parámetros* Recalentamiento*
	Coalescedores	
	Contactor	Lectura anormal del instrumento
	Columna de destilación	Transferencia de calor insuficiente
	Tanques de destilación flash.	Fugas externas o internas
	Hidrociclones.	Problemas menores
	Scrubbers.	Deficiencias estructurales
	Separadores.	Taponamiento
	Strippers.	Desviación de los parámetros
Vessels	Surge tanks.	

Nota: Los tipos de fallo con asterisco (*) solo pertenecen a calentadores y hervidores

Tabla 10.

Falla en los Equipos de cubierta para los Sistemas de equipos de control y seguridad.

Clase de equipo	Subclase	Tipos de fallo
Detectores de fuego y gas	Flama.	Lectura anormal del instrumento
	Detectores de H ₂ S.	Falla para funcionar a demanda
		Lecturas demasiado altas o bajas
	Calor.	Lecturas no identificadas
		Problemas menores
	Gases hidrocarburos.	No se registran lecturas
Activación de alarmas de alto nivel repentina		
Humo.	Activación de alarmas de bajo nivel repentina	
	Operación repentina	

Medidores de procesos	Flujo.	Mediciones erráticas
	Nivel.	Falla para funcionar a demanda
	Presión.	Mediciones muy altas o bajas
	Temperatura.	Problemas menores
Válvulas	Bola.	Lectura anormal del instrumento
	Mariposa.	Retraso en su activación
	Cheque.	Fugas externas o internas
	Diafragma.	Falla para regular
		Falla para abrir a demanda
		Falla para cerrar a demanda
	Compuerta.	Problemas menores
	Globo.	Taponamiento
	Activación repentina	
	Deficiencias estructurales	
	Alivio de presión.	Filtraciones con válvulas cerradas

Tabla 11.

Falla en los equipos submarinos.

Clase de equipo	Tipos de fallo
Sistema de control	Lectura anormal del instrumento
	Fugas externas o internas
	Lecturas erráticas
	Falla para funcionar a demanda
	Fallas durante su funcionamiento
	Perdida de redundancia
	Efecto no inmediato
	Cortocircuito
Activación repentina	
Manifold	Fugas externas o internas

Clase de equipo	Tipos de fallo
	Fallas para cerrar y bloquear Falla para abrir y desbloquear Filtraciones en posiciones cerradas Efecto no inmediato Activación repentina
Sistema de asilamiento submarino	Operaciones con retraso Efecto no inmediato Falla para controlar
Riser	Fugas externas Fallas estructurales
Wellhead y X-mas tree	Fugas externas o internas Pérdida de redundancia Efecto no inmediato Fallas para cerrar y bloquear Falla para abrir y desbloquear Filtraciones en posiciones cerradas Pérdida de barreras Taponamiento Fallas estructurales Activación repentina

8.1 Principales Factores que Generan Incidentes en Operaciones Costa Afuera

Teniendo en cuenta los eventos que causan incidentes en las operaciones costa afuera y los equipos que se ven afectados en los mismos, se logra identificar seis principales factores que generan accidentes. Los factores se presentan a continuación:

8.1.1 Factores Meteorológicos.

Las plataformas en operaciones costa afuera se ven sometidas a condiciones meteorológicas adversas y cambiantes, es de mucha importancia al seleccionar las plataformas y diseñar los risers tener en cuenta el viento, las olas, la marea, las corrientes acuáticas, las temporadas de tormentas e incluso huracanes en las zonas de instalación. De estas condiciones dependerán características como la capacidad de carga, el área de cubierta, el sistema de anclaje, de posicionamiento y el comportamiento que pueda presentar la plataforma en interacción con las distintas fuerzas que actuarán sobre la misma, así como su resistencia y durabilidad.

Según Rodríguez, Martínez y Gil (2011) las variables oceanográficas y meteorológicas claves para toda actividad costa afuera, así como sus aspectos descriptivos relevantes son las siguientes:

- Profundidad de la columna de agua: mareas y marejadas, datum mareal.
- Viento: perfiles, intervalos promedios y espectros de la velocidad y dirección.
- Oleaje: espectro direccional, altura, periodo y cinemática.
- Corrientes: perfiles, promedios de dirección, velocidad, análisis espectral
- Otros parámetros: tsunamis, seiches, hielo marino, nieve, temperatura del agua, salinidad.

8.1.1.1 Clima. Los distintos proyectos y operaciones costa afuera representa una gran inversión económica, así como un nivel de complejidad alto. Estos pueden ser interrumpidos por condiciones climáticas que ponen en peligro la seguridad del personal o de las instalaciones, generando tiempos no productivos e incrementando el valor final del proyecto. Un mal estudio y

una fallida predicción del clima puede generar problemas como sobrecostos, daños estructurales, detención total de operaciones, el hundimiento de la plataforma e incluso poner en riesgo la vida de los trabajadores.

En la actualidad se usan diferentes métodos probabilísticos para la predicación de las condiciones climáticas unos enfocadas a encontrar ventanas de climas tranquilos, que son periodos de tiempo en los cuales las condiciones climáticas, históricamente, permitirán trabajar de manera eficiente y segura. Otras, enfocadas en los análisis históricos de los metadatos oceánicos totales o parciales, y su influencia en los movimientos que generan en las plataformas y embarcaciones para generar los límites de operabilidad.

En etapas iniciales de un proyecto costa afuera las predicciones climatológicas ayudarán en la toma de decisiones tempranas, así como para la realización de planes de acción preventivos; con estos se reducirán los tiempos no productivos generados por cambios abruptos del clima y permitirá la instalación óptima de los equipos en fases tempranas del proyecto.

8.1.1.2 Vientos. Los vientos son movimientos de aire presente en la atmósfera, este movimiento es horizontal y se debe a las diferencias de presión atmosférica las cuales se atribuyen a diferencias de temperatura, que a su vez se deben, en gran medida, a la desigualdad de calentamiento solar y a las propiedades térmicas de la superficie oceánica.

Según Baker (1998), la diferencia entre la temperatura y la presión en diferentes puntos sobre la tierra provoca que el aire presente dos densidades y por lo tanto el movimiento de la masa de gases es en dirección hacia la zona menos presionada, otros factores que afectan este movimiento son el efecto Coriolis, las fuerzas de flotabilidad y de fricción y la configuración del relieve.

Debido a la rotación de la tierra todo lo que se mueve en su superficie no sigue una línea recta, sino que tiende a girarse en alguna dirección, esto se conoce como el efecto de Coriolis. El efecto es muy leve para sentirlo cuando se camina o se transportan un carro, pero significativa en distancias grandes. Esta desviación afecta el curso de los vientos y las corrientes. La desviación es hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda hemisferio sur.

En las operaciones costa afuera es de vital importancia conocer las características de los vientos para realizar pronósticos del tiempo y planes de emergencia.

8.1.1.3 Mareas. El termino marea está definido como el ascenso y descenso periódico de todas las aguas oceánicas. Al igual que las fuerzas gravitacionales que la tierra ejerce sobre cualquier punto que se encuentre cerca de ella, el sol y la luna ejercen de igual forma, fuerzas gravitacionales de atracción sobre estos mismos cuerpos. Por lo tanto, el manto de agua terrestre sentirá los efectos gravitacionales del sol y la luna presentando un cambio periódico en el nivel del mar el cual dependerá de qué tan cercanos estén con respecto a alguno de estos dos astros.

El conocimiento del movimiento de las mareas es de vital importancia al momento de selección de las plataformas y el diseño de risers.

8.1.1.4 Oleaje. Una ola es una onda que se propaga por la superficie de los mares y océanos. Son ondas mecánicas o perturbaciones del medio material (agua), que se propagan por la interfase, en este caso el límite de la atmósfera y el océano. El viaje de estas ondas que a su vez presentan grandes cantidades de energía, puede ser acompañado por el movimiento de grandes masas de agua producto del arrastre propio que provoca. Es decir, el oleaje es provocado por el

viento, principalmente por la fricción que existe entre el movimiento de éste con respecto a la superficie del agua.

El oleaje va directamente relacionado con los vientos por lo cual es de suma importancia el conocimiento del comportamiento histórico del mismo para poder así tener un mecanismo de acción preparado ante cualquier alteración anormal de estos dos factores.

8.1.1.5 Corrientes Marinas. Las corrientes marinas son causas por las altas mareas del océano los ríos y los arroyos que fluyen en mares abiertos las altas corrientes pueden alcanzar hasta los 5 nudos, haciendo las operaciones de perforación costa afuera más complejas.

Las operaciones de perforación son afectadas por altas corrientes de superficie, las cuales dificultan la realización de las operaciones de perforación offshore. Las dificultades que se plantean son las siguientes (Chevron, 2007):

- Grandes desviaciones en el riser y en el drill pipe o tubería de perforación aumentando los ángulos de funcionamiento.
- Las vibraciones causadas por el vórtice que pueden causar fracturas debido a la tensión el riser por el casing.

8.1.2 Factores Mecánicos.

Las plataformas costa afuera están compuestas por un sin número de estructuras y equipos mecánicos los cuales no están exentos a presentar fallas, al presentarse una falla en un equipo, se ve en riesgo toda la operación que se estén realizando en el momento, así como también las personas que estén cerca u operando el mismo. El fallo de un equipo puede generar accidentes que

traen consigo desde el aumento de los tiempos no productivos hasta la muerte de algún tripulante de la plataforma.

A continuación, se presentan una breve descripción de los sistemas y equipos presentes normalmente en una operación costa afuera:

8.1.2.1 Equipos de superficie. las instalaciones de diferentes equipos en operaciones costa afuera son muy parecidos a los utilizados en tierra firme. Normalmente están compuestos por 5 sistemas que son:

- Sistema de elevación. Está compuesto por una estructura rígida de soporte y un equipo de elevación. Como su nombre lo indica su principal función es sostener, descender y elevar la sarta a medida que se va perforando el pozo. Este sistema consta de un mástil, la plataforma de la torre o encuelladero, la base de la torre, el bloque corona y el bloque viajero.
- Sistema de rotación. Tiene dos funciones generales, la primera es generar el movimiento de rotación a la sarta y la segunda suministrar el peso necesario sobre la broca para llevar a cabo la perforación del pozo. Está compuesto por equipos como la swivel, top drive, tubería de trabajo, collares de perforación, y la broca.
- Sistema de circulación. Es la línea o medio de transporte del fluido de perforación. Provee los equipos necesarios para la preparación, acondicionamiento y circulación del lodo. Los equipos presentes en este sistema son: tanques de succión, depósitos, bombas de lodo, líneas de descargue y regreso, el tubo parado (stand pipe), tanques de asentamiento, zarandas, desarenador y tanques de reserva.
- Sistema de potencia. Este sistema es considerado el núcleo de todas las operaciones en la plataforma. Este sistema genera el poder o la energía para que los demás

sistemas puedan funcionar correctamente. Los equipos utilizados son: motores primarios, motores de vapor, motores Diesel y motores eléctricos.

- Sistema de prevención. Cuando se perfora una zona de altas presiones y que contiene posiblemente hidrocarburos, se realizan varias operaciones con el fin de evitar que fluidos del yacimiento ingresen en el pozo. Sin embargo, en muchas ocasiones, la presión hidrostática de la columna del lodo de perforación es insuficiente para contrarrestar y balancear la presión de la formación. Esto genera que los fluidos presentes en el yacimiento repentinamente entren al pozo y se provoque una erupción violenta en superficie de los fluidos contenidos en la formación; generando como resultado grandes desastres y pérdidas tanto de los equipos como vidas humanas. Este fenómeno es conocido como “reventón”. Los equipos que conforman este sistema son: preventoras o BOPs (blow out preventor steak), preventor anular, el acumulador, línea de matar, múltiple de estrangulamiento, grúa, botes salva vidas y equipos contra incendios.

8.1.2.2 Equipos de Fondo. Son todas aquellas instalaciones que se encuentran sumergidas en el mar con el propósito de mantener en contacto el lecho marino y la plataforma. Cualquier fallo que se presenten en estos equipos pueden generar accidentes de grandes proporciones dado que el control y el mantenimiento de estos son más lentos que en equipos de superficie.

Los equipos de fondo con los que cuentan una plataforma son entre otros la base guía temporal y la base guía permanente que son utilizadas en para asentar el cabezal de pozo y como guía para bajar herramientas de perforación, las líneas de guía que se usan para transportar los equipos hasta el fondo del lecho marino para realizar las operaciones de instalación, el cabezal de pozo marino el cual es diseñado para soportar cargas de tensión de tubería suspendida y para tener

la capacidad de sellar a presión, las preventoras marinas las cuales son encargadas de sellar, controlar y monitorear los pozos y el riser marino de perforación que es un conducto instalado entre la plataforma y el pozo para a través del él correr herramientas y circular el lodo de perforación.

8.1.3 Factores Geológicos.

Dado al poco estudio que se tiene hoy en día de la geología marina y de las cuencas offshore en Colombia es muy probable que durante las operaciones costa afuera se presenten incidentes, a continuación, se muestran algunos factores que podrían generar sucesos anormales.

8.1.3.1 Gas somero. Hace referencia a bolsas de gas que se encuentran muy cercanas al lecho marino las cuales constituyen un alto riesgo en la etapa de perforación. Este gas se puede detectar antes de la perforación, justamente durante la etapa de evaluación del lecho marino utilizando sísmica somera (0 a 500m).

8.1.3.2 Hidratos de Gas. Son sustancias químicas que se dan en forma de hielo y están compuestas generalmente por gases livianos como metano, etano y otros, enjaulados en moléculas de agua; y se forman generalmente a condiciones de altas presiones y bajas temperaturas (cerca al punto de congelamiento del agua).

Debido a la necesaria presencia de agua en los sistemas de perforación, como es el caso del lodo y la existencia de gas en las operaciones de perforación, se puede dar la formación de hidratos. Se pueden formar hidratos en el sistema de circulación debido al contacto que puede

existir entre el agua presente en el lodo y gas que migra al sistema cuando es perforada una zona donde hay presencia de este último.

Para operaciones costa fuera es utilizado nitrógeno presurizado en los bancos acumuladores. El sistema de preventoras, utiliza un fluido hidráulico base agua, que muchas veces entra en contacto con el nitrógeno formando hidratos. De esta manera se genera dentro del sistema de preventoras lo cual puede ser riesgoso y peligroso, aunque en la actualidad no existan estudios sobre estos acontecimientos.

8.1.3.3 Gases Ácidos. Al momento de producir hidrocarburos es muy común que junto al gas se produzcan componentes como dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrogeno (H₂S) y otros componentes del azufre como los mercaptanos. El H₂S y el CO₂ son indeseables, ya que causan corrosión y reducen el poder calorífico, el cual determina el valor en las ventas del gas. Además, el H₂S puede ser letal en pequeñas cantidades por lo cual se debe tener un estricto control al momento de producir.

8.1.4 Factores Humanos.

Alrededor del 80% de los accidentes en la industria de petróleo y gas en alta mar se atribuyen al error humano (energy live news, 2016). Según un nuevo estudio de RAND Europe, encargado por Total E&P Research and Development, los factores humanos y organizativos ahora son ampliamente reconocidos como la causa principal de los accidentes en plataformas de petróleo y gas.

Las condiciones a las cuales están expuestos los tripulantes de una plataforma hacen que sin duda alguna sean más propensos a generar un accidente. Largas jornadas de trabajo, inclemencias del clima, estar lejos de sus familias y muchas veces incomunicados son algunos de los factores que influyen para que una persona cometa errores laborales y causen un accidente.

8.1.5 Factores Geopolíticos.

La situación política por la que atraviese un país es un factor muy importante en la producción de petróleo bien sea onshore u offshore. Los conflictos bélicos pueden hacer que las operaciones en los campos paren, generando pérdidas económicas para la empresa y país. Los principales eventos no deseados que generan estos conflictos son amenazas, sabotajes y atentados.

8.1.6 Factores organizacionales.

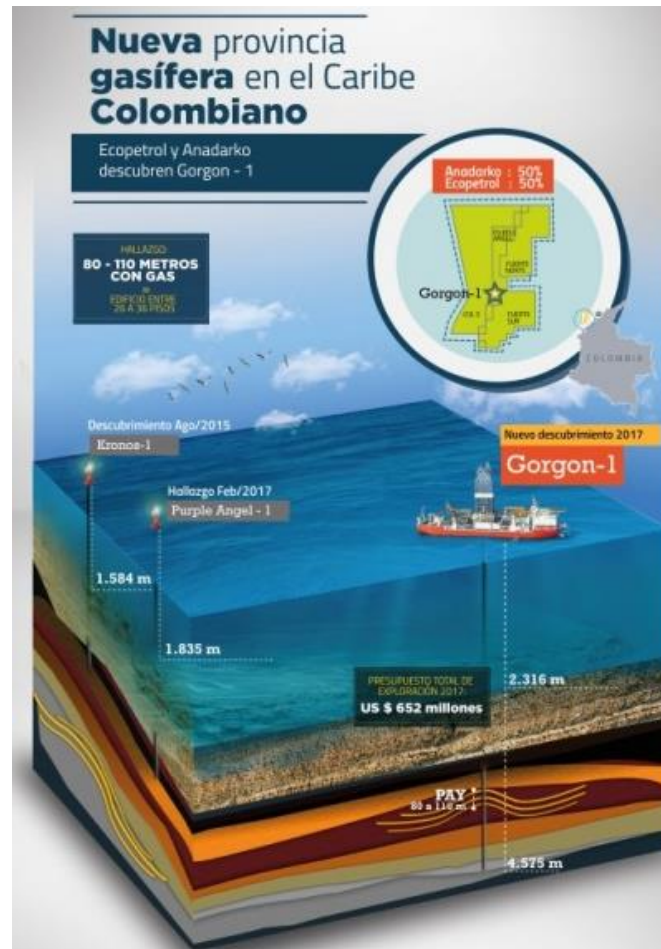
En toda organización la gerencia tiene como objetivos direccionar los procesos de planeamiento, organización, dirección y control con el fin de lograr los objetivos establecidos. Por lo cual los equipos de trabajo se verán impactados directamente cuando se seleccionan de manera erróneo los equipos de trabajo, no se identifican los objetivos de manera clara, precisa y concisa, no se brindan los recursos necesarios para la ejecución de las labores, no se realizan evaluaciones periódicas de los avances , no se establecen protocolos claros en la empresa y cuando la toma de decisiones de la gerencia es la incorrecta conduciendo a todo el equipo de trabajo a fallar en el cumplimiento de los objetivos propuestos.

9. Aplicación de metodologías a un escenario en Colombia

Para el año 2019 en Colombia se tenía una estimación de reservas de 6 años para petróleo y 11 años para gas, lo cual demuestra un panorama desalentador en el que peligra el autoabastecimiento energético, impulsados por esta necesidad el gobierno busca avanzar a escenarios de producción mar adentro. Las actividades costa afuera ya han sido realizadas en el país en el departamento de la Guajira desde los años 1969 con los campos Chuchupa y Ballena, sin embargo, desde el descubrimiento de estos campos no se habían desarrollado otro tipo de proyectos en el área hasta el 2014 donde se descubrió el pozo Orca-1 con 4243 metros de profundidad, luego en el 2015 se perforaron los pozos Kronos-1 con 3720 metros de profundidad y Purple Angle-1 con 4795 metros de profundidad. Por último, en el 2017 se perforaron los pozos Gorgon-1 con una profundidad entre los 3675 y 4415 metros y Molusco. Estos tres pozos se encuentran en bloques cercanos lo que abre la posibilidad de la existencia de una provincia gasífera en el Mar Caribe.

Figura 24.

Gas en caribe colombiano.



Nota. Tomado de Ecopetrol. (2017). Nueva provincia gasífera en Colombia.

Dado el panorama actual colombiano y tomando como caso estudio el incidente Macondo se planteó realizar dos escenarios:

1. Perforación en la costa caribe tomando como ejemplo la cuenca gasífera encontrada en las cercanías de los pozos Gorgón, Kronos y Purple Angel.
2. Blowout en actividades de perforación en la costa caribe.

Para el planteamiento de los escenarios se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Ninguna metodología abarca en la totalidad el proceso de gestión y análisis de riesgo por lo cual el correcto desarrollo de una metodología será el uso de varias.
2. No se poseen datos suficientes de actividades costa fuera, frecuencia de fallos e incidentes en Colombia para la realización de métodos cuantitativos.
3. Se recreará un escenario basado en las actividades exploratorias del pozo Gorgon-1.
4. Los escenarios buscan generar una análisis proactivo y reactivo de un incidente.
5. El segundo escenario es planteado en base al caso Macondo
6. Las metodologías para utilizar serán las que mejor abarquen las 4 etapas iniciales en el desarrollo del proceso de análisis de riesgo según la norma ISO 31000 y atiendan a necesidades específicas para el análisis durante el proceso.
7. El evento top será un Blowout con la misma secuencia de eventos relacionadas al caso Macondo.
8. El objetivo del primer escenario es identificar riesgos en actividades de perforación.
9. El objetivo en el segundo escenario es analizar un posible blowout.
10. El mar caribe presenta una gran biodiversidad que puede ser sensible a cualquier tipo de contaminación entre los municipios de Sucre y Córdoba se encuentra el Golfo de Morrosquillo, una reserva natural. Además, en los municipios circundantes al mar caribe la pesca y el turismo son actividades económicas importantes.

9.1 Desarrollo del escenario de perforación en la costa caribe

En el escenario se desarrollarán actividades exploratorias en el bloque Purple Angel específicamente en las coordenadas 09° 25' 59.282" N, 76° 44' 54.110" W (ubicación del pozo Gorgon-1), desarrollado en aguas ultra profundas con un tirante de agua de 2139 metros de profundidad. La perforación será dividida en 6 secciones alcanzando una profundidad de 4550 metros medidos desde el nivel del mar. La primera sección corresponde a un revestimiento de 36" de diámetro enterrado hasta una profundidad de 2381 m operación realizada sin riser. La segunda sección corresponde a la perforación con broca de 26" para bajar y cementar revestimiento de 22" a una profundidad estimada de 2850 m. La tercera sección se perfora con broca de 18 1/8" hasta una profundidad estimada de 3250 m, se baja y cementa revestimiento de 18". La cuarta sección se perfora con broca de 16 1/2" hasta una profundidad de 3625 m en esta sección se ubica un liner de 13 5/8". La quinta sección es perforada con broca de 12 1/4" hasta una profundidad estimada de 4020 m, se baja y cementa liner de 9 5/8". Por último, en la sexta sección se perfora con broca de 8 1/2" hasta una profundidad de 4550 m, se baja y cementa un liner de 7".

Usualmente en el mar caribe y golfo de México la temporada de huracanes se da entre los meses de junio y noviembre, según la Unidad Nacional para Gestión de Riesgos y Desastres. En el mar caribe se posee una gran cantidad de fauna y flora, entre los departamentos de Sucre y Córdoba se encuentra ubicado la reserva natural del Golfo de Morrosquillo, en general los departamentos pertenecientes a la costa caribe desarrollan actividad pesquera y turismo. Por lo cual cualquier contaminación podría generar impactos ambientales y económicos de gran magnitud.

9.1.1 Desarrollo del análisis de riesgos.

1. Definir un contexto: en la primera etapa del análisis se plantea generar un contexto usando la metodología de construcción de escenarios los cuales fueron mencionados y expuestas sus consideraciones anteriormente. Sin embargo, esta metodología es usada con la finalidad de aplicar y comparar el uso de las metodologías expuestas durante el desarrollo del trabajo. Por lo cual en esta se considera que pueden ser usadas las entrevistas, lluvia de ideas o la técnica Delphi, según las consideraciones pertinentes del equipo de gestión de riesgos y al caso particular de análisis. En este escenario se define el alcance como un análisis de riesgos proactivo básico enfocado en las actividades de exploratorias de perforación.

2. Identificar los peligros: planteado el escenario se identificaron peligros considerando algunos de los eventos comunes en el Capítulo 8 y problemas operacionales que comúnmente ocurren durante la actividad de perforación. En esta etapa la experiencia del equipo encargado del análisis de riesgo, bases de datos y experiencias de incidentes anteriores son de utilidad. Puede realizarse con metodologías utilizadas en la etapa una como la técnica Delphi o lluvias de ideas. Sin embargo, es de importancia esquematizar cada uno de los peligros de una manera clara, tal y como se exponen en la Tabla 8.

Tabla 12.

Riesgos asociados a las actividades de perforación

N°	Peligro	Detalles
1	Caída de objetos	En las actividades de perforación el uso de herramientas es algo básico, así como el trabajo en altura y la carga a través de grúas sobre la plataforma. Debido a que en el peor de los casos este evento puede causar la muerte de un trabajador es un riesgo para considerar.
2	Accidentes de helicópteros	El transporte de personal e incluso algunos equipos puede ser realizado en helicóptero. En accidente de helicóptero puede

N°	Peligro	Detalles
		dejar sobrevivientes en aguas abierta o generar una colisión con la plataforma entre otras posibilidades que ponen en riesgo la vida de las personas y las instalaciones.
3	Derrame	Durante las actividades exploratorias pueden presentarse vertimientos involuntarios de fluidos de perforación por daños en los riser, malas prácticas de tratamiento y vertimiento de los recortes o vertimientos de hidrocarburos o en caso extremo fluidos de perforación generados por un blowout.
4	Exposición química	Contacto o exposición con sustancias químicas utilizadas en las actividades de perforación que pongan en riesgo la salud de los trabajadores
5	Riesgo biológico	Afectación de la salud de los trabajadores por afecciones biológicas como virus, bacterias y otros
6	Clima	En el mar caribe y el golfo de México se presenta la temporada de huracanes entre junio y noviembre. Un huracán es un evento climático de alto riesgo para la seguridad de todo el personal y para las instalaciones. Además de los huracanes se pueden presentar fuertes tormentas tropicales las cuales pueden crear operaciones de no aptas para operar debido a los vientos fuertes, alto oleaje y condiciones climáticas muy variables.
7	Heridos o Fallecimientos	Las operaciones de la industria petrolera poseen son de alto riesgo para el personal. Por lo general el trabajo en alturas, alta presencia de equipos, pisos mojados, así como los eventos mencionados en esta tabla podrían generar heridas o fallecimientos directa o indirectamente al personal.
8	Influjo	Flujo de los fluidos desde el yacimiento al pozo

N°	Peligro	Detalles
9	Blowout	En las actividades exploratorias los riesgos de blowouts son altos y pueden generar un gran impacto en la seguridad del personal, al ecosistema y a los objetivos de la empresa.
10	Diseño de pozo	En pozos exploratorios los diseños de los pozos no siempre irán de acuerdo con lo planeado debido a la falta de información e incertidumbres puede ser posible tener que generar cambios sobre la marcha. Un diseño incorrecto de pozo puede desencadenar diferentes tipos de eventos
11	Cementación	La cementación es una de las operaciones realizadas durante la perforación, de una buena cementación depende una buena integridad de pozo. Malas prácticas o errores en estos pueden llevar a pérdidas de control de pozo y blowouts
12	Pérdidas de circulación	Pérdida del lodo que mantiene el pozo en condiciones de balance pudiendo generar influjos
13	Bolsas de gas superficiales	Es posible encontrar bolsas de gas en las etapas tempranas de la perforación las cuales pueden generar problemas operacionales, influjos o pérdida de control del pozo.
14	Falla en las BOP	Las BOP son las últimas líneas de defensa en caso de una pérdida de control de pozo ante un influjo, las fallas por problemas operacionales, falta de mantenimiento o daños durante las operaciones pueden tener desenlaces Fatales
15	Errores humanos	Toda actividad en la industria del petróleo requiere de personal altamente calificado que este entrenado para actuar ante las distintas situaciones y cumpla con las normas, protocolos y estándares de la empresa
16	Pegas de tubería	Son unos de los problemas operacionales más frecuentes en las actividades perforación en la que no es posible sacar la tubería de perforación
17	Suabeo	Condición que ocurre cuando la sarta de perforación es sacada fuera del pozo de una manera tal que crea una reducción

N°	Peligro	Detalles
		temporal de la presión del fondo, lo que puede generar influjos.

3. Analizar los riesgos: en esta etapa es posible usar varias metodologías como árbol de fallos, árbol de sucesos, Bowtie, HAZOP, Matriz de riesgo o ¿Qué pasa sí?

Se seleccionó la metodología Bowtie debido a que es la combinación de un árbol de fallas y de sucesos, es una metodología simple de aplicar y que puede ser usada desde la etapa número uno en paralelo mientras se generan ideas y se identifican los peligros, es aplicable en todas las etapas de la evaluación del riesgo, esquematiza de manera clara y sencilla, puede ser usada para análisis cualitativos y cuantitativos, permite el análisis de consecuencias y permite el análisis de las diferentes defensas presentes tanto para los peligros como para las consecuencias.

En el anexo B se encuentra el planteamiento cualitativo de la metodología Bowtie el evento top a considerar fue problemas durante la perforación para el cual se analizaron 15 amenazas y 11 consecuencias que se encuentran identificadas en las Tablas 13 y 14 respectivamente. Tratando de encontrar al menos dos barreras de protección para cada una de ellas, en algunos casos como en las pérdidas de vidas humanas, pérdida del pozo y pérdida de la plataforma se consideró que no había acciones remediadoras.

Tabla 13.

Amenazas según modelo Bowtie.

Amenazas	Medidas de Control
Caída de Objetos	HSEQ y Capacitación del personal

Amenazas	Medidas de Control
Accidentes de Helicópteros	Helicopter Underwater Emergency Training Y Further Offshore Emergency Training.
Exposición Química	Correcta Identificación de Químicos y Uso de Elementos de Protección Personal
Riesgo Biológico	Protocolos de Bioseguridad
Clima	Conocimiento de Metadatos Oceánicos, Desconexión de Riser y Evacuación
Influjo	Monitoreo del Pozo, Densidad del Lodo y Métodos de Control de Influjos
Blowouts	BOP, Stripping y Matar el Pozo
Diseño de Pozo	Cumplimiento de Normas ISO y API y Caracterización Geológica
Cementación	Norma GP 10-60, Diseño de la Lechada y Barreras Mecánicas
Perdidas de Circulación	LMC y Correcto Proceso de Revestimiento y Cementación
Bolsas de Gas Superficiales	No Aplica
Fallas en las BOPs	Mantenimiento Preventivo
Errores Humanos	Entrenamiento y Comunicación
Pegas de Tubería	Prevención y Operaciones de Liberación
Suaveo	Velocidades Controladas en los viajes

Tabla 14.*Consecuencias según modelo Bowtie*

Consecuencias	Acciones Remediadoras
Perdida de Pozo	No Aplica
Perdida de la Plataforma	No Aplica
Derrame de Crudo	Remoción Manual en las Costas, Recolección y Tratamiento, Quemados In Situ, Skimmers, Barreras de Contención y Dispersantes
Muertes	No Aplica
Daños al Ecosistema	Indemnización y Creación de un fondo Para la Restauración de los Ecosistemas, Creación de Reservas Naturales Marinas y Limpieza Manual de Flora y Fauna
Afectación Económica a las Localidades Costeras	Indemnización a las Comunidades e Industrias Afectadas
Pérdidas Económicas para la Empresa	Reestructuración de la Empresa
Afectación a la Imagen de la Empresa	Creación de Nuevas Políticas
Hidrocarburos en Superficie	Desviación de los Fluidos a través del Diverter, Quema y Venteo de gas
Ignición, Fuego y Explosión	Sistema Contra Incendios y Gas, Áreas de Clasificación

Consecuencias	Acciones Remediadoras
	Eléctrica, y Sistema de Ventilación
Tiempos no Productivos	No Aplica

4. Valoración del riesgo: para la valoración del riesgo las metodologías cuantitativas son idóneas, sin embargo, requieren una cantidad de datos iniciales considerables, además de requerir una gran cantidad de esfuerzo y experiencia para su uso, es por eso que metodologías complejas como los árboles de fallas y sucesos, la simulación Montecarlo e incluso la cuantificación del modelo Bowtie solo podrán ser aplicadas cuando se posean los tres requerimientos mencionados y el nivel de riesgo estimado al plantear el análisis cualitativo sea alto. En caso de que esas condiciones se den se planteó continuar usando la metodología Bowtie pues que ya se ha desarrollado su esquema cualitativo y en presencia de los datos permitiría cuantificarlo en función de las frecuencias relacionadas a cada peligro. En el escenario en cuestión no se poseen datos cuantificables por lo que se decidió usar la Matriz de valoración de riesgos diseñada por Ecopetrol valorando los factores de personas, ambiental y económico.

Se aplicó la metodología a 12 peligros extraídos del bowtie, la aplicación se encuentra en el Anexo C, los resultados se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Resultados de la matriz de valoración de riesgos

Código del riesgo	Riesgo	Valoración Personas	Valoración Económica	Valoración Ambiental
R01	Caída de objetos	M	NO VALORABLE	N

R02	Accidentes de helicópteros	M	L	N
R03	Derrame	N	H	H
R04	Exposición química	M	NO VALORABLE	N
R05	Riesgo biológico	L	NO VALORABLE	N
R06	Clima	L	M	N
R07	Heridos o Fallecimientos	H	NO VALORABLE	N
R08	Influjo	N	M	N
R09	Blowout	H	H	M
R10	Cementación	N	M	L
R11	Perdidas de circulación	N	H	N
R12	Pegas de tubería	N	M	N

La matriz de valoración de riesgos es una metodología semicuantitativa que permite valorar el riesgo entre, ninguno, bajo, medio, alto y muy alto. La matriz de riesgo es una herramienta útil para valorar riesgos y para realizarla se necesita haber identificados los riesgos y sus posibles consecuencias. Por lo cual es un gran complemento para la metodología bowtie en casos en que en el análisis cuantificativo no sea posible. La combinación de ambas permitirá la identificación, explicación y esquematización de los peligros y consecuencias en torno a un evento específico, así como las barreras de defensas presentes para estos y la valoración semicuantitativa de dicho evento. De una manera relativamente sencilla y bajo los estándares y factores a evaluar por una compañía permitiéndole tomar decisiones para remediar los riesgos en los casos que sean necesarios.

9.2 Desarrollo del escenario de un Blowout en la costa caribe

Para este escenario se producirá un blowout con la misma secuencia de eventos del pozo Macondo.

Una vez alcanzada la fase final de perforación se realizan las actividades de cementación del ultimo liner de 7". Durante la cementación se presentaron ciertas inconsistencias en el proceso debido a errores de comunicación y administrativos. las actividades de cementación se realizaron con 7 centralizadores de los 21 recomendados por la compañía prestadora de servicio. Por decisiones administrativas se decide no realizar la prueba cement bong logging. Sin embargo, son realizadas pruebas de presión positiva y negativa. En la prueba de presión positiva se obtuvieron resultados aceptables mientras que en la prueba de presión negativa se presentaron inconsistencias, se registraron pruebas de presión en la tubería de presión de 1400 psi sin presencia de fluido en tanques. Ante tal hecho el equipo de trabajo a través llega un consenso en que esto podía deberse a un efecto llamado compresión anular. Aceptando así la prueba sin identificar la fuente real de la inconsistencia en las presiones. Una vez terminada la prueba se procede a retirar los fluidos del pozo y comienzan las operaciones abandono de pozo. Se presenta un influjo que no es detectado si no hasta que se encuentra en el riser al activar las preventoras no se tuvo éxito para sellar el pozo con las VBR ni las BSR ante el flujo de una mezcla de fluidos de perforación e hidrocarburos se decide dirigirlo hacia el separador de gas-lado. Minutos más tarde de presentarse el blowout se presenta una explosión y hay presencia de fuego en la plataforma. No es posible recuperar el control del pozo se evacua la plataforma.

9.2.1 Desarrollo del análisis de riesgo.

Una vez un incidente ha ocurrido el papel del análisis de riesgos es entender la secuencia de eventos, sus consecuencias, que falló y como pudo haberse evitado. Para esta labor las metodologías a utilizarse son las de causa raíz. Como las metodologías de los 5 por qué, los diagramas causa-efecto, el análisis de capa de protección, el modelo del queso suizo o el Tripod beta.

En este caso se decidió utilizar la metodología tripod beta porque: es una metodología basada en el análisis de barreras de protección del modelo del queso suizo que posee intrínsecamente en su metodología el análisis causa raíz logrando así esquematizar el avance de las amenazas a través de las capas de protección que fallaron y su consecuencia de una manera detallada y rigurosa encontrando así las causas inmediatas, precondiciones y la causa raíz. Además de exponer las barreras que debieron estar presentes y no lo estaban.

Paso a paso:

1. ¿Qué pasó? en este paso se debe identificar el objeto, el agente y el evento. Basados en la información obtenida del reporte de BP y de los ocho hallazgos claves se materializaron 3 grupos de objetos, agentes y eventos.

Tabla 16.

Modelo Tripod beta Para pozo Macondo

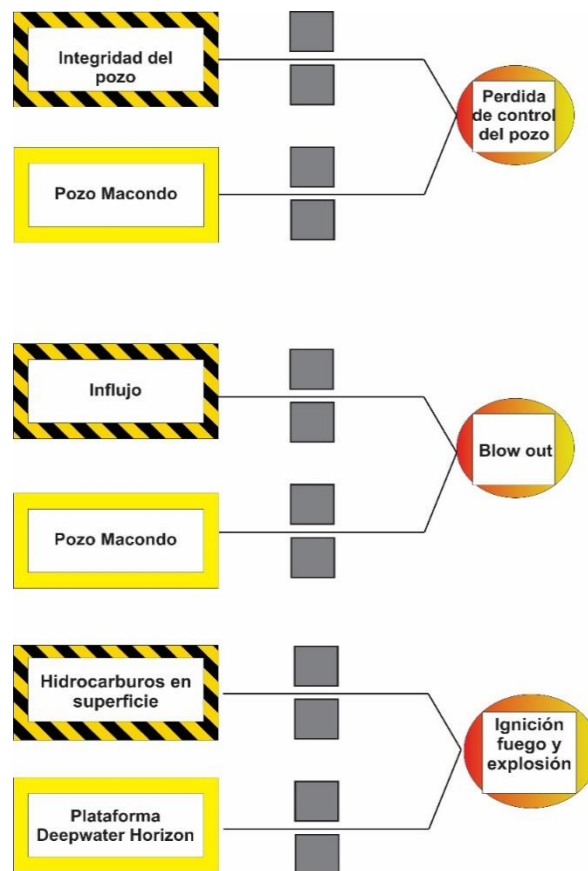
N°	Objeto	Agente	Evento
1	Pozo Macondo	Integridad del pozo	Pérdida de control del pozo
2	Pozo Macondo	Influjo	Blowout

3	Plataforma deepwater horizon	Hidrocarburos en superficie	Ignición, fuego y explosión
---	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

2. Esquematizar los tres elementos y analizar de manera global:

Figura 25.

Tripod Beta en caso de Blowout con base en caso macondo.



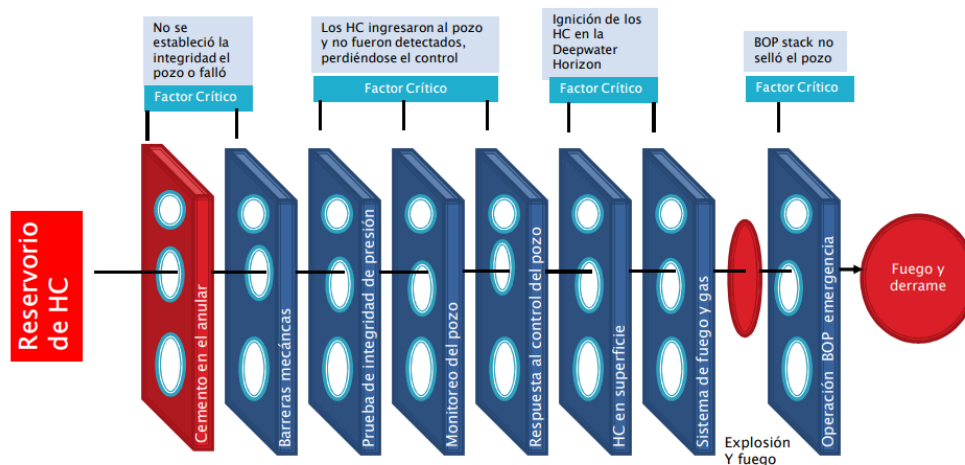
3. Realizar las preguntas ¿Cómo pasó? ¿Cuáles barreras debieron haber evitado la exposición de los objetos del peligro (agente) que ocasionó el evento? ¿Qué barreras debían haber protegido al objeto del peligro cuando este fuera inminente?

En este paso de la metodología es posible obtener apoyo de dos metodologías como lo son el modelo del queso suizo y la Bowtie. En la Figura 26, se muestra el modelo del queso

suizo para la sucesión de eventos del caso Macondo lo cual es una manera práctica y visual de responder a la primera pregunta. Para las otras dos preguntas es interesante usar la metodología Bowtie transponiendo al evento top un blowout y pudiendo analizar todas las barreras identificadas durante el análisis proactivo de riesgos, esto permitiría también retroalimentar el modelo con toda la información y análisis obtenidos del incidente para generar un análisis proactivo más confiable, esta representación se encuentra en el Anexo D, donde se identifican las barreras presentes para cada una de las amenazas.

Figura 26.

Barreras que no funcionaron y la relación de las barreras con los factores críticos.



Nota. Adaptado de Deepwater Horizon Accident Investigation Report (2010, p.32)

4. Realizar la pregunta ¿Por qué Pasó? En este paso se puede recurrir a metodologías de causa raíz de ser necesario, como los 5 porque por qué, los diagramas causa-efecto o el análisis de capas de protección que sería el recomendado para encontrar con el nivel de detalle necesario para la metodología las causas inmediatas, las precondiciones y la causa raíz. En

este caso para fines de la aplicación se usaron los hallazgos y resultados de la investigación para encontrar cada uno de estos elementos y llegar a la causa raíz de los 3 eventos.

El desarrollo de la metodología Tripod beta se encuentra en el Anexo E.

9.3 Resultados de la aplicación de metodologías de análisis de riesgo recreando escenarios basados en el Macondo

En el campo del análisis y gestión de riesgos se han desarrollado gran cantidad de metodologías que pueden ser aplicadas en diferentes campos de acción, con fortaleza y debilidades, en las distintas etapas de la evaluación de riesgos propuesta por la norma ISO 31000, con la ayuda de la norma ISO 31010 se compararon distintas metodologías en busca de sus fortalezas, debilidades, necesidades y necesidades. Con esta comparativo se buscaron las metodologías que pudieran abarcar una mayor cantidad de etapas, que pudieran ser usadas con un nivel de experticia de bajo a medio, que pudieran ser usadas con la información brindada por el informe de BP, que pudieran complementarse fácilmente con otras metodologías para fortalecer el análisis. En este proceso se seleccionaron las Metodologías Bowtie, Matriz de valoración de riesgos, Tripod beta, Queso Suizo y enfatizando en metodologías como los árboles de falla, árboles de suceso, el análisis de barreras de protección y los diagramas causa-efecto pueden ser usados como complemento y según el atendimento a las necesidades específicas de cada tarea de evaluación considerando todos los criterios anteriormente mencionados.

Como resultado de la aplicación de la metodología se considera que la metodología bowtie presenta grandes fortalezas en la gestión proactiva de riesgos, puede ser usada desde las etapas más tempranas del análisis de riesgo hasta la última etapa de la evaluación del riesgo

esquematisando las amenazas, consecuencias y sus barreras en función de un evento. Además de que puede en caso de ser necesario analizar los factores de escalabilidad permitiendo analizar de manera cualitativa la vulnerabilidad de las barreras de protección, así como también asignarles dueños a las barreras identificando los departamentos o empleados que estén a cargo de las diferentes acciones o barreras. En presencia de datos cuantitativos es posible extrapolar la metodología a otras metodologías como los árboles de falla y sucesos permitiendo su cuantificación o simplemente ser complementada por análisis semicuantitativos como los de la matriz de valoración de riesgo. Por último y una de las grandes fortalezas de la metodología fue expuesta en el segundo escenario donde muestra la posibilidad de transponer el evento top por un riesgo ya presente en el análisis proactivo para dar un punto de partida inicial al análisis riguroso de los fallos de barreras de protección, procedimiento que permite una retroalimentación y fortalecimiento continuo de la metodología.

En el caso del análisis reactivo la metodología tripod beta permite realizar un análisis gráfico, riguroso, minucioso y detallado de la penetración de las amenazas a través de las distintas barreras, permitiendo así no solo entender los acontecimientos si no también hallar la causa raíz de cada uno de los fallos e identificar también aquellas barreras faltantes. Lo que lo hace una metodología muy completa para el análisis reactivo de incidentes además de que en su desarrollo permite el complemento de diferentes metodologías de análisis de riesgo que se adaptaran al nivel complejidad y rigurosidad de cada evento. Por último, puede ser complementada con el modelo del queso suizo y el modelo bowtie permitiendo un modelo de gestión de riesgo en constante fortalecimiento.

10. Comparación de las metodologías Seleccionadas

A través de la aplicación de las metodologías y el proceso de selección bajo los distintos criterios se escogieron 3 metodologías que pueden ser utilizadas en conjunto para cubrir sus falencias y potenciar sus virtudes. Las metodologías seleccionadas como se vio en la aplicación fueron la Bowtie, Tripod Beta y el Modelo del queso suizo. En común tienen que todas las metodologías están basadas en el análisis de las barreras de protección, lo cual es importante considerando que en la industria del petróleo se manejan los procesos con redundancia para garantizar la seguridad e integridad.

10.1 Modelo de Bowtie.

Es un sistema de gestión que incorpora técnicas de análisis cualitativo que permite visualizar el riesgo al que se está enfrentando en una sola perspectiva y de fácil entendimiento. El diagrama tiene la forma de una corbata, creando una clara distinción entre la gestión de riesgos proactiva (preventiva) y reactiva. Las principales virtudes de la metodología son las siguientes:

- Es de Fácil uso e interpretación, además de requerir un nivel de experticia intermedio.
- El proceso de desarrollo de la metodología ayuda a direccionar el curso del proceso de análisis de riesgo.
- Permite identificar las amenazas y consecuencias considerando un evento específico.

- Permite identificar las barreras de protección para evitar que una amenaza alcance el evento, así como también las barreras de protección para prevenir o remediar las consecuencias en caso tal de que el evento acontezca.
- Es posible hacer un análisis más exhaustivo en el modelo donde se puedan identificar factores de escalamiento que permitan analizar cualitativamente el nivel de protección que brinda cada barrera.
- Es posible agregar a la metodología el departamento y el personal encargado de la barrera de protección o de una amenaza
- Es posible transponer la metodología Bowtie a un árbol de fallas o un árbol de sucesos a partir del análisis de las amenazas, consecuencias y sus barreras de protección.
- Puede ser usado como punto de partida para el análisis reactivo de incidentes.
- Puede ser modificado y retroalimentado a través del tiempo de una manera sencilla.
- Puede ser complementado con distintas metodologías de una manera sencilla en etapas específicas del análisis de las amenazas, consecuencias, las barreras protección o en el proceso de evaluación del riesgo.

Por otra parte, se identificaron 2 falencias en la metodología:

- No es descriptivo en la secuencia que pueden suceder los acontecimientos.
- El análisis de las barreras de protección tiende a ser de un sistema general y no de sus componentes por lo cual puede carecer de profundidad para ciertos tipos de análisis donde será necesario el uso de metodologías complementarias.

10.2 Modelo del queso suizo

La finalidad del modelo es explicar porque ocurren fallas, accidentes, desastres y fallas en sistemas sociotécnicos complejos en los cuales está involucrado el trabajo conjunto y sincronizado entre el factor humano y tecnológico. El modelo por si solo permite representar de manera clara la secuencia de fallos que llevaron a un incidente, atravesando los diferentes tipos de barreras en una organización sin embargo carece de profundidad en el análisis de los incidentes. Por consiguiente, se consideró que el modelo puede ser usado complementariamente con las metodologías Bowtie y Tripod beta para la representación de los incidentes una vez ya identificadas amenazas y barreras en la secuencia de dicho incidente.

10.3 Tripod beta

Es un método para analizar incidentes en paralelo con investigación. Se utiliza principalmente para incidentes complejos de alto riesgo, ya que es un método muy extenso y detallado.

Las principales virtudes de la metodología son las siguientes:

- Gran grado de detalle en el análisis de incidentes.
- Permite encontrar la causa raíz de un fallo identificando la causa inmediata y la precondición existente para este.
- Ayuda a dirigir el análisis del incidente en paralelo con la investigación.
- Muestra de manera gráfica y detallada el acontecimiento de un evento.

- Puede ser complementado de manera sencilla con metodologías de análisis causa raíz.

En esta metodología se identificaron las siguientes falencias:

- Debido a su gran grado de detalle es necesario analizar cada uno de los eventos que llevaron a la ocurrencia de un incidente por separado.
- Es un proceso exhaustivo y complejo que requerirá una gran inversión de tiempo y recursos para su desarrollo durante la investigación.
- No muestra la secuencia de los eventos debido a que los analiza de manera individual.

10.4 Uso complementario de las metodologías

Durante el proceso de selección y aplicación se hizo evidente que cada metodología presentaba ventajas y falencias sobre las otras. Por lo cual el proceso de selección de una metodología debe ser definido durante la primera etapa del análisis de riesgo definiendo el contexto y alcance. Para este caso en particular en la cual se decidió realizar un análisis proactivo y reactivo en operación de perforación costa fuera en Colombia. La metodología Bowtie y Tripod Beta cumplen con los criterios considerados para su selección, además de cumplir con los objetivos de los análisis proactivos y reactivos correspondientes. Sin embargo, ambas carecen de una representación en la secuencia de los eventos, por lo cual se sugiere el uso del modelo del queso suizo para suplir dicha carencia.

Es importante destacar que se observa una gran sinergia para el uso de las 3 metodologías considerando que se basan en el análisis de barreras y que además permiten un uso

complementario. Al realizar un buen análisis proactivo con la metodología Bowtie se tendrán identificadas las amenazas y las barreras de protección por lo cual una vez se presente un incidente y se haya identificado una secuencia de eventos, será posible usar toda la información obtenida de la investigación y la información que se tiene del análisis Bowtie como punto de partida para el desarrollo del Tripod Beta. Por otra parte, es posible que durante la investigación se identifiquen amenazas nuevas que podrán agregarse al modelo Bowtie para la prevención de futuros incidentes generando así una retroalimentación constante en el sistema integral de gestión de riesgo. Por último, ambas metodologías mostraron gran facilidad para complementarse en contextos específicos como por ejemplo la adición de un proceso nuevo a una operación en la cual se realizará un análisis de riesgo con diferentes metodologías y que podrá ser agregado al bowtie.

11. Conclusiones

A través de la revisión y análisis de distintas bases de datos y la clasificación de los eventos con mayor ocurrencia en las operaciones costa afuera se identificaron 6 factores principales de riesgo. El meteorológico, el mecánico, el humano, el geológico, el organizacional y el geopolítico.

El análisis de las distintas metodologías de riesgo nos permitió identificar las diferentes fortalezas y debilidades que poseen. Que estas pueden ser usadas en virtud de las diferentes necesidades y objetivos que se planteen y que por lo tanto la correcta ejecución de un plan integral de gestión de riesgo y del análisis de riesgo involucrara varias metodologías complementándose.

A través del análisis y comparación de la metodología Bowtie con otras metodologías se logró identificar que esta posee grandes fortalezas para el análisis proactivo de incidentes permitiendo identificar las amenazas y consecuencias relacionadas a un evento, así como todas las barreras que se tienen, logrando así realizar apreciaciones cualitativas que ayuden a la toma de decisiones preventiva desde las fases tempranas de los proyectos.

En el análisis de metodologías de causa raíz para el análisis de riesgos reactivo de incidentes la metodología Tripod beta se destacó sobre otras ya que permite analizar los incidentes de una manera rigurosa, logrando identificar las causas raíz de los eventos de manera detallada y entendiendo la sucesión de eventos y errores que llevaron a esta. Sin embargo, la metodología necesita del apoyo complementario de otras metodologías para facilitar su desarrollo.

La construcción de un buen modelo de análisis de riesgos proactivo podrá ser alimentado con la identificación y tratamiento de nuevas amenazas a lo largo del desarrollo del proyecto. Así como también ayudara a direccionar las investigaciones y el análisis de riesgos reactivo.

El análisis conjunto de los dos escenarios planteados en el trabajo nos lleva concluir que la combinación de las metodologías Bowtie, Tripod beta y el modelo del queso suizo permiten abarcar los escenarios de riesgo de manera proactiva y reactiva, permitiendo así la retroalimentación constante de los modelos generados fortaleciéndolos a través de la adquisición de experiencia y la presencia de distintos escenarios en el tiempo.

12. Recomendaciones

Se sugeriría realizar la implementación de análisis de riesgos a diferentes escenarios sean en las operaciones Onshore u Offshore que permitan la profundización en los procesos de gestión y análisis de riesgo que permitan identificar otras metodologías de análisis de riesgos aplicables al contexto colombiano.

Se sugiere analizar la viabilidad y bajo qué factores de correlación es posible utilizar los datos de incidentes, fallos de equipos y frecuencias existentes en las distintas bases de datos a nivel mundial para su uso en la gestión integral del riesgo en las operaciones costa fuera en Colombia.

Referencias bibliográficas

- Broder, J. F., & Tucker, G. (2012). *Risk Analysis and the Security Survey* (4th Edition). Butterworth-Heinemann.
- Cheryl Anderson, L. J. C. (1997). *Incidents Associated with Oil and Gas Operations, Outer Continental Shelf 1997* (p. 131). Minerals Management Service's.
- Cloutier, D. R. (s. f.). *Risk Assessment/Risk Reduction aka Risk Analysis*. Cloutier Consulting Services.
- Conde Tocanpicá, A. F. (2014). *Procedimiento para la selección de técnicas para la identificación, valorización y control de riesgos y de peligros en la industria de Oil & Gas*. Universidad Industrial De Santander.
- Deep Water, The Gulf Disaster and the Future of Offshore Drilling*. (2011). National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling.
- Estallilla Morey, V., & turuguet Mayol, D. (s. f.). *Indice De Incendio Y Explosión, Guia Para La Calisificación De Riesgos* (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Estudio De Riesgo Modalidad Análisis De Riesgo Anexo a la Manifestación de Impacto Ambiental* (p. 291). (2018). Instituto Mexicano del Petroleo.
- Guerrero Hernández., J. (2014). *Atención de derrames de petróleo crudo en el Golfo de México*. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Guidance on using Tripod Beta in the investigation and analysis of incidents, accidents and business losses* (5.01; p. 21). (2015). Energy Intitute.

- Hauge, S., Habrekke, S., & Lundteigen, M. (2012). *Barriers to prevent and limit acute releases to sea* (N.º 1; p. 91). SINTEF.
- Hincapié Mejía, M., & Tamayo, D. Á. (2016). *Un Estado Del Arte Del Análisis Cualitativo Y Cuantitativo De Riesgos En Proyectos*. Universidad EAFIT.
- Hudson P.T.W, Reason J.T, Wagenaar W.A, Bentley P.D, Primrose M, y Visser J.P. (1993). *Tripod Delta: Proactive Approach to Enhanced Safety*.
- Icontec Internacional. (2010). *Guía Para La Identificación De Los Peligros Y La Valoración De Los Riesgos En Seguridad Y Salud Ocupacional, GTC 45*.
- Institute for Water Resource, & US Army Corps of Engineers. (s. f.). *Risk Assessment – Qualitative Methods*.
- Internal BP incident investigation team. (210d. C.). *Deepwater Horizon, Accident Investigation Report*.
- Manga, R. (2016). *La Gestión del Riesgo Industrial, una herramienta para evitar accidentes catastróficos*. Seguridad de procesos en exploración y producción de petróleo y gas.
- Murcia Pamplona, A., & Beltrán Rodríguez, C. A. (2016). *Métodos Para Identificación De Peligros, Análisis, Evaluación Y Tratamiento De Los Riesgos En Colombia*.
- Myrto, K., & Michalis, C. (2012). *Safety of offshore oil and gas operations: Lessons from past accident analysis* (p. 60). European Commission.
- NSAI Standars. (2019). *Risk management—Risk assessment techniques*.
- Offshore Statistics & Regulatory Activity Report 2018* (p. 18). (2018). Health and Safety Executive.
- Project Management Institute. (s. f.). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK)* (Quinta edición). Project Management Institute, Inc.

Puga Muñoz, M. (s. f.). *Los Cinco Por Qué's (Five Whys)*.

Root Cause Evaluation Manual (N.º 0; p. 48). (2002). NMC.

SANS Institute. (2003). *Global Information Assurance Certification Paper*.

SINTEF Industrial Management. (2002). *OREDA Offshore Reliability Data Handbook* (4th Edition). Det Norske Veritas.

Stefan Schneiderbauer, D. C. S. (s. f.). Qualitative and quantitative approaches to risk assessment. En *Understanding Disaster Risk: Risk Assessment Methodologies And Examples*.

Tema Litoclean S.A.C. (2019, octubre). *El rol del Bow Tie en la Gestión de la Seguridad*.

The Bureau of Ocean Energy Management, Regulation And Enforcement. (2011). U.S Department of The Interior.

Vamanu, B., & Krausmann, E. (2016). *Offshore Risk Assessment* (p. 80). European Commission.

Vose, D. (s. f.). *Risk Analysis A quantitative guide* (tercera). John Wiley & Sons, Ltd.

Wheeler, E. (2011). *Security Risk Management Building an Information Security Risk Management Program from the Ground Up* (K. Swick, Ed.). Elsevier.

Yleen Ramirez Torres, C. I. A. (2008). *Uso De La Matriz De Valoración De Riesgos - RAM* (N.º 1; p. 13). Ecopetrol.