



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA
MECANICA Y ELÉCTRICA

APLICACIÓN DEL MÉTODO ANÁLISIS DE CAPAS DE
PROTECCIÓN [LOPA] PARA UNA PLANTA DE PROCESOS
INDUSTRIALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

PRESENTAN

HEBER MISAEL DÍAZ ÁLVAREZ

SALVADOR LÓPEZ CONTRERAS

DANIEL VILORIA ZAVALA



ASESORES: M. EN C. ERIKA VIRGINIA DE LUCIO RODRÍGEZ
M. EN C. GUSTAVO PACHECO VAN DYCK

MÉXICO, D.F. 2013

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACION
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA(N) DESARROLLAR

C. HEBER MISAEL DIAZ ÁLVAREZ
C. SALVADOR LÓPEZ CONTRERAS
C. DANIEL VILORIA ZAVALA

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN [LOPA] PARA UNA
PLANTA DE PROCESOS INDUSTRIALES”**

PROPONER LA MODIFICACIONES NECESARIAS EN LOS NIVELES DE INTEGRIDAD DE SEGURIDAD [SIL] CON
LOS QUE OPERA LA PLANTA CRIOGÉNICA DE GAS “CUENCA DE BURGOS” REYNOSA, PARA CORREGIR LAS
DEBILIDADES EN EL PROCESO CON EL OBJETIVO DE EVITAR O MITIGAR LA OCURRENCIA DE EVENTOS NO
DESEADOS, A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA “ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN” [LOPA].

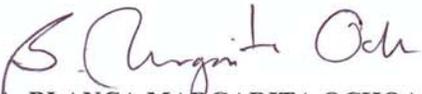
- INDICE.
- INTRODUCCIÓN.
- JUSTIFICACIÓN.
- OBJETIVO.
- MARCO CONCEPTUAL.
- METODOLOGÍA.
- DIAGNÓSTICO.
- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.
- CONCLUSIONES.
- BIBLIOGRAFÍA.
- ANEXOS.

MÉXICO D. F., A 15 DE AGOSTO DE 2013.

ASESORES


M. EN C. ERIKA VIRGINIA DE LUCIO RODRÍGUEZ


M. EN C. GUSTAVO PACHECO VAN DYCK


DRA. BLANCA MARGARITA OCHOA GALVÁN
JEFA DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
INTRODUCCIÓN	X
JUSTIFICACIÓN	XII
OBJETIVO	XIII
CAPÍTULO 1 MARCO CONCEPTUAL	
1.1 Concepto e importancia de la seguridad	2
1.1.1 Fases de la evaluación de riesgos	4
1.1.2 Análisis de riesgos	5
1.1.3 Valoración de riesgos	6
1.1.4 Clasificación de técnicas de seguridad	8
1.2 Capas de seguridad	9
1.2.1 Control del proceso	10
1.2.2 Paro del proceso.	14
1.2.3 Sistemas instrumentados de seguridad	14
1.2.4 Capa de protección activa	16
1.2.5 Capa de protección pasiva	17
1.2.6 Capa de respuesta de emergencia	17
1.2.7 Capas independientes de protección [IPL]	18
1.3. El gas natural	19
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA	
2.1 Tipos de evaluación de riesgos y su metodología	23

2.1.1 Descripción del método “Hazard Operability” [HazOp] y “análisis de capas de protección” [LOPA]	23
2.1.2 Método cuantitativo descrito en la norma [IEC 61508]	26
2.1.3 Método de matriz de riesgo	29
2.1.4 Método de gráficos de riesgo	33
2.2 Marco metodológico	34
2.2.1 Determinar el riesgo tolerable	37
2.2.2 Desarrollo de análisis de riesgo	38
2.2.2.1 Técnica “¿Qué pasa si?” (What-if)	38
2.2.2.2 Técnica “Listas de revisión” (Cheklist)	39
2.2.2.3Técnica “Estudios de peligro y operación Hazard and operability study	39
2.2.2.4Técnica “Análisis de modos y efectos de fallas (Failure Mode and Effects Analysis FMEA)	40
2.2.2.5 “Técnica Árboles de fallas”	41
2.2.3 Criterios para cambiar del método HazOp a la metodología [LOPA]	42
2.2.4 Seleccionar evento/impacto	43
2.2.5 Niveles para evento/impacto	43
2.2.6 Identificar causas iniciales	44
2.2.7 Determinación de causas iniciales	44
2.2.8 Identificar la capa de protección independiente [IPL] y calcular la probabilidad de falla distribuida [PFD]	45
2.2.9 Evento final	46
2.2.10 Cálculo del riesgo	46
2.3 Ejemplo del método del análisis de capas de protección [LOPA]	47

CAPÍTULO 3 DIAGNÓSTICO

3.1	Ubicación geográfica	53
3.2	Descripción del proyecto integral burgos	54
3.3	Evaluación y diagnóstico del proyecto integral burgos	56
3.4	Diagnóstico de la planta criogénica de gas	59
3.4.1	Proceso del gas natural	59
3.4.2	Riesgos en el área de extracción	66
3.4.3	Riesgos en el área de tratamiento	69
3.4.4	Riesgos en el área de almacenamiento	69
3.4.5	Riesgos en el área de compresión	70

CAPITULO 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

4.1	Análisis de riesgos del área de extracción	73
4.2	Análisis de riesgos del método de extracción	76
4.3	Análisis de riesgos del área de tratamiento	78
4.4	Análisis de riesgos del área de almacenamiento	82
4.5	Análisis de riesgos del área de compresión	85
4.6	Recomendaciones en el área de extracción	81
4.7	Recomendaciones para el método de extracción	84
4.8	Recomendaciones para el área de tratamiento	88
4.9	Recomendaciones para el área de almacenamiento	92
4.10	Recomendaciones para el área de compresión	95

CONCLUSIONES	111
---------------------	------------

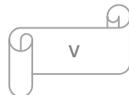
BIBLIOGRAFÍA	112
---------------------	------------

ANEXOS	114
---------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PAG.	
1.1	Acción y temporización para controlar el riesgo	7
1.2	Técnicas de Seguridad	8
2.1	Comparación entre los métodos HazOp y [LOPA]	26
2.2	Clasificación de riesgo de acuerdo a la norma [IEC 61508]	26
2.3	Niveles de integridad de seguridad	28
2.4	Valores asignados para la probabilidad y consecuencias	29
2.5	Relación frecuencia y consecuencia	29
2.6	Tabla de identificación y valoración de las amenazas	30
2.7	Valores para la descripción de la gravedad para la vida (Vi)	31
2.8	Valores para estimar la gravedad para el medio ambiente (M)	31
2.9	Valores para estimar la gravedad de la propiedad (P)	32
2.10	Valores para estimar la velocidad de propagación (Ve)	32
2.11	Información necesaria para cambiar de HazOp al criterio de análisis de capas de protección [LOPA]	42
2.12	Valores de [PFD] del operador bajo diferentes circunstancias	46
2.13	Descripción del impacto de los eventos	47
2.14	Nivel de Severidad	47
2.15	Causa y frecuencia del evento iniciante	48
2.16	Diseño general del proceso	48
2.17	Alarmas	49
2.18	Mitigación	49
2.19	Capas de protección independientes	50
2.20	Nivel de seguridad	51
2.21	Probabilidad de mitigar el evento	51
3.1	Diagnóstico de recursos que se espera recaudar	57
4.1	Análisis de riesgo del área de extracción	74

4.2	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción	75
4.3	Análisis de riesgos por el método de HazOp para el método de extracción	76
4.4	Análisis de riesgos para el método de extracción	77
4.5	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del método de extracción	78
4.6	Análisis de riesgos por el método de HazOp para el método de tratamiento	80
4.7	Análisis de riesgos para el área de tratamiento	80
4.8	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción	81
4.9	Análisis de riesgos por el método de HazOp para el método de almacenamiento	83
4.10	Análisis de riesgos para el área de almacenamiento	84
4.11	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de almacenamiento	85
4.12	Análisis de riesgos por el método de HazOp para el área de compresión	86
4.13	Análisis de riesgos para el área de compresión	87
4.14	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de compresión	88
4.15	Análisis por la metodología [LOPA] del área de extracción	89
4.16	Análisis por la metodología [LOPA] del área de tratamiento	90
4.17	Análisis por la metodología [LOPA] del área de almacenamiento	91
4.18	Análisis por la metodología [LOPA] del área de compresión	92
4.19	Análisis de riesgos del área de extracción	95
4.20	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción con las recomendaciones implementadas	96



4.21	Análisis de riesgos para el método de extracción	99
4.22	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del método de extracción con las recomendaciones implementadas	99
4.23	Análisis de riesgos para el área de tratamiento	102
4.24	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de tratamiento con las recomendaciones implementadas	104
4.25	Análisis de riesgo para el área de almacenamiento	106
4.26	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de almacenamiento con la recomendación implementada	107
4.27	Análisis de riesgos para el área de compresión	108
4.28	Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de compresión con las recomendaciones implementadas	110

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG.		PAG.
1.1	Procedimiento para la evaluación de riesgos	4
1.2	Matriz de análisis de riesgo	8
1.3	Elementos que compone un sistema básico de control	10
1.4	Composición de un sistema instrumentado de seguridad [SIS]	15
1.5	Consumo de gas natural	19
1.6	Importancia de la ventilación	20
1.7	Explosión	21
1.8	Deflagración	21
2.1	Implementación de las capas de protección	25
2.2	Figura de riesgo	34
2.3	Metodología [LOPA]	36
2.4	Formato FMEA	41
2.5	Campos de información recabados por HazOp para el análisis [LOPA]	42
2.6	Niveles para Evento/Impacto	43
2.7	Criterios necesarios para calificar a una [IPL]	45
2.8	Tipos de capas de mitigación	50
3.1	Ubicación Geográfica	53
3.2	Área del proyecto Integral Burgos	54
3.3	Ubicación del proyecto y las asignaciones del proyecto Integral Burgos	56
3.4	Terminación "Tubingless"	58
3.5	Perforación de pozos no convencionales	58
3.6	Importancia del tratamiento y separación en el proceso de gas natural	60
3.7	Remoción de condensados y agua	61
3.8	Endulzamiento	62

3.9	Destilación Criogénica	63
3.10	Diagrama esquemático de un tren de compresión	64
3.11	Elementos que conforman a un tanque criogénico	65
3.12	Proceso del gas natural	65
3.13	Instrumento de medición sumergible “Placa de Orificio” instalado en líneas de inyección	67
3.14	Proceso de extracción	67
3.15	Técnica de Fracturación Hidráulica o Fracking	68
3.16	Prueba de fuga en Brida	71
3.17	Flama Jet	71
4.1	Método árbol de fallas en el área de extracción	73
4.2	Método árbol de fallas en el método de extracción	76
4.3	Método árbol de fallas en el área de tratamiento	79
4.4	Consecuencias en caso de fuga de gas natural	79
4.5	Método árbol de fallas en el área de almacenamiento	82
4.6	Consecuencias en caso de fuga de gas natural en el área de almacenamiento, sin encontrar punto de ignición	83
4.7	Método árbol de fallas en el área de compresión	86
4.8	Acoplamiento del flujómetro ultrasónico en tubería	93
4.9	Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por El método “árbol de fallas”	94
4.10	Elaboración del cable	97
4.11	Aplicación del cable en torre de extracción de gas natural	97
4.12	Perforación rotatoria aplicada en la extracción de gas natural	98
4.13	Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por El método “árbol de fallas”	98
4.14	Camisa de protección para las tuberías	101
4.15	Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por El método “árbol de fallas”	102

4.16	Contención por dique	105
4.17	Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por El método “árbol de fallas”	105
4.18	Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por El método “árbol de fallas”	108

INTRODUCCIÓN

El Análisis de Riesgos es importante para la industria en todos sus sectores, ya que coadyuva a la prevención y la mitigación de los accidentes de trabajo de forma directa e indirecta, mediante estrategias y salvaguardas que actúan cuándo ocurre un accidente, ya sea controlando rápidamente con la ayuda de diferentes técnicas, como lo son ¿Qué pasa si? [What-if] y HazOp pero destacando de entre estas técnicas la técnica “Análisis de capas de protección” [LOPA] representando una ventaja clara, debido a que no proporciona solamente métodos analíticos de frecuencias y probabilidades, también proporciona una herramienta para el uso de criterios en ingeniería.

La técnica “Análisis de capas de protección” [LOPA] es un método de Análisis de Riesgos, que fue introducido en la década de los 90’s publicado por Center of Chemical Process Safety (CCPS), permite determinar y valorar el riesgo de forma intuitiva y reproducible, a través de cada una de las capas de protección que la conforman empezando desde el diseño del proceso, sistema básico de control, pasando por alarmas de intervención manual, Sistema instrumentado de seguridad [SIS], protección activa, protección pasiva y concluyendo en la última capa de seguridad llamada respuesta de emergencia. Donde a su vez, cada capa está compuesta de equipos y/o procedimientos de control que actúan conjuntamente con las otras capas de protección ya antes mencionadas para controlar y/o mitigar los riesgos en los procesos, que pueden ser de diferentes tipos, como lo es en la industria química, petrolera, metalúrgica, de refinación y como es en este caso en plantas criogénicas de gas. El término “capa de protección” fue definido en la Comisión Internacional Electrotécnica [IEC 61511] cumpliendo con cuatro características. Específico, independiente, confiable y auditable.

La Norma [IEC 61511] es **específica** porque sólo requiere de un sistema de gestión del sistema instrumentado de seguridad[SIS] identificado, es **independiente** por la combinación de sensores, solucionadores lógicos, elementos finales y sistemas de apoyo que se han diseñado y gestionado para conseguir un nivel de integridad de seguridad especificado [SIL]. Es **confiable** porque podría aplicar una o más funciones de seguridad instrumentada [FIS] que se han diseñado e implementado para hacer frente a un peligro específico o evento peligroso. Es **auditable** por que el sistema de gestión del [SIS] debe definir un propietario/operador para evaluar, diseñar, verificar, instalar, validar, operar, mantener y mejorar continuamente su sistema instrumentado de seguridad [SIS].



El conjunto de acciones como el sistema básico de control, las alarmas de intervención manual, el sistema instrumentado de seguridad [SIS], protección activa, protección pasiva y la respuesta de emergencia es el conjunto de acciones que crea un sistema de seguridad, con la finalidad de que el proceso industrial en caso de ser modificado o se le añada otra etapa de producción simplemente la o las capas asociadas a este tendrán que modificarse, en lugar de que todo el sistema de seguridad lo haga; lo cual representa una ventaja significativa en cuanto al ahorro de tiempos muertos a causa de mantenimientos y este a su vez un ahorro económico.

El “Análisis de capas de protección” [LOPA] tiene en cuenta que los accidentes ocurren de diversas formas, por esta razón se debe de envolver en capas de seguridad las etapas del proceso, para que en conjunto actúen de manera eficaz contra cualquiera de estos acontecimientos indeseables, capa por capa tiene vulnerabilidades que de una forma más detallada se determinará, pero si se acopla de forma homogénea todas estas capas de seguridad, se volverá estable y fuerte contra las diferentes fallas y eventos del proceso industrial.

JUSTIFICACIÓN

En años recientes, el incremento de las emergencias ambientales en territorio nacional mexicano se debe a la falta de mantenimiento, gestión y uso de una **metodología** que ayuden a impedir o mitigar el incremento de accidentes y a su vez la frecuencia de las emergencias ambientales. No hay una base de datos histórica de accidentes ocurridos en México en cuanto al tratamiento de hidrocarburos que se encuentre disponible de manera oficial en el país, estas circunstancias repercuten negativamente en la forma de prevenir accidentes al no tomar en consideración las fallas, que causaron en el pasado numerosos accidentes. Del año de 1997 al 2001 se tiene un total de 1,675 emergencias o desastres ambientales que representa el 57% de las ocurridas a nivel nacional y en promedio se presentan 3.2 emergencias ambientales en la paraestatal del manejo de hidrocarburos cada semana. Del total de las emergencias ambientales provocadas por la paraestatal el 58% se suscitaron en ductos y plantas de gas natural, el 18% con gas licuado de petróleo, 17% con crudo y 7% con gasolina.

Los tipos de fallas más comunes que fueron determinantes en concebir las emergencias ambientales son: daños por terceras personas (31%), no identificadas (22%) y operaciones incorrectas por fallas humanas (47%)

OBJETIVO

Proponer las modificaciones necesarias en los niveles de integridad de seguridad [SIL] con los que opera la planta criogénica de gas, “Cuenca de Burgos” Reynosa, para corregir las debilidades en el proceso con el objetivo de evitar o mitigar la ocurrencia de eventos no deseados, a través de la metodología “Análisis de capas de protección” [LOPA]

CAPÍTULO 1

MARCO CONCEPTUAL

CAPÍTULO 1 MARCO CONCEPTUAL.

En este capítulo se hace referencia al concepto e importancia de la seguridad, señalando sus beneficios en caso de que se implemente correctamente y sus consecuencias cuando no se toman las medidas necesarias.

Se describen los conceptos de cada una de las fases de la evaluación de riesgos para la comprensión de la implementación de un nivel de seguridad que se establece en base a los riesgos existentes o que se puedan diagnosticar, lo cual se llevará a cabo en el capítulo 4.

Así mismo, se hace referencia a la importancia del gas natural en la vida cotidiana, sus diferentes usos, las ventajas a comparación de otros tipos de combustibles fósiles y el impacto que esta fuente de energía tiene para el desarrollo económico de México.

1.1 CONCEPTO E IMPORTANCIA DE LA SEGURIDAD.

La seguridad es un estado de ausencia de cualquier tipo de riesgo o peligro, los riesgos y peligros pueden provocar diversos tipos de daños, ya sean de tipo físico, psicológico o material y son controlados con un nivel de seguridad adecuado para preservar la salud e integridad primordialmente de los individuos que forman parte de cualquier tipo de comunidad y de forma secundaria evitar o disminuir las pérdidas materiales que deriven del resultado de cualquier tipo de accidente.

La seguridad laboral es el conjunto de actividades multidisciplinarias orientadas a preservar, conservar y mejorar la salud de los trabajadores buscando un alto grado de bienestar físico y mental. Teniendo como objetivo el establecer y mantener un ambiente de trabajo seguro y sano para prevenir o minimizar los riesgos.

El alcance que pueda tener la seguridad laboral depende de la aplicación de ciertas consideraciones lógicas que son las siguientes:

- Análisis de los casos (identificar causas, determinar tendencias y realizar evaluaciones)
- Comunicación (relación informativa de los conocimientos obtenidos del análisis de los casos)
- Inspección (Observación del cumplimiento, detección de condiciones inseguras)
- Entrenamiento (Orientar las responsabilidades de seguridad)

La importancia de la seguridad radica en el hecho de que no se debe de ver al trabajador como un factor de producción si no como un ser integral, que al garantizar los niveles adecuados de seguridad se verá reflejado en un mejor rendimiento laboral y una mayor productividad.

Para llevar a cabo el concepto de seguridad, se debe de realizar una evaluación de riesgos que constituye la base de la acción preventiva, ya que a partir de la información obtenida con la valoración podrán adoptarse las decisiones precisas sobre la necesidad o no de acometer acciones preventivas.

De acuerdo con las “Directrices para la evaluación de riesgos”, elaboradas por la Comisión Europea y editadas por la oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas, Luxemburgo 1996, se entiende por evaluación de riesgos “el proceso de valoración del riesgo que entraña para la salud de los trabajadores y seguridad de los equipos ante la posibilidad de que se verifique un determinado peligro en el lugar de trabajo”.

Con la evaluación de riesgos, se alcanza el objetivo de facilitar la toma de medidas adecuadas, para poder cumplir con su obligación de garantizar la seguridad y la protección de trabajadores y equipo de trabajo, comprendiendo las siguientes medidas:

- Prevención de los riesgos laborales
- Información
- Formación
- Organización y medios para poner en práctica las medidas necesarias.

Con la evaluación de riesgos se consigue:

- Identificar los peligros existentes en el lugar de trabajo y evaluar los riesgos asociados a ellos, a fin de determinar las medidas que deben tomarse para proteger la seguridad de los trabajadores y seguridad del equipo de trabajo.
- Poder efectuar una elección adecuada sobre los equipos de trabajo, los preparados o sustancias que se empleen, el acondicionamiento del lugar de trabajo y la organización de éste.
- Comprobar si las medidas existentes son adecuadas.
- Establecer prioridades en el caso de que sea preciso adoptar nuevas medidas como consecuencia de la evaluación.

- Comprobar y hacer valer los factores de riesgo tomados en cuenta para comprobar que las medidas preventivas este bien establecidas y documentadas, garantizando un mayor nivel de protección.

1.1.1 FASES DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS.^[1]

La evaluación del riesgo se realiza considerando los siguientes puntos:

- Identificación de riesgos.
- Identificación de los equipos y operarios expuestos a los riesgos que entrañan los elementos peligrosos.
- Evaluar cualitativa o cuantitativamente los riesgos existentes.
- Analizar si el riesgo puede ser eliminado, y en caso de que no pueda serlo, decidir si es necesario adoptar nuevas medidas para prevenir o reducir el riesgo.

Las cuales se pueden sintetizar en:

- **Análisis del riesgo**, comprendiendo las fases de identificación de riesgos y estimación de los riesgos.
- **Valoración del riesgo**, que permitirá enjuiciar si los riesgos detectados resultan tolerables.

El procedimiento para la evaluación de riesgos se ilustra en la Figura 1.1

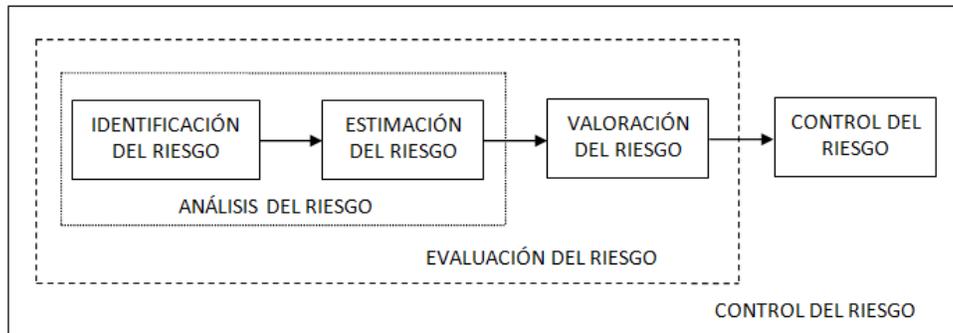


Figura 1.1 Procedimiento para la evaluación de riesgos. [1]

1.1.2 ANÁLISIS DE RIESGOS.^[1]

Es un estudio que determina los factores que afectan la seguridad de una instalación o planta industrial y la seguridad del personal que labore en ellas. Además determina los efectos y/o daños que causaría en un área determinada, en su entorno; así como al medio ambiente y comunidades que lo rodea.

El análisis de riesgos se puede realizar mediante la utilización de una lista en la que se identifiquen los peligros existentes:

- Golpes y cortes
- Espacio inadecuado
- Incendio y explosiones
- Sustancias que pueden inhalarse
- Ambiente térmico adecuado
- Condiciones inadecuadas de iluminación

La importancia del estudio de riesgo es la seguridad que tiene la misma prioridad o importancia que la producción, ventas y logística. El estudio de análisis de riesgos se realiza en la instalación de una planta nueva [artículo 30 LEGEEPA] o proyecto.

En plantas ya instaladas:

- Cada cinco años para casos de alto riesgo
- Cada diez años para casos de bajo riesgo

Estos dos criterios de cada cinco y diez años se realizan mediante un programa periódico que actualiza aspectos tales como el deterioro de la planta, cambio de proceso, cambio de materiales y materia prima, cambio de personal u operarios y deficiencia en su capacitación. Por lo tanto el análisis de riesgos es un proceso sistemático que identifica, evalúa y controla un riesgo potencial en una instalación por lo cual se evita accidentes por intoxicación, deflagración y detonación.

Por razones económicas, se recomienda un estudio de análisis de riesgo a toda instalación de alto o bajo riesgo de forma periódica. La información necesaria para un estudio y/o procedimiento del análisis de riesgos es:

- Información de procesos
- Información de materia prima, sustancias y producto terminado
- Información de tipos de equipo y distribución (Layout)
- Desfogues y drenajes

- Información de normas de seguridad. Normas de seguridad sobre riesgos físicos que puedan afectar a instalaciones, procesos y trabajadores. Normas de higiene que contempla el riesgo a la salud de los trabajadores. Normas de organización para la administración de riesgos. Normas específicas para riesgos de procesos específicos y normas de productos.
- Información sobre experiencia y conocimientos de los técnicos y obreros de los cinco puntos anteriores
- Tener información del estrato social y económico de las zonas aledañas a la planta

Los pasos para el análisis de riesgos son los que se muestran a continuación:

- Checar el control de riesgos con apego a las prácticas estándares de producción y seguridad, campañas y cursos al respecto así como del mantenimiento.
- Evaluación predictiva del riesgo, para procesos en los que no hay experiencia y en procesos de alto riesgo.

Las bondades y beneficios del estudio de análisis de riesgos:

- Reduce accidentes de manera significativa.
- Da continuidad y rentabilidad de las plantas, lo que da como resultado; ahorro en costos (no accidentes) y una mayor productividad.

1.1.3 VALORACIÓN DE RIESGOS^[1]

A la vista de la magnitud de riesgos, podrá emitirse el correspondiente juicio acerca de que si el riesgo analizado resulta tolerable o por el contrario deberá adoptarse acciones encaminadas a su eliminación o reducción, resultando evidente para la disminución de [ER], se deberá actuar disminuyendo la frecuencia (F), disminuyendo las consecuencias (C) o disminuyendo ambos factores simultáneamente. El valor obtenido en la estimación anterior permitirá establecer diferentes niveles de riesgo que son representadas en la matriz de riesgos de la figura 1.2 “Matriz de análisis de riesgos”.

Para disminuir el valor del número de veces que se presenta un suceso en un determinado intervalo de tiempo y que puede originar daños o en otras palabras la frecuencia con la que ocurren estos acontecimientos, se debe actuar evitando que se produzca el suceso o disminuyendo el número de veces que se produce, es decir “previniendo” para disminuir el daño o las consecuencias (C) adoptando

medidas de “protección”. Esta última actuación es el fundamento de los planes de emergencia.

En la tabla 1.1 se indican las acciones a adoptar para controlar el riesgo, así como la temporización de las mismas. Del mismo modo se ilustra en la figura 1.2 la matriz del análisis de riesgo con la ubicación de cada tipo de riesgo.

Tabla 1.1 Acción y temporización para controlar el riesgo.

RIESGO	ACCIÓN Y TEMPORIZACIÓN
Trivial	No se requiere acción específica
Tolerable	No se necesita mejorar la acción preventiva. Sin embargo, se deben considerar soluciones más rentables o mejoras que no supongan una carga económica importante. Se requiere inspecciones periódicas para asegurar que se mantiene la eficacia de las medidas de control
Moderado	Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, determinando las inversiones precisas. Las medidas para reducir el riesgo deben implantarse en un periodo determinado. Cuando el riesgo moderado está asociado con consecuencias extremadamente dañinas, se necesitará una acción posterior para establecer, con más precisión la probabilidad de daño como base para determinar la necesidad de mejora de las medidas de control.
Importante	No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Puede que se precisen recursos considerables para controlar el riesgo. Cuando el riesgo corresponda a un trabajo que se está realizando, debe remediarse el problema en un tiempo inferior al de los riesgos moderados.
Intolerable	No debe comenzar ni continuar el trabajo hasta que se reduzca el riesgo. Si no es posible reducir el riesgo, incluso con recursos ilimitados, debe prohibirse el trabajo.

Fuente: Seguridad e Higiene del Trabajo. [1]



Figura 1.2 Matriz de análisis de riesgos [1]

1.1.4 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE SEGURIDAD [1]

Tabla 1.2 Técnicas de Seguridad.

TIPOS DE TÉCNICAS Y FORMAS DE ACTUACIÓN			ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE RIESGOS	CONTROL DE RIESGOS	
				PREVENCIÓN	PROTECCIÓN
TÉCNICAS GENERALES	TÉCNICAS ANALÍTICAS	ANTERIORES AL ACCIDENTE	INSPECCIONES DE SEGURIDAD. ANÁLISIS DE TRABAJO. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	—	—
		POSTERIORES AL ACCIDENTE	—		
	TÉCNICAS OPERATIVAS	CONDICIÓN INSEGURA Concepción	—	DISEÑO Y PROYECTO DE INSTALACIONES. DISEÑO DE EQUIPOS. ESTUDIO Y MEJORA DE MÉTODOS. NORMALIZACIÓN.	
		CONDICIÓN INSEGURA Corrección	—	SISTEMA DE SEGURIDAD. SEÑALIZACIÓN. MANTENIMIENTO PREVENTIVO	DEFENSAS Y RESGUARDOS. PROTECCIÓN INDIVIDUAL.
		ACTO INSEGURO	—	NORMALIZACIÓN SELECCIÓN DE PERSONAL. CAMBIO DE COMPORTAMIENTO: • Formación • Adiestramiento • Propaganda • Acción de grupo • Incentivos • Disciplina	
TÉCNICAS ESPECÍFICAS	Son las que resultan de la aplicación de las técnicas generales a la detección y corrección de peligros concretos y específicos.				

Fuente: Seguridad e Higiene del Trabajo. [1]

Las técnicas de seguridad se clasifican atendiendo los siguientes criterios:

Por su alcance: Técnicas generales y técnicas específicas. Las técnicas generales son también denominadas inespecíficas o polivalentes que son de aplicación universal, esto quiere decir que son validadas para ser aplicadas ante cualquier tipo de riesgo. Por otra parte las técnicas específicas son también denominadas sectoriales o concretas para aplicación limitada riesgos concretos (incendios, explosiones, caídas de altura, entre otros).

Por su forma de actuación: Técnicas preventivas la cual su objetivo es evitar el accidente y Técnicas de protección el cual su objetivo es evitar la lesión.

Por su lugar de aplicación: Técnicas de concepción y técnicas de corrección. Las técnicas de concepción tienen su aplicación en la fase de proyecto, diseño de equipos y métodos de trabajo. Y las técnicas de corrección tienen aplicación en campo en las condiciones peligrosas de trabajo.

Por su objetivo: Técnicas de análisis y técnicas operativas. Las técnicas analíticas se centran en el análisis y valoración de los riesgos. Mientras las operativas evitan los accidentes mediante la aplicación de técnicas preventivas o de protección, eliminando causas de los mismos o reduciendo sus efectos.

Por sus causas: Técnicas que actúan sobre la condición insegura, que actúa sobre el acto inseguro.

1.2 CAPAS DE SEGURIDAD^[8]

Las capas de protección, son cualquier mecanismo independiente que reduce el riesgo mediante el control, la prevención o la mitigación. La suma de las capas de protección proporciona lo que se llama seguridad funcional. Las capas de seguridad que contempla la metodología [LOPA] se enlistan a continuación.

- Control del proceso
- Paro del proceso
- Paro de emergencia
- Sistema de fuego y gas
- Capa de protección activa
- Capa de protección pasiva
- Capa de respuesta de emergencia

A continuación se hace una explicación de cada una de estas capas de seguridad.

1.2.1 CONTROL DEL PROCESO [7]

Esta capa consiste en el sistema de básico de control que está en contacto con el proceso, el cual consta de sólo tres elementos que se muestra en la figura 1.3. El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado, el cual consiste el tratamiento de la materia prima mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación.

El proceso puede cumplir su objetivo de transformación de material gracias al “controlador” que realiza dos funciones esenciales:

Compara la variable medida con la de referencia o el valor deseado a través de sensores e instrumentos de medición.

- Estabiliza el funcionamiento dinámico en caso de existir agentes externos que afecten al proceso, esto se realiza a través de actuadores o elementos finales de control que son controlados a través del procesamiento de señales que envían los sensores.

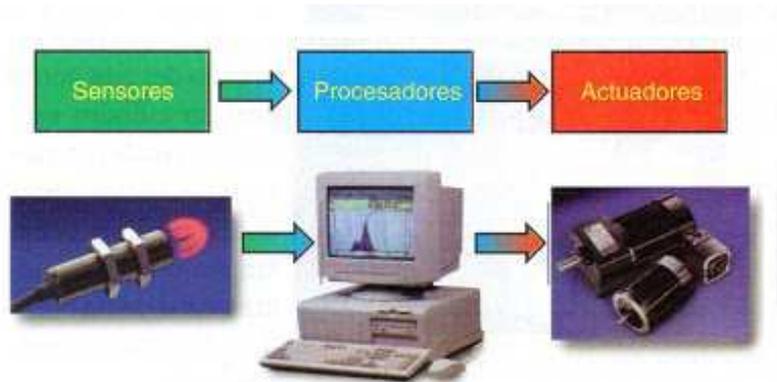


Figura 1.3 Elementos que compone un sistema básico de control.

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

- ❖ Los cambios en la variable física controlada (presión, temperatura, nivel flujo, humedad, pH, entre otras), debido a alteraciones en las condiciones del proceso (cambios de carga). La carga del proceso es la cantidad total del fluido, que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas.

Los cambios de carga del proceso son debido a las siguientes causas:

- Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado
- Variaciones en la calidad del fluido de control
- Cambios en las condiciones ambientales

Los cambios en la carga del proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda.

- ❖ El tiempo necesario para que la variable de proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este tiempo de retardo se debe a una o varias propiedades del proceso: capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

El control de un proceso puede ser de dos formas, manual o automático. La diferencia radica en que el control manual carece de detector de señal de error (sensor) y de un controlador, pero su uso prevalece debido a que solo se requiere la experiencia del operario y requiere de poca inversión pero con estándares de calidad muy bajos.

El control de proceso automático o de lazo cerrado, tiene un detector de señal de error (sensor) y de un controlador. Esto le permite medir, calcular, comparar y corregir el resultado hasta obtener algo parecido a la señal de ajuste o valor establecido. Todos estos pasos constituyen una cadena cerrada de acciones.

Los sensores se clasifican en diferentes tipos dependiendo la variable física con la que están en contacto pudiendo ser humedad, pH, viscosidad, luminosidad, velocidad y proximidad. Destacando cuatro variables físicas principalmente como son:

- Temperatura
- Presión
- Nivel
- Caudal o flujo

Sensores de temperatura.

La medida de la temperatura es una de las más comunes y de las más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Casi todos los fenómenos físicos están afectados por esta variable física o bien se utiliza frecuentemente para inferir el valor de otras variables del proceso.

Los fenómenos que se manifiestan cuando el valor de la temperatura cambia son los siguientes:

- ❖ Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos, o gases)
- ❖ Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia)
- ❖ Variación de resistencia de un semiconductor (termistores)
- ❖ La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares)
- ❖ Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación)

De este modo, se emplean los siguientes sensores que pueden registrar o medir este tipo de variable física.

- ❖ Termómetros de vidrio
- ❖ Termómetros bimetalicos
- ❖ Elementos primarios bulbo y capilar
- ❖ Termistores
- ❖ Pirómetros de radiación
- ❖ Termopares.

Sensores de presión.

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). La presión se puede clasificar en diferentes tipos como son: absoluta, atmosférica, relativa, diferencial y vacío. Los elementos que pueden medir o registrar este tipo de variable física son los mencionados en la lista siguiente.

- ❖ Tubo Burdón
- ❖ Manómetro
- ❖ Elemento en espiral
- ❖ Tipo Diafragma
- ❖ Tipo fuelle
- ❖ Capacitivo
- ❖ Presostato

Sensores de Nivel.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos.

Los medidores de nivel líquido trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, o bien las manifestaciones o consecuencias que tiene en su entorno cuando sucede un incremento o decremento del nivel como lo es el desplazamiento, la presión hidrostática, o incluso basándose en la propiedades eléctricas del líquido. Algunos ejemplos de sensores que se basan en estos principios son:

- ❖ Medidor Manométrico
- ❖ Medidor de tipo Burbujeo
- ❖ Medidor de presión diferencial de diafragma
- ❖ Medidor resistivo/conductivo
- ❖ Medidor capacitivo
- ❖ Medidor láser

Los medidores de nivel de sólidos se desarrollaron e implementaron por la exigencia de los procesos continuos generados en la industria para medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos. Los medidores de nivel de sólidos se clasifica en: Detectores de nivel de punto fijo y los medidores de nivel continuo.

Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados, entre los que destacan:

- ❖ El tipo diafragma
- ❖ Interruptores de nivel alto con sonda
- ❖ Capacitivo
- ❖ Detector de Paletas rotativas
- ❖ Detector tipo Vibración
- ❖ Medidor radar de microondas

Los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo al más alto. Entre los instrumentos empleados se encuentra:

- ❖ Sondeo electromecánico
- ❖ Sondeo de báscula
- ❖ Sondeo de radiación.

Sensores de Caudal o flujo.

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio es muy importante la medición de caudales de líquidos y gases.

Existen dos tipos de medidores, los volumétricos que determinan el caudal en volumen del fluido, y los de masa que determinan el caudal de masa. Se reservan los medidores volumétricos para la medida general de caudal y se destinan los medidores de caudal másico a aquellas aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante. Los principios de medida de los medidores de caudal son:

1.2.2 PARO DEL PROCESO.

Esta capa de control consiste en la capacidad del operador para intervenir en el proceso. El operador debe tener la capacidad y competencia para conducirse con autonomía en el abastecimiento, operación, verificación y control de los procesos, cumpliendo normas de calidad de productos, haciendo uso de máquinas, equipos, materiales e insumos y tiene una formación en base a la capacitación que le permite adaptarse a situaciones nuevas en función de los cambios tecnológicos como también estar alerta ante la necesidad de realizar un paro de emergencia para no comprometer su propia integridad física y la de las máquinas que intervienen en el proceso.

Un sistema típico de parada de emergencia se diseña de manera que detenga una máquina o proceso en caso de detectarse una falla. Para que tal sistema resulte útil, el propio sistema de parada debe estar diseñado para que en caso de fallar, lo haga en forma segura (fail-safe). Esto significa que desde el punto de vista de la seguridad exclusivamente, no es necesaria alta disponibilidad. El sistema se detiene o pasa a condición segura tanto en caso de haberse detectado una falla real o en caso de malfuncionamiento del sistema de parada. Sin embargo, muchos procesos productivos no toleran esta situación de paradas espurias debidas al malfuncionamiento del equipo. Tomemos por ejemplo una caldera de múltiples quemadores. Es indeseable, económicamente oneroso y hasta peligroso el apagado total del sistema en el caso de una falla, sea esta de sensores o del propio sistema lógico responsable de la parada de emergencia. En este tipo de casos, se recurre a utilizar sistemas de Alta Disponibilidad, habitualmente implementados en base a sensores y sistemas lógicos redundantes.

1.2.3 SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD (SIS) [11]

Un Sistema Instrumentado de Seguridad [SIS] es un nuevo término usado en los estándares que normalmente también ha sido y es conocido por la mayoría como: Sistema de Parada de Emergencia [ESD], Sistema de Parada de Seguridad,

Sistema de Enclavamientos, Sistema de Disparos de Emergencia y Sistemas de Seguridad.

El [SIS] constituye la última capa de Seguridad preventiva y su correcto diseño, instalación, pruebas y mantenimiento (ciclo de vida) son la garantía de su adecuado funcionamiento cuando, bajo demanda, le sea requerido. Si esta capa falla, el evento peligroso se desencadenará produciendo fugas, explosiones, incendios, etc. con las consecuencias que esto puede acarrear en costes y/o pérdidas humanas.

Un sistema instrumentado de seguridad [SIS] puede ser definido como: *“Un sistema compuesto por sensores, lógica y elementos finales con el propósito de llevar el proceso a un estado seguro cuando determinadas condiciones preestablecidas son violadas”*.

Un sistema instrumentado de seguridad está compuesto de cualquier combinación de sensor(es), solucionador(es) lógicos y elemento(s) final(es). Los tres componentes deben de estar presentes para que se efectúe correctamente el funcionamiento.

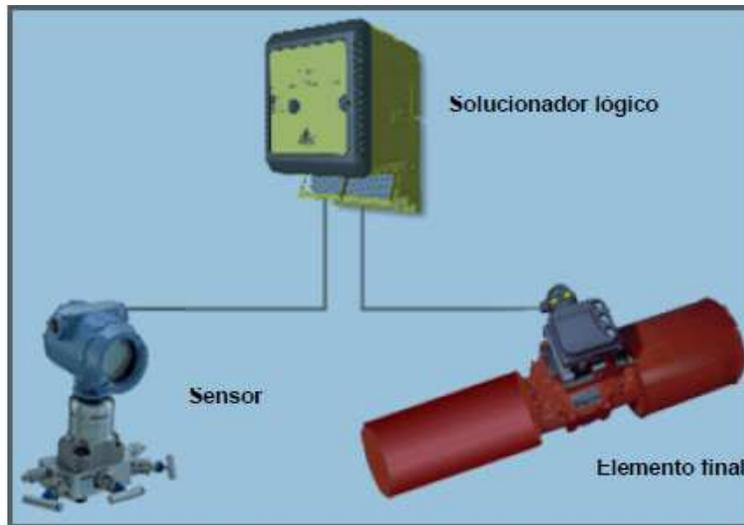


Figura 1.4 Composición de un sistema instrumentado de seguridad [SIS]. [11]

A pesar de la similitud estructural con el sistema básico de control del proceso [SCBP] el sistema instrumentado de seguridad [SIS] es fundamentalmente diferente. El sistema básico de control del proceso existe para obtener un producto de calidad al mantener el proceso **funcionando sin problemas**. El sistema

instrumentado de seguridad, por otro lado, existe para supervisar que no haya condiciones del proceso peligrosas para tomar las medidas adecuadas, generalmente **parando** el proceso.

El sistema instrumentado de seguridad también está **separado** del sistema de control básico del proceso. Esta separación refleja no sólo sus diferentes funciones, sino también la importancia de mantener la integridad del sistema instrumentado de seguridad incluso cuando se cambia con frecuencia el sistema de control básico del proceso. Las normas de seguridad permiten que haya comunicaciones controladas cuidadosamente entre los componentes y los sistemas, así que se puede implementar una instalación integrada, pero independiente, del sistema de control básico del proceso y el sistema instrumentado de seguridad.

1.2.4 CAPA DE PROTECCIÓN ACTIVA^[11]

Esta capa está conformada por válvulas de alivio y discos de ruptura acoplados en las líneas de presión que exista en el proceso.

Válvulas de presión de seguridad (PSV) y Discos de Ruptura (RD)

La válvula de seguridad de presión [PSV] y los discos de ruptura [RD] son dispositivos diseñados para permitir el escape o relevo de exceso de un fluido contenido en un recipiente a presión, y se caracteriza por su rápida apertura total o acción de disparo. Es utilizada básicamente para servicio de vapores y gases.

La presión máxima de trabajo permisible, es la presión manométrica a la cual el recipiente está sujeto normalmente durante el servicio. Un margen adecuado deberá de dejarse entre la presión de operación y la presión de trabajo máxima permisible, para garantizar una operación segura. La presión de operación debe de estar cuando menos 10% debajo de la presión máxima del trabajo permisible.

Para seleccionar una válvula de seguridad, se debe de tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Materiales de Construcción
- Presión de Trabajo
- Máxima Temperatura Interior
- Sobrepresión permisible
- Servicio (Líquidos, gases, vapores,)

- Contrapresión
- Capacidad requerida
- Requerimientos por normas internacionales
- Tipo de conexiones en los extremos
- Tamaño preferible de la entrada.

1.2.5 CAPA DE PROTECCIÓN PASIVA^[11]

Una capa de protección pasiva puede ejemplificarse como los diques de una planta de procesamiento de diesel, que deben de estar incluidos en la planificación y construcción del proyecto. Las capas de protección pasivas se caracterizan por no ser activadas o controladas por ningún instrumento y son diseñadas para **mitigar** el accidente. La diferencia entre la capa de protección pasiva en relación a la capa de protección activa radica en que depende solo de los fenómenos físicos tales como los diferenciales de presión, convención, gravedad o la respuesta “natural” de los materiales a altas temperaturas en el ejemplo de un incendio o explosión para apagar o desacelerar la reacción.

1.2.6 CAPA DE RESPUESTA DE EMERGENCIA

Los sistemas de seguridad instrumentada están conformadas por alarmas operador, que a su vez están constituidos por instalaciones destinadas a avisar al personal en caso de siniestro. Toda industria deben contar con una protección adecuada.

Existen dos tipos de alarmas:

- **Alarmas manuales:** Consta de estaciones de aviso distribuidas por toda la fábrica. Estas estaciones consisten en llaves o timbres cuyo accionamiento hace sonar la alarma. Con el objetivo de impedir que alguien las oprima inadvertidamente están protegidas por vidrios. Deben estar colocadas al alcance de los operarios de manera que no sean necesarios a estos recorrer más de 30 metros para encontrar una.
- **Alarmas automáticas:** Las alarmas automáticas pueden accionarse por dos mecanismos. Uno es un detector que indican un aumento de la temperatura ambiente sobre un cierto límite: tipo de temperatura fija. Y el otro es un detector sensible a una variedad brusca de la temperatura ambiental: tipo de rapidez de aumento.

Los tipos de señales son diferentes: auditivas ó luminosas; ambas deben ser seguras, ser características, y llegar a todos los operarios. Estar combinadas con una llamada de auxilio a los bomberos con el objeto de asegurar su funcionamiento a los sistemas de alarma debe de estar alimentados eléctricamente por fuentes de energía independiente de las maquinarias o el alumbrado.

El operador es el que esta monitoreando (y manipulando) las variables del proceso en el recae la responsabilidad de la calidad con el que termine el producto en el lazo de control que le concierne y de mantener tanto el producto como la maquinaria en buenas condiciones.

Las alarmas auxilian al operador al ahorro de tiempo y energía de las máquinas, estas deben de estar comunicadas entre ellas con un protocolo de comunicación cerrado, debido a que no debe de tener ninguna perturbación con los lazos de comunicación de los demás elementos del proceso. Tanto los operadores, como alarmas responden a un sistema jerarquizado, esto con la finalidad de crear un sistema redundante y en caso de que el problema no llegue a solucionarse con el primer nivel de control, entra un segundo nivel de control para darle solución al problema.

1.2.7 CAPAS INDEPENDIENTES DE PROTECCIÓN [IPL]

Se les llama Capas de Protección Independientes solamente ha aquellas capas de protección que cumplan con las siguientes pruebas:

- Un [IPL] es designado únicamente para prevenir o mitigar las consecuencias de un evento potencial peligroso.
- Un [IPL] es independiente de otra capa de protección asociada con el peligro identificado.
- Esta puede ser considerada para hacer o ejecutar la acción para la cual fue diseñada. Los modos de falla tanto aleatoria como sistemática se abordan en el diseño.
- Es diseñada para facilitar la validación regular de las funciones protectoras.

1.3 EL GAS NATURAL^[24]

El gas natural es una de las más relevantes fuentes de energía, se emplean tanto para uso doméstico, industrial y comercial como la mostrada en la figura 1.5. El gas natural es un recurso no renovable, esto quiere decir que a futuro se deberá de buscar otra fuente de energía que sustituya al gas natural, sin embargo en la actualidad es imprescindible el consumo de este recurso natural ya que a comparación de otras fuentes de energía como lo son el petróleo o el carbón genera menos cantidades de dióxido de carbono siendo más amigable con el medio ambiente, existe de manera abundante en el subsuelo de la corteza terrestre y se requiere una menor inversión para su extracción a comparación del petróleo.

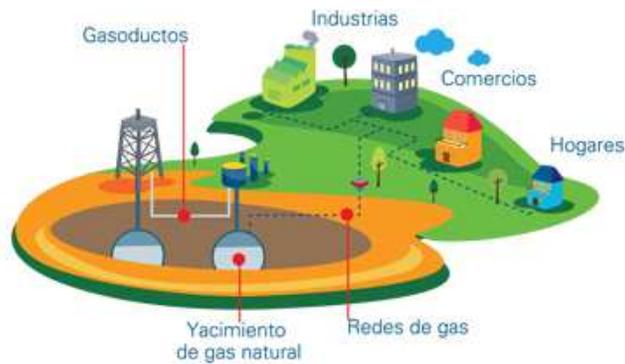


Figura 1.5 Consumo de gas natural. [21]

En México, el abasto suficiente de gas natural es una asunto de gran relevancia para el desarrollo económico e industrial, un ejemplo es Baja California, ya que las dos plantas generadoras de energía eléctrica ubicadas en Mexicali usan este tipo de recurso natural, al igual que la planta generadora de energía eléctrica ubicada en Rosarito, para proveer de energía eléctrica desde Mexicali hasta La Paz.

La importancia del gas natural se enfatiza en los siguientes puntos:

- Alto poder calorífico
- Mayor limpieza ambiental (2.6 veces más limpio que el combustóleo) a comparación del resto de combustibles fósiles al generar menos cantidades de CO₂ de efecto invernadero, evitando la penalización del tratado de Kioto
- Comodidad de utilización para la generación de calor en consumos domésticos e industriales

- Es práctico ya que puede ser transportado y distribuido directamente al consumidor final a través de sistemas de tuberías, lo cual significa un servicio continuo y eficiente.
- Versatilidad, pues el gas natural puede competir con las restantes energías primarias en un 70% de sus empleos
- Es más seguro ya que el gas natural no es tóxico, es 65% más ligero que el aire, lo que hace que se disipe rápidamente.
- No deja residuos contaminantes por el resultado de la combustión, como por ejemplo el hollín

Los riesgos del gas natural comienzan cuando hay una fuga en alguna parte del ducto que transporta este combustible, si la pérdida ocurre en un recinto cerrado hay riesgo de asfixias.

La asfixia ocurre cuando el gas natural desplaza al oxígeno, que es necesario para la respiración. Cuando el oxígeno desciende a menos de 16%, las personas en un ambiente confinado y sin ventilación están expuestas a asfixiarse, presentando algunos síntomas como mareos, cansancio y debilidad muscular. Cuando el oxígeno es desplazado por el gas natural y desciende por debajo del 10% provoca la pérdida de conocimiento y muerte por asfixia.

Otro tipo de riesgo que puede presentarse, son las explosiones. Si el lugar está completamente cerrado el gas se acumula y puede mezclarse con el aire en una proporción dentro de los límites de inflamabilidad. Bajo estas condiciones la sola presencia de una chispa puede producir una explosión. En la figura 1.6 se observa el problema de estar en un área confinada sin ventilación y la acumulación de calor que puede acelerar la asfixia en las personas, por otro lado también se puede observar la manera en la que deben de estar ventiladas estas áreas.

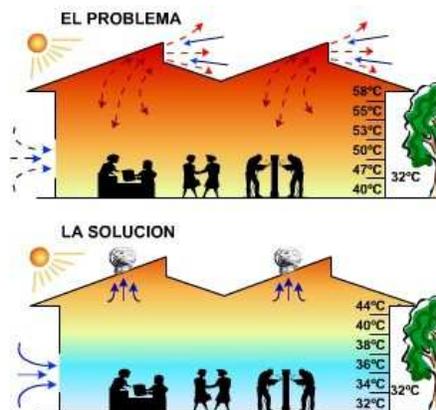


Figura 1.6 Importancia de la ventilación [21]

Las explosiones pueden desarrollar ondas expansivas importantes que por lo general destruyen el lugar donde se producen.

Ahora bien, si la fuga de un ducto se presenta en un espacio abierto el riesgo que existe es el de una deflagración.

La deflagración ocurre cuando el gas se mezcla con el aire en una proporción dentro de los límites de inflamabilidad. De presentarse estas condiciones y se provoca una chispa, puede provocar un incendio localizado, a esto es a lo que se le conoce como deflagración. Comparando la deflagración con una explosión (figura 1.7), la deflagración tiene una onda expansiva pequeña y casi no existen efectos destructivos, a menos que después ocurra un incendio mayor si en las cercanías se encuentran sustancias inflamables.



Figura 1.7 Explosión. [21]

Las deflagraciones ocurren generalmente a cielo abierto (figura 1.8), en veredas, calles, entre otras. Y pueden producirse por roturas de caños, sismos y maniobras de construcción. El viento puede desplazar la nube de gas hacia algún lugar más alejado o hacia el interior de alguna vivienda cercana, donde en caso de presentarse las condiciones antes descritas se puede suscitar un incendio.



Figura 1.8 Deflagración. [21]

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe de forma teórica cada uno de los pasos que conforma la metodología [LOPA] que incluye la identificación de riesgos, valoración de riesgos, obtención de resultados y propuesta de solución, así como también mencionando las diferencias y ventajas de dicha metodología a comparación de otros tipos de evaluación de riesgos.

2.1 TIPOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS Y SU METODOLOGÍA

Existen innumerables procedimientos de evaluación de riesgos, desde los más simplificados basados en consideraciones subjetivas de los propios trabajadores, hasta procedimientos cuantitativos basados en métodos estadísticos para determinación de frecuencias, cálculos de daños entre otros. Un ejemplo de estos procedimientos es HazOp y [LOPA] que se describirán en el subtema 2.1.1 “Descripción del método HazOp y análisis de capas de protección [LOPA]”. Estos métodos se clasifican por el grado de dificultad y por el tipo de riesgo que comprende los métodos para:

- Evaluación de riesgos impuestos por reglamentaciones específicas
- Evaluación de riesgos que precisan de métodos especializados de análisis
- Evaluación de riesgos para los que no existe reglamentación específica pero hay normas internacionales, europeas, nacionales o guías de organismos oficiales de reconocido prestigio.
- Evaluación general de riesgos.

En el presente proyecto solo se hace referencia a la evaluación de riesgos que precisan de métodos especiales de análisis, porque dentro de este grupo se incluyen los métodos cualitativos y cuantitativos como lo es HazOp y la metodología [LOPA].

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO “HAZARD OPERABILITY” [HazOp] Y “ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN” [LOPA] ^[11]

La técnica de estudio llamada comúnmente “Hazard Operability” [HazOp] y la Metodología del “análisis de capas de protección” [LOPA], son empleadas con el

propósito de identificar riesgos potenciales y problemas operacionales producidos por las desviaciones en el comportamiento de los sistemas.

Muchas empresas integran y otras tantas desean aplicar estudios de "Hazard Operability" [HazOp] y "análisis de capas de protección" [LOPA] debido al ahorro de tiempo, costos y mejora de productividad. La norma [IEC 61511] promueve una estrecha relación entre las dos metodologías, sin embargo este enfoque es relativamente nuevo en seguridad y evaluación de riesgos, en la práctica hay una mala interpretación y por consecuencia una mala aplicación que genera resultados inesperados.

La causa principal de la mayoría de los problemas es que "Hazard Operability" [HazOp] es un método basado en la causa y "análisis de capas de protección" [LOPA] es un método basado en consecuencias que derivan de las desviaciones del proceso. Al realizar ambos métodos simultáneamente, los profesionales de evaluación de riesgo son obligados a adoptar un enfoque basado en la causa por ambos métodos, esto compromete el valor de todo el ejercicio y puede conducir a graves resultados erróneos, debido a que solo están implementando "Hazard Operability" [HazOp] y no están tomando en cuenta las consecuencias en la que se basa la metodología "análisis de capas de protección" [LOPA].

A continuación se menciona los propósitos de cada uno de los métodos.

El propósito de un estudio "Hazard Operability" [HazOp] es identificar:

- Peligros potenciales en el sistema. Dichos peligros pueden incluir los esencialmente pertinentes sólo para el área inmediata del sistema y los que tienen un ámbito mucho más amplio de influencia (por ejemplo, algunos riesgos ambientales).
- Problemas potenciales con la operatividad del sistema y, en particular identificación de las causas del problema de funcionamiento y las desviaciones de producción que puedan dar lugar a productos no conformes.

En resumen el método "Hazard Operability" [HAzOp] es un método basado en la causa y es una buena herramienta para identificar causas en eventos peligrosos.

El propósito de un estudio [LOPA] es:

- Es implementar capas de protección que comprende de cualquier mecanismo independiente que reduce el riesgo mediante el control, la prevención o la mitigación. La suma de las capas de protección proporciona

lo que se llama seguridad funcional. El ejemplo de la implementación de cada capa de acuerdo al nivel de riesgo se muestra en la figura 1.5.



Figura 2.1 Implementación de las capas de protección. [11]

La metodología del “análisis de capas de protección” [LOPA], utiliza un estudio minucioso en cada una de las capas que envuelven al proceso desde su control hasta el actuador. Utilizando modelos matemáticos para determinar la frecuencia con la que puede ocurrir una desviación en el proceso. En la tabla 1.2 se muestran algunas diferencias entre la Técnica “Hazard Operability” [HazOp] y “análisis de capas de protección” [LOPA].

Los tipos de análisis “Que-pasa-si” [What-if], auditorías, prácticas de normalización de ingeniería y procedimientos operacionales, se fundamentan en conocimientos basados en la experiencia.

Tabla 2.1 Comparación entre los métodos HazOp y [LOPA]

Metodología	Década donde comenzó aplicarse el método.	Organización que impulso su desarrollo	Herramientas que utilizan
HazOp	70's	ICI	Palabras guía, lluvia de ideas y la dirección de una sola persona.
Análisis de capa de protección (LOPA)	90's	IEC	Utiliza modelos matemáticos. Se basa en el análisis por capas que conforman al proceso.

2.1.2 MÉTODO CUANTITATIVO DESCRITO EN LA NORMA [IEC 61508] [8]

La metodología consta de tres pasos. Primeramente parte del establecimiento del nivel de “*riesgo tolerable*” aceptado por la organización el cual está basado en las estrategias corporativas o legales de la empresa, país o estado en el cual se encuentra la empresa que determinará el nivel de integridad de seguridad [SIL] Objetivo. El “*riesgo tolerable*” es el número de veces que una Función Instrumentada de Seguridad [SIF] puede fallar, otra definición que se le da al “*riesgo tolerable*” es: “*el número de veces por año que una consecuencia no deseada ocurre en el proceso*”. Estos valores se obtienen de tablas o matrices que muestran la frecuencia de un evento y sus consecuencias.

En la tabla 2.2 se muestra un ejemplo de esta determinación.

Tabla 2.2 Clasificación de riesgo de acuerdo a la norma [IEC 61508]

FRECUENCIA	CONSECUENCIA			
	Catastrófico	Crítico	Marginal	Despreciable
Frecuente	I	I	I	II
Probable	I	I	II	III
Ocasional	I	II	III	III
Remoto	II	III	III	IV
Improbable	III	III	IV	IV
Increíble	IV	IV	IV	IV

Fuente: Análisis de Capas de Protección. [8]

Para el establecimiento del nivel de riesgo tolerable se deben tomar en cuenta los siguientes 3 criterios:

- **Riesgo individual:** es la probabilidad por año de que una persona normal sin protección resulte muerta en aquella localización como consecuencia de un accidente en la actividad peligrosa.
- **Riesgo social:** El riesgo social de una actividad peligrosa se define como la probabilidad por año de que un grupo de N personas muera debido a un accidente en la actividad peligrosa.
- **Riesgo corporativo:** Este refleja el impacto que tiene un proyecto sobre el riesgo de la compañía sin considerar los efectos de la propia diversificación de los accionistas.

La determinación del nivel de riesgo tolerable requiere un profundo conocimiento acerca de los peligros y riesgos en la industria y contar con grupos corporativos dedicados a fijar los criterios de frecuencia y consecuencia, dependiendo de la localización del proceso, la interacción con la sociedad, ciudades, los materiales y productos utilizados.

En México no existe una legislación ni un criterio corporativo que fije los riesgos tolerables para las empresas públicas y privadas, se utilizan criterios establecidos en normas o compañías extranjeras.

El segundo paso es la determinación del riesgo del “Equipo Bajo Control” [EUC]. El riesgo es una medida que utiliza la probabilidad y la consecuencia. El riesgo para un equipo bajo control consiste en la medida de la consecuencia no deseada y la relación de demandas del sistema sin considerar medidas de protección. La forma de calcular este valor es por medio de técnicas cuantitativas como son las siguientes:

- **Análisis de Arboles de Fallas [FTA]:** es uno de los métodos más ampliamente usados en sistemas de relatividad, mantenimiento y análisis de seguridad. Ayuda a identificar causas potenciales de falla de sistemas antes de que las fallas ocurran. También puede ser utilizado para evaluar la probabilidad del evento más alto utilizando métodos analíticos o estadísticos. Estos cálculos envuelven sistemas de relatividad cuantitativos e información de mantenimiento tal como probabilidad de falla, tarifa de falla, y tarifa de reparación.
- **Diagramas de Bloques de Confiabilidad [RBD]:** Ilustran la funcionalidad de un sistema. La confiabilidad es la probabilidad de operación exitosa durante un intervalo de tiempo dado. En un diagrama de bloques se

considera que cada elemento funciona (opera exitosamente) o falla independientemente de los otros.

El tercer y último paso es el cálculo de la Reducción de Riesgos Necesarios para cumplir con el riesgo tolerable. Se obtiene al dividir el número de veces por año que falla la Función Instrumentada de Seguridad [SIF] entre el número de Demandas por año. Al resultado de esta operación se le llama “Numero de Aceptable de Veces” que la [SIF] puede fallar por año.

El nivel [SIL] es fijado de acuerdo a la tabla 2.3 bajo los criterios de un experto.

Tabla 2.3 Niveles de integridad de seguridad

Nivel de Integridad de Seguridad NIL (SIL)	Probabilidad de Falla Sobre Demanda Promedio (PFDave)
4	10,000 a $\leq 100,000$
3	1,000 a $\leq 10,000$
2	100 a $\leq 1,000$
1	10 a ≤ 100

Adaptado de IEC 61511-1 Tabla 3
NOTA: Las aplicaciones clasificadas como nivel de integridad de seguridad 4 (SIL 4) generalmente no se usan en las industrias de procesos, y las normas advierten que no se debe usar un sistema programable individual para aplicaciones SIL 4.

Fuente: Determinación del nivel de integridad de seguridad de los sistemas instrumentados de seguridad. [9]

Esta metodología utiliza cálculos cuantitativos para determinar el riesgo del equipo bajo control, pero para determinar la selección del nivel del SIL es un método de aproximación ya que requiere de un buen juicio para seleccionar exactamente en qué rango se selecciona el [SIL], de acuerdo a la siguientes puntos.

- El objetivo del nivel de integridad [SIL] 1, es el de evitar o mitigar riesgos y accidentes en el instrumento de control.
- El objetivo del nivel de integridad [SIL] 2, es el de evitar o mitigar riesgos y accidentes en el instrumento de control al igual que el operario.
- El objetivo del nivel de integridad [SIL] 3, es el de evitar o mitigar riesgos y accidentes en el instrumento de control, operario e instalaciones de la planta de procesos.
- El objetivo del nivel de integridad [SIL] 4, es el de evitar o mitigar riesgos y accidentes en el instrumento de control, operario, instalaciones de la planta de procesos y comunidades aledañas. Cabe destacar que este nivel de integridad de seguridad sólo es aplicable en plantas nucleares.

2.1.3 MÉTODO DE MATRIZ DE RIESGO [8]

La metodología de matriz de riesgo es una de las más usadas para el análisis de riesgos por su fácil manejo. Consiste en la identificación de peligros asociados a cada fase, etapa o capa del proceso y la posterior estimación de los riesgos teniendo en cuenta conjuntamente la probabilidad y las consecuencias en el caso de que el riesgo se materialice.

La estimación de riesgo [ER] vendrá determinada por el producto de la frecuencia (F) o la probabilidad (P) de que un determinado riesgo produzca un cierto daño, por la severidad de las consecuencias (C) que pueda producir dicho riesgo. En la tabla 2.4, los valores asignados para la probabilidad y las consecuencias, se toman en cuenta de acuerdo con los siguientes criterios:

Tabla 2.4 Valores asignados para la probabilidad y consecuencias

Probabilidad de que ocurra el daño	Severidad de las consecuencias
Alta: Siempre o casi siempre	Alta: Extremadamente dañino o mortal (Muerte, amputaciones, intoxicaciones, lesiones muy graves, enfermedades crónicas graves, etc.)
Media: Algunas Veces	Media: Dañino (Quemaduras, fracturas leves, sordera, dermatitis, etc.)
Baja: Raras veces	Baja: Ligeramente dañino (cortes, molestias, irritaciones de ojo por polvo, etc.)

Fuente: Seguridad e Higiene del Trabajo. [1]

Debe realizarse un estudio más profundo y adoptar medidas de control para las situaciones de riesgo cuyo valor de [ER] se encuentre en la zona sombreada de la matriz de análisis de riesgos que se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Relación frecuencia y consecuencia.

		Consecuencia o severidad (Pr)		
		Menor (A) 1	Serio (B) 2	Extenso (C) 3
PROBABILIDAD (Pb)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Fuente: Análisis de Capas de Protección. [8]

Las consecuencias pueden ser expresadas en términos de:

- Pérdidas humanas
- Pérdidas económicas
- Pérdidas ambientales
- Pérdida de imagen de la empresa

La frecuencia puede ser expresada en términos de la frecuencia en que se presenta el evento indeseable, alto, medio o bajo.

El problema con la metodología de matrices de riesgo se presenta en la selección del [SIL] objetivo porque está basada en una evaluación cualitativa y algunas empresas han calibrado sus matrices de acuerdo a su experiencia, tipo de aplicación y pueden proveer una guía rápida en la evaluación del nivel [SIL] objetivo, sin embargo dejar a criterio de personas la selección del [SIL] Objetivo no es recomendable ya que pueden perderse de vista factores externos o experiencias externas en procesos similares que puedan representar un potencial problema de combinaciones de eventos no previstos por el analista.

Las matrices de frecuencia son muy utilizadas en el análisis de peligros y operación HazOp el cual es un método analítico cualitativo para la determinación de los peligros en los procesos, tal vez por esta razón se ha extendido el uso de matrices calibradas para la determinación de los niveles de [SIL] Objetivo.

La manera de llevar a cabo la selección del nivel de integridad de seguridad [SIL], se explica a continuación.

El primer paso es identificar el riesgo o la fuente que origina el riesgo, que operación o beneficio aporta para el proceso, que amenaza existe, cuales son los elementos vulnerables y sus posibles consecuencias como se muestra en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Tabla de identificación y valoración de las amenazas

Riesgo Amenaza o peligro						Gravedad				Control Riesgo		Ponderación de daños
Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de riesgo	Elemento vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr	
Soldadura	Corte	Acopio de botellas	Explosión	Personas y bienes	Incendio							

El siguiente paso es evaluar y seleccionar el valor que mejor describa la gravedad para la vida que pueda tener la amenaza, estos valores se muestran en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Valores para la descripción de la gravedad para la vida (Vi)

Clase		Vi Gravedad para la vida
1	Poco importantes	Padecimientos ligeros durante un día o menos.
2	Limitadas	Lesiones menores, malestar que perdura por una semana o menos
3	Graves	Algunas heridas graves, serias complicaciones
4	Muy Graves	Muerte de al menos una persona, y/o varios heridos (20) de gravedad y/o hasta 50 evacuados
5	Catastróficas	Varías muertes, cientos de heridos graves y/o más de 50 evacuados

Posteriormente se selecciona el valor que se muestra en la tabla 2.8, para estimar el impacto al medio ambiente.

Tabla 2.8 Valores para estimar la gravedad para el medio ambiente (M)

Clase		M Gravedad para el medio ambiente
1	Poco importantes	No hay contaminación.
2	Limitadas	Hay baja contaminación y sus efectos están contenidos
3	Graves	Hay baja o media contaminación y sus efectos están muy difundidos
4	Muy Graves	Hay alta contaminación y sus efectos están contenidos
5	Catastróficas	Hay muy alta contaminación y sus efectos están muy difundidos

El siguiente paso es estimar el daño que se pueda tener en la organización, teniendo como medida de daño el número de salarios mínimos vigentes. Esto se muestra en la tabla 2.9

Tabla 2.9 Valores para estimar la gravedad de la propiedad (P)

Clase		M Gravedad para la propiedad: Costo del daño (salario mínimo mensual vigente)		
		Organización pequeña	Organización mediana	Organización Grande
1	Poco importantes	<2	<4	<8
2	Limitadas	2-5	4-10	8-20
3	Graves	5-10	10-20	20-40
4	Muy Graves	10-20	20-40	40-80
5	Catastróficas	>20	>40	>80

Como último paso antes de calcular y determinar el nivel de [SIL], se debe considerar la velocidad de propagación. Esto se obtiene de la tabla 2.10

Tabla 2.10 Valores para estimar la velocidad de propagación (Ve)

Clase		Ve Velocidad de propagación
1	Advertencia precisa y anticipada	Efectos contenidos / ningún daño
2	Media	Alguna propagación / pocos daños
3	Alta	Daños considerables / efectos contenidos
4	Sin advertencia	Desconocidos hasta que los efectos se han desarrollado completamente.

Posteriormente, se calcula nuestra prioridad (Pr) de nuestro nivel [SIL] usando la siguiente fórmula.

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Del cual el resultado obtenido se debe de comparar con los valores que varían del 1 al 3 y que representan de la "A" a la "C" respectivamente para obtener la prioridad.

En la ponderación de daños, es donde se selecciona el nivel de integridad de seguridad [SIL], que arrojó el cálculo de la amenaza. Siendo “Pb” la que representa la probabilidad o la frecuencia y “Pr” la prioridad en base a la severidad de las consecuencias que pueda traer consigo la amenaza.

2.1.4 MÉTODO DE GRÁFICOS DE RIESGO [12]

La metodología de gráficos de riesgo fue desarrollado con la publicación de la norma Alemana [DIN 19250] en 1994. La metodología de gráficos de riesgos es muy popular para determinar el objetivo del nivel [SIL]. En figura 2.2 se puede ver la representación de un gráfico de riesgos.

La metodología cualitativa está basada en categorías: la consecuencia y frecuencia de un evento peligroso, pero también la probabilidad de que una persona se encuentre en el área afectada y la posibilidad de que esta pueda evadir el peligro.

Los parámetros utilizados pueden ser tomados de la norma [IEC 61511]. El *parámetro de Consecuencias (C)* describe el resultado probable del evento peligroso, el parámetro Consecuencia está compuesto por cuatro categorías:

- **Ca:** es el valor menos severo y el rango de afectación esta dado por la lesión de una persona.
- **Cb:** representa lesione serias para una o varias lesiones.
- **Cc:** representa muerte de varias personas.
- **Cd:** fatalidad de múltiples personas.

El parámetro de tiempo de exposición (F) indica la fracción de tiempo que las personas expuestas al peligro se encuentran en el área del evento. Cuenta con dos categorías:

- **Fa:** cuando el tiempo d ocupación es aproximadamente de 10% o menor
- **Fb:** indica un riesgo mayor que Fa.

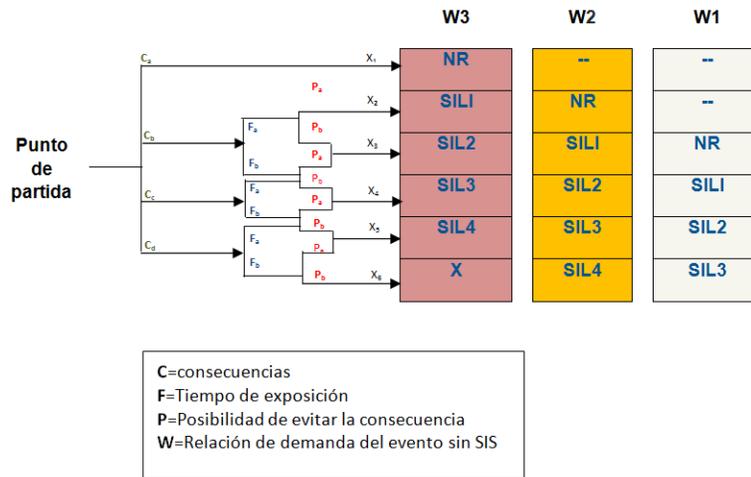


Figura 2.2 Figura de riesgo. [12]

El parámetro (P) es la posibilidad de que el personal evite el peligro, este parámetro refleja los métodos y logística implementada para que el personal pueda escapar del área peligrosa. Tiene dos categorías.

- **Pb**: representa un riesgo mayor que Pa.
- **Pa**: la norma [IEC 61511] proporciona una lista de cumplimientos para que la posibilidad pueda ser tomada como Pa.

El último parámetro (W) es la relación de demandas; es la frecuencia por año en que se presenta la consecuencia no deseada sin la función instrumentada de seguridad [SIF]. Tiene tres categorías:

- **W1**: indica una relación de demandas es de 0.03 por año.
- **W2**: indica entre 0.03-.3.
- **W3**: indica más de tres relaciones de demandas por año.

2.2 MARCO METODOLÓGICO [8]

El "Análisis de capas de protección" [LOPA], como ya se estableció anteriormente es un método para determinación del "Nivel de Integridad de Seguridad" [SIL] que requiere una metodología para su implementación. Parte del par causa/consecuencia y evalúa las capas independientes de protección necesarias para reducir el riesgo inicial a un riesgo aceptable.

Para determinar los “Niveles de integridad de seguridad” [SIL] se requiere de las siguientes fases:

- Determinar el riesgo Tolerable
- Desarrollar el análisis de riesgos
- Determinar si se cuenta con la información suficiente.
 - a. En caso de no contar con la información suficiente se debe proceder a otros análisis de riesgos.
 - b. En caso de tener la información suficiente, se transforma el análisis del método de HazOp a la metodología “Análisis de capas de protección” [LOPA].
- Seleccionar Evento Impacto.
- Se clasifican los niveles del Evento impacto.
- Identificar las causas iniciales
- Determinación de las causas iniciales y la frecuencia con la que suceden.
- Se estudia el par causa-consecuencia
- Identificar la “Capa de Seguridad Independiente” [IPL] y calcular la “Probabilidad de Falla Distribuida” [PFD]
- Obtenemos la posibilidad del evento final y se analiza.
- Se plantea la interrogante de que si se va a obtener otro par causa-consecuencia.
- En caso de no tener otro par causa-consecuencia, se calcula el riesgo.
- Determinar si el objetivo riesgo se cumple
 - a. De no ser así se selecciona el evento impacto.
 - b. Si el objetivo se cumple, se determina el “Nivel de Integridad de Seguridad” [SIL] objetivo.
- Si el “Nivel de Integridad de Seguridad” [SIL] es mayor a 2.
 - a. Se sigue al “Análisis Cuantitativo de Riesgos” [QRA]
 - b. De no ser así se compara el “Nivel de Integridad de Seguridad” [SIL] objetivo contra el entregado.

La metodología de LOPA se puede ver en la figura 2.3

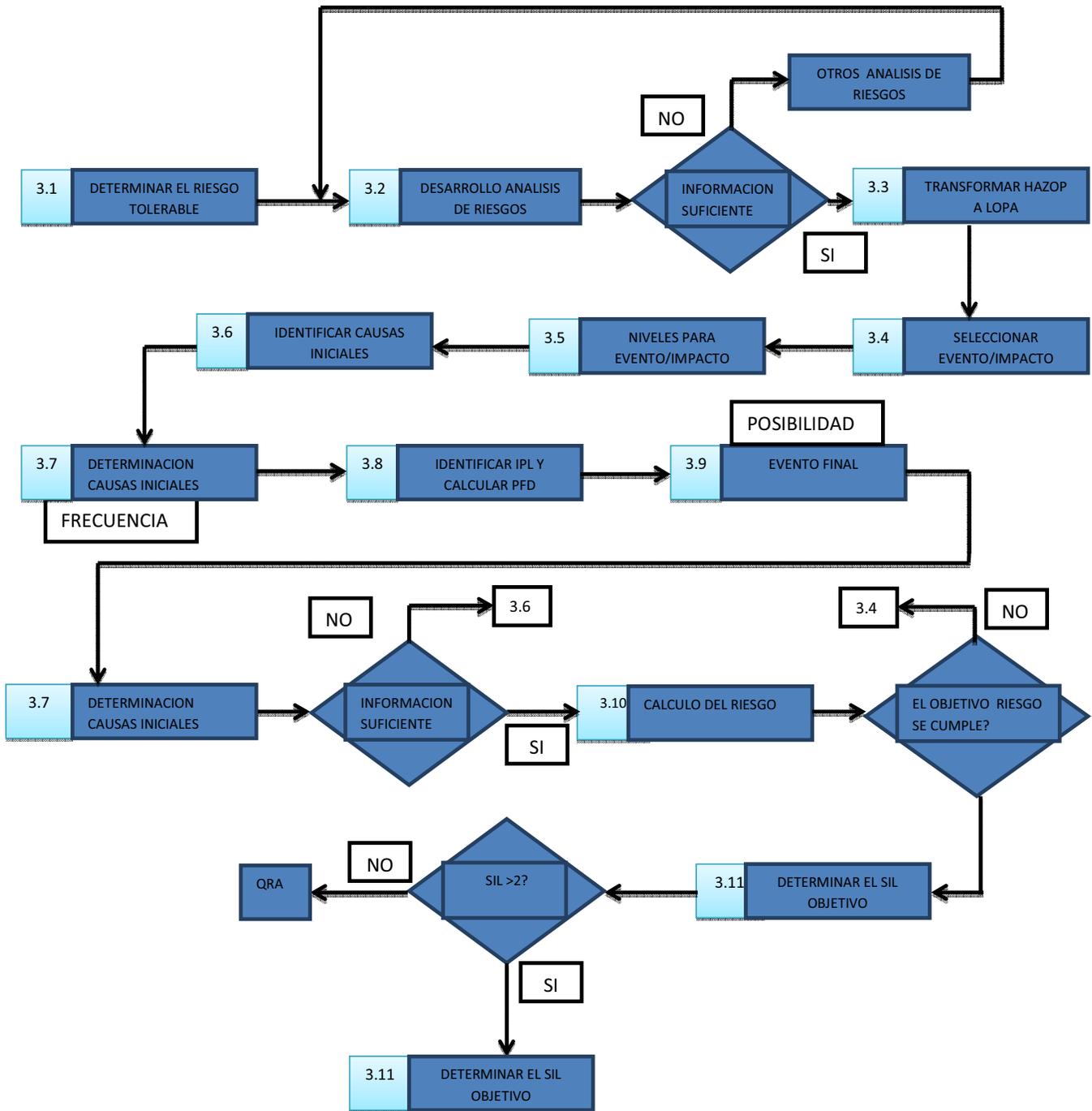


Figura 2.3 Metodología [LOPA] [8]

2.2.1 DETERMINAR EL RIESGO TOLERABLE [1]

El riesgo tolerable se define como “La probabilidad de sufrir una enfermedad o daño que puede ser tolerado durante algún tiempo, teniendo en cuenta los beneficios asociados y asumiendo que el riesgo es minimizado mediante apropiados procedimientos de control”

La determinación del Riesgo Tolerable es el primer paso de la metodología [LOPA] este valor nos indica donde debemos llegar.

La determinación del riesgo tolerable está definida por la empresa o por leyes locales. Generalmente hay tres formas de determinar el riesgo y son:

- **Riesgo individual:** es la probabilidad por año de que una persona normal sin protección resulte muerta en aquella localización como consecuencia de un accidente en la actividad peligrosa.
- **Riesgo social:** El riesgo social de una actividad peligrosa se define como la probabilidad por año de que un grupo determinado de personas muera debido a un accidente en la actividad peligrosa.
- **Riesgo corporativo:** Este refleja el impacto que tiene un proyecto sobre el riesgo de la compañía sin considerar los efectos de la propia diversificación de los accionistas.

Se expresa en unidades de Frecuencia/ Número de Año:

- **Número de fatalidades**
- **Número de incidentes**
- **Número de pérdidas económicas**
- **Número de días de producción perdidos**

Los corporativos fijan el valor de FRT basándose en los criterios de riesgo (individual, social, corporativo), pero cabe mencionar que no en todas las áreas de un proceso tienen el mismo nivel de riesgo. Para esto se debe ajustar el valor de FRT para cada una de las áreas de proceso, a este ajuste se le llama Frecuencia de Riesgo Tolerable (FRTF) y debe ser considerado para cada área del proceso analizado.

La siguiente ecuación permite calcular el FRTF.

$$FRTF = \frac{FRT}{PVH}$$

El valor de PVH puede ser expresado como:

-
- Número de pérdidas de vida
 - Probabilidad de pérdidas de vidas humanas

2.2.2 DESARROLLO DE ANÁLISIS DE RIESGO

Existe una diversidad de técnicas identificadas para la realización de un Análisis de Riesgos que ayudan a la identificación de peligros, causas de posibles amenazas, eventos no deseados, daños y consecuencias que se puedan producir. Las técnicas más utilizadas para el desarrollo de Análisis de riesgos y peligros en los procesos industriales son:

- ¿Qué Pasa Si? (What-If)
- Listas de Revisión. (Checklist)
- ¿Qué Pasa Si?/Listas de revisión. (What-If/Checklist)
- Estudios de Peligro y Operación Hazard and (Operability Study HazOp)
- Análisis de Modos y Efectos de Fallas (Failure Mode and Effects Analysis FMEA)
- Árboles de Falla. (Fault Tree Analysis)

Lo que tienen en común todas estas técnicas es de tener como prioridad el análisis e identificación de activos a proteger o evaluar, la evaluación de riesgos involucra comparar el nivel de riesgo detectado durante el proceso de análisis con criterios de riesgo establecidos previamente.

2.2.2.1 Técnica “¿Qué pasa si?” (What-if)

Es una técnica especialmente implementada para los procesos que se dividen en numerosas etapas, entre las etapas que se deben incluir son:

- Fallos de equipo
- Fallos de servicio
- Fallos de válvulas de seguridad
- Planes de emergencia
- Planes y programas de formación e información

Para aplicar correctamente este tipo de técnica se debe:

- Identificar los riesgos: Realizar una serie de preguntas, las cuales deben de respetar el patrón, como por ejemplo: ¿Qué ocurriría si la bomba se para?, ¿Qué ocurriría si el trabajador se equivoca?

- Evaluación y valoración: tras realizarse las preguntas se analizan los errores.
- Control: Finalmente identificado los riesgos, evaluados y analizados, se procede a la toma de decisiones para un control y/o eliminación de riesgos.

2.2.2.2 Técnica “Listas de revisión” (Checklist)

Es una ampliación del método ¿Qué pasa si? (what-if), se utiliza para plantas industriales con procesos más complejos, para identificar riesgos, deficiencias en equipos y se utiliza en inspecciones de seguridad.

La manera de poder aplicar correctamente este tipo de técnica, es elaborando listas de comprobación de peligros, como por ejemplo:

“Lista de comprobación de prevención de incendios”

Punto 1: Extintores insuficientes y/o mal atendidos	SI/ NO/ No Aplica
Punto 2: Rociadores sucios o corroídos	SI/ NO/ No Aplica
Punto 3: Existencia de equipos de detección de incendios	SI/ NO/ No Aplica

Debe de resaltarse que esta técnica no debe respetar necesariamente el patrón de formulación de preguntas como en la técnica ¿Qué pasa si? (what-if).

2.2.2.3 Técnica “Estudios de Peligro y Operación Hazard and Operability Study”.

La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y consecuencias de las desviaciones producto de las variables del proceso planteadas a través de unas palabras-guía que se van formulando en cada una de las etapas que conforman el diseño, proceso, procedimiento o sistema que pueden dar lugar al incumplimiento de los requisitos de diseño o de las condiciones de operación, esta técnica se debe de llevar a cabo a lo largo de diversas reuniones de equipos multidisciplinares. Se debe de tener en cuenta que el estudio de peligros y operatividad se debe realizar principalmente cuando ya se dispone de un diagrama completo del proceso previsto y cuando aún se pueden realizar cambios en el diseño. Estos son algunos ejemplos de las palabras – guía empleadas para la aplicación de esta técnica.

- Analizar que ocurre en el proceso o en el producto si se produce un aumento cuantitativo de una determinada variable
- Analizar que sucede si se produce el efecto inverso al previsto en relación con una determinada variable.

Estas palabras-guía se aplican a parámetros tales como: propiedades físicas de un material o proceso, condiciones físicas como temperatura, velocidad, presión, nivel, entre otras.

Esta metodología es aplicable a las etapas de diseño o a las de operación de un producto, proceso, procedimiento o sistema. La metodología trata de evaluar, en todas las líneas y en todos los sistemas, las consecuencias de posibles desviaciones en todas las unidades de proceso, tanto si es continuo como si es discontinuo.

2.2.2.4 Técnica “Análisis de modos y efectos de fallas (Failure Mode and Effects Analysis FMEA)

Esta técnica proporciona la orientación y los pasos que un grupo de especialistas debe seguir para identificar y evaluar las fallas potenciales de un producto o proceso, junto con el efecto que provocan éstas. A partir de lo anterior, el grupo establece prioridades y decide acciones para intentar eliminar o reducir la posibilidad de que ocurran las fallas potenciales que hagan vulnerable la confiabilidad del producto o el proceso.

Para llevar a cabo la correcta implementación de este tipo de técnica, se deben de realizar los siguientes puntos.

- Formar el equipo de especialistas que realizará el “Análisis de modos y efectos de fallas” delimitando al producto o proceso al que se le aplicará.
- Identificar y examinar todas las formas posibles en que puedan ocurrir fallas de un producto o proceso (identificar los modos potenciales de falla)
- Para cada falla, identificar su efecto y estimar la severidad del mismo.
- Encontrar las causas potenciales de la falla y estimar la frecuencia de ocurrencia de falla debido a cada causa
- Hacer una lista de los controles o mecanismos que existen para detectar la ocurrencia de la falla, antes de que el producto salga hacia procesos posteriores.
- Calcular el número prioritario de riesgo (NPR), que resulta de multiplicar la severidad por la ocurrencia y la detección.
- Establecer prioridades de acuerdo al cálculo desarrollado y decidir acciones para disminuir severidad y/u ocurrencia, o en el peor de los casos mejorar la detección, quedando documentado en un formato “Análisis de modos y efectos de fallas” (FMEA).

El formato se muestra en la figura 2.4

**ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE LA FALLA POTENCIAL
(AMEF DE PROCESO para el defecto de velo de flama en rollo de 135 mm.)**

Página: __1__ de __1__

Proyecto: M23 Proceso/No. Nombre: C32 - Bobinado Producto: Rollo de 135 mm
 Área responsable: Producción de Flujo de Color Líder del proyecto: J. Pérez
 Otras áreas involucradas: Ingeniería y Calidad Fecha de liberación: 1 de febrero 2007

AMEF #: 001
 Preparado por: J. Pérez / E. Glez. / J. Jiménez
 Fecha Amef original: 1 de febrero 2007
 Fecha Última revisión: 1 de febrero 2007

Descripción del proceso	Identificación	Propósito del proceso	Modo de la falla potencial	Efectos-Causa(s) Potenciales de la falla	SEVERIDAD	DELTA	Causa potencial de la falla	OCURRENCIA	Controles actuales	DETECCIÓN	NPR	Acciones recomendadas	Área/ Responsable/ Fecha de cierre	Resultado de acciones					
														Acciones tomadas	SEV	OCU	DET	NPR	
Paso A1	Ensamble del producto	Velo de flama	Marcas o colores en el negativo de la película	6		Desgaste bobinadora	3	Revisiones programadas, mantenimiento preventivo, certificación de entregas	2	36									
						Magazine defectuoso	7	Muestreo, inspecciones periódicas y carat de control	4	168	Cambio de diseño de Magazine o rediseñar la máquina	Ingeniería/ G. Varela 30-Mar-07							
						Tapa defectuosa	2	Revelado de una muestra aleatoria de cada charola	1	12									
						Felpa mal pegada	3	Muestreo y pruebas	5	90									
						Felpa incorrecta	2	Muestreo y pruebas	6	72									
						Mal manejo de producto terminado	3	Certificado de personal y auditorías de proceso	3	54									
						inspección muy severa	3	Apegarse al método adecuado	3	54									

Figura 2.4 Formato FMEA [3]

2.2.2.5 Técnica “Árboles de Fallas”

Esta técnica es de tipo deductiva, su efectividad dependerá de analizar el plan del sistema y capacidad de respuesta. Involucra un evento en específico para ser analizado, seguido por la identificación de todos los elementos asociados en el sistema que podría causar que este evento ocurriera.

Los árboles de falla proporcionan una representación simbólica conveniente de la combinación de eventos que producen la ocurrencia del evento de la cima, generalmente los árboles de falla se elaboran gráficamente con una estructura lógica de AND y OR, que ayuda a identificar causas potenciales de fracaso del sistema, antes de que los fracasos ocurran realmente.

2.2.3 CRITERIOS PARA CAMBIAR DEL MÉTODO HAZOP A LA METODOLOGÍA [LOPA][4]

El criterio que utiliza HaZop es el de evaluación de peligros preliminares para proporcionar un panorama general de los riesgos existentes, y no se lleva demasiado tiempo en su elaboración. Sin embargo, el análisis de capas de protección [LOPA] requiere de los datos recabados por el criterio de HaZop, en la tabla 2.11, se hace referencia de los datos que provee HaZop para cambiar a la metodología [LOPA] y que se ve ilustrada en la figura 2.5

Tabla 2.11 Información necesaria para cambiar de HaZop al criterio de análisis de capas de protección [LOPA].

Información requerida por LOPA	Información desarrollada en el HazOP
Impacto de los eventos	Consecuencias
Nivel de seguridad	Severidad de las consecuencias
Evento iniciante	Causa
Probabilidad del evento iniciante	Frecuencia de la causa
Capas de protección	Salvaguardas existentes
Requerimientos de mitigación adicional	Recomendaciones de nuevas salvaguardas

Fuente: Layer of Protección Analysis. [4]

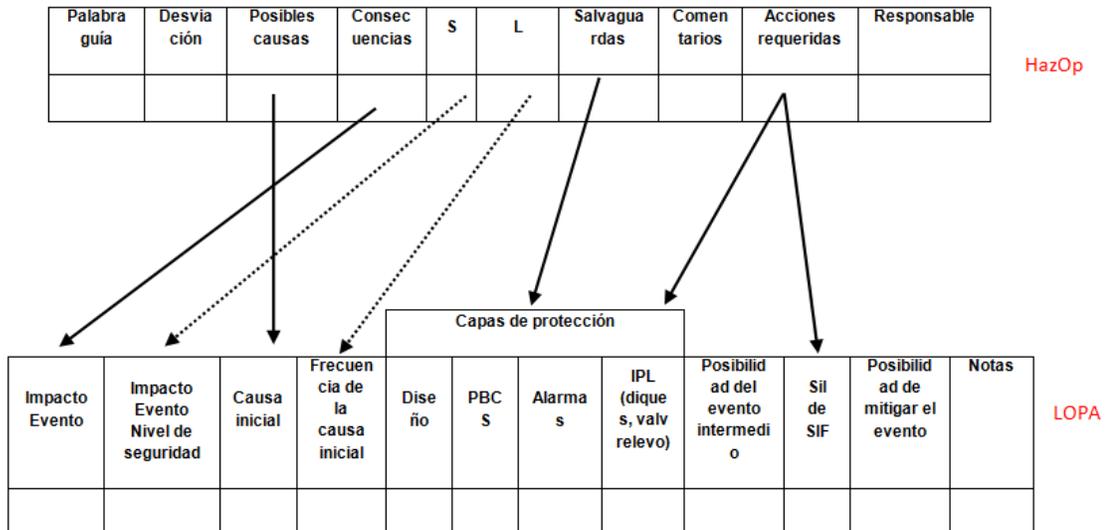


Figura 2.5 Campos de información recabados por HazOp para el análisis [LOPA] [4]

2.2.4 SELECCIONAR EVENTO/IMPACTO

El evento es el suceso relacionado a las acciones del ser humano, al desempeño del equipo y sucesos externos al sistema que pueden causar interrupciones y/o problemas. También es la causa o contribuyente de un incidente o accidente y al mismo tiempo también es la respuesta a la ocurrencia del evento iniciador.

El impacto es el efecto probable o cierto, positivo o negativo, directo o indirecto, reversible o irreversible, que se deriva de una o varias acciones con origen en las actividades industriales.

2.2.5 NIVELES PARA EVENTO/IMPACTO [6]

Los niveles de evento/impacto están definidos en una serie de criterios e indicadores para asegurar una información coherente de acontecimientos nucleares por parte de diferentes autoridades oficiales.

Hay siete niveles distintos (figura 2.6) de cero en la escala que se aplica en diferentes tipos de plantas donde se llevan a cabo procesos industriales que atente con el entorno que lo rodea. Los sucesos de nivel inferior (1 a 3), sin consecuencia significativa sobre la población y el medio ambiente, se califican de incidentes; los superiores (4 a 7), de accidentes. El nivel máximo corresponde a un accidente cuya gravedad es comparable a lo ocurrido el 19 de noviembre de 1984, en San Juan Ixhuatepec conocido como San Juanico. El nivel cero representa una desviación sin que afecte la seguridad del proceso.

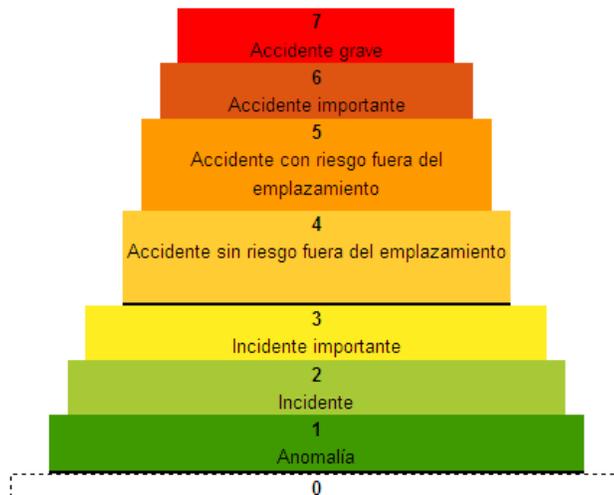


Figura 2.6 Niveles para Evento/Impacto. [6]

2.2.6 IDENTIFICAR CAUSAS INICIALES

Las causas iniciales, son las que propician las desviaciones del proceso elevándolas en cada uno de los niveles de evento/impacto ya mencionado en el punto 3.5, algunos ejemplos de causas iniciales son:

- Falta de mantenimiento.
- Falta de capacitación.
- No seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto al uso de los equipos.
- Falla de tres o más instrumentos simultáneamente, o error humano
- Falla espontanea de un solo tanque o recipiente del proceso.
- Falla de dos instrumentos o válvulas
- Combinación de fallas de instrumentos y errores del operador
- Una sola falla de una línea o equipo del proceso.
- Fugas en el proceso
- Falla en un solo instrumento o válvula
- Errores humanos que podrían resultar en descarga de material

2.2.7 DETERMINACIÓN DE CAUSAS INICIALES.

La determinación de las causas iniciales, es el motivo que propicio una desviación en el proceso y una vez identificado se determina la frecuencia en la que ocurre; Una causa inicial o falla se puede clasificar como de frecuencia de ocurrencia baja, frecuencia de ocurrencia moderada y frecuencia de ocurrencia alta.

La frecuencia de ocurrencia baja es una falla con una muy baja probabilidad de que ocurra dentro del tiempo de vida esperado de la planta.

Ejemplos:

- Falla de tres o más instrumentos simultáneamente, o error humano
- Falla espontanea de un solo tanque o recipiente del proceso.

La frecuencia de ocurrencia moderada es una falla o serie de fallas con una baja probabilidad de ocurrencia dentro del tiempo de vida esperando en la planta.

Ejemplos:

- Falla de dos instrumentos o válvulas
- Combinación de fallas de instrumentos y errores del operador
- Una sola falla de una línea o equipo del proceso.

La frecuencia de ocurrencia alta es una falla que puede ser razonablemente esperada a ocurrir dentro del tiempo de vida esperado de la planta.

Ejemplos:

- Fugas en el proceso
- Falla en un solo instrumento o válvula
- Errores humanos que podrían resultar en descarga de material

2.2.8 IDENTIFICAR LA CAPA DE PROTECCIÓN INDEPENDIENTE [IPL] Y CALCULAR LA PROBABILIDAD DE FALLA DISTRIBUIDA [PFD]^[10]

Los criterios para calificar una capa de protección [PL] como una capa de protección independiente [IPL] se puede ver en la siguiente figura 2.7

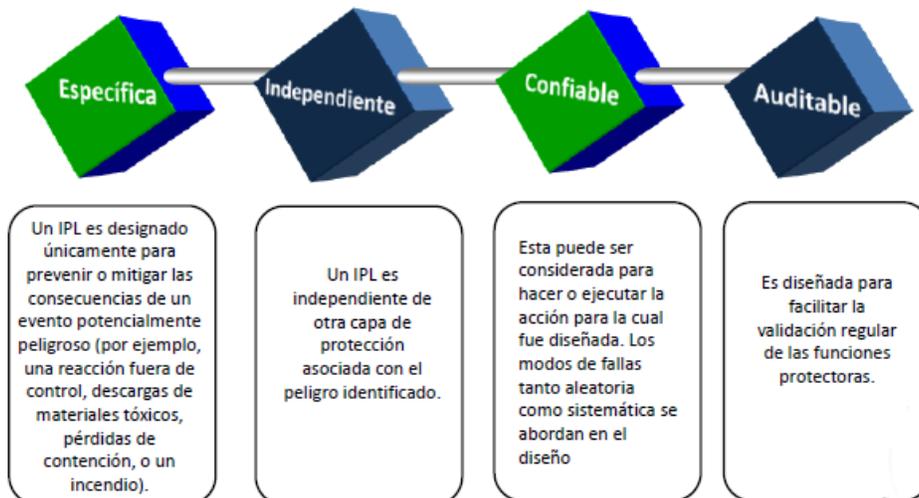


Figura 2.7 Criterios necesarios para calificar a una [IPL]. [10]

El cálculo del [PFD] está en base a las circunstancias y estado de ánimo en la que esté sometido el operario como se podrá ver en la siguiente tabla 2.12

Tabla 2.12 Valores de [PFD] del operador bajo diferentes circunstancias.

Valores de PFD

Capa de protección	PFD
Control Loop	1,0 x 10 ⁻¹
Desempeño humano (entrenamiento, sin estrés)	1,0 x 10 ⁻² a 1,0 x 10 ⁻⁴
Desempeño humano (Bajo estrés)	0,5 a 1,0
Respuesta del operador a las alarmas	1,0x10 ⁻¹
Clasificación de los recipientes a presión respecto a la máxima fuente de presión interna y externa	10 ⁻⁴ o superior. [Si la integridad de un recipiente se mantiene (se ejecutan programas de inspección y mantenimiento)]

Fuente: seguridad Funcional en plantas de proceso. [10]

2.2.9 EVENTO FINAL

El último paso en el análisis de las capas de protección [LOPA] es referente a adicionar todas las probabilidades de los eventos a mitigar en un **Riesgo total** o **Evento Final** debido a impactos de eventos serios y extensos que presenten el mismo peligro.

2.2.10 CÁLCULO DEL RIESGO [1]

El último paso en el análisis de las capas de protección [LOPA] es referente a adicionar todas las probabilidades de los eventos a mitigar en un **Riesgo total** debido a impactos de eventos serios y extensos que presenten el mismo peligro. Por ejemplo, se podría considerar la probabilidad del evento a mitigar para todos los eventos serios y extensos que causan un incendio, debiendo emplear las siguientes fórmulas:

$$\text{Riesgo de mortalidad debido a un incendio} = (\text{Probabilidad del evento mitigado de todas las descargas de material flamable}) \times (\text{Probabilidad de ignición}) \times (\text{Probabilidad de una persona en el área}) \times (\text{Probabilidad de una lesión fatal en el incendio})$$

Otro ejemplo sería el impacto de los eventos serios y extensos que puedan causar una descarga tóxica podrán adicionarse al emplear la siguiente fórmula:

$$\text{Riesgo de mortalidad debido a descargas tóxicas} = (\text{Probabilidad del evento mitigado de todas las descargas de material tóxico}) \times (\text{Probabilidad de una persona en el área}) \times (\text{Probabilidad de una lesión fatal en la descarga})$$

2.3 EJEMPLO DEL MÉTODO DEL ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN [LOPA][8]

Primeramente se hace la descripción de cada impacto de los eventos (consecuencias) determinada en el HaZop deberá ser registrada en la primer columna.

Tabla 2.13 Descripción del impacto de los eventos

#	1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	
	Capas de Protección												
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

Los niveles de severidad de menor (M) del nivel (1 a 2), serio (S) del nivel (3 a 5), o extenso (E) del nivel (6 a 7) serán seleccionados como se menciona en el tema 2.2.5 nivel de evento/impacto y será registrado en la columna 2.

Tabla 2.14 Nivel de Severidad

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	Capas de Protección												
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

Todas las causas iniciales del impacto del evento son listadas en la columna 3, los impactos de los eventos pueden tener muchas causas iniciales, es importante

listarlas a todas. Los valores de la frecuencia de los eventos iniciales ocurren en eventos por año y se indican en la columna 4.

Tabla 2.15 Causa y frecuencia del evento iniciante

#	1	2	3	4	5			6	7	8	9	10	11
					Capas de Protección								
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

El diseño del proceso es requerido para reducir la probabilidad de ocurrencia del impacto de un evento, se registrará en la columna 5. Un ejemplo de esto podría ser la chaqueta de un ducto o recipiente, la cual podría prevenir la descarga del material del proceso si se compromete la integridad del ducto o recipiente primario.

El sistema de control básico de proceso [SCBP] previene la ocurrencia del impacto del evento, cuando la causa inicial ocurre.

Tabla 2.16 Diseño general del proceso

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
					Capas de Protección								
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

El complemento de la columna 5 corresponde a las alarmas que alertan al operador y que requieren de su intervención. El cual también el operador depende del valor de probabilidad de falla sobre demanda [PFD], ya que depende de su estado de ánimo para determinar la capacidad que tenga de reacción ante una señal de alarma, en la tabla 3.2 del tema 3.8 se aprecia los valores de [PFD] del operador bajo diferentes circunstancias.

Tabla 2.17 Alarmas

#	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11	
					Capas de Protección								
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

Las capas de mitigación pueden reducir la severidad de los impactos del evento pero no prevenir la ocurrencia de este.

El equipo de la [LOPA] que está integrado por:

- Operador con experiencia, operando el proceso bajo consideración.
- Ingeniero con experiencia en el proceso.
- Administrador de manufactura
- Ingeniero en control de proceso
- Personal de mantenimiento, instrumentista / eléctrico, con experiencia en el proceso bajo consideración.
- Especialista en análisis de riesgos
- Una persona dentro del equipo deberá estar capacitada en la metodología [LOPA]

Deberá determinar la probabilidad de falla sobre demanda [PFD] apropiada para todas las capas de mitigación y listarlas en la columna 6. En la figura 2.8 se muestra los tipos de capas de mitigación.

Tabla 2.18 Mitigación

#	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11	
					Capas de Protección								
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]



Figura 2.8 Tipos de capas de mitigación.

Las capas de protección independientes [IPL] se registran en la columna 7, se deberán revisar los criterios para determinar si una capa de protección [PL] corresponde a una capa de protección independiente [IPL]. Solamente aquellas capas de protección que cumplan con las pruebas de disponibilidad, que sean específicas, independientes, confiables y auditables, serán clasificadas como capas de protección independientes [IPL].

Tabla 2.19 Capas de protección independientes

#	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11	
					Capas de Protección								
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

La probabilidad de los eventos intermedios es calculada al multiplicar la probabilidad del evento inicial (columna 4) por la [PFD] de las capas de protección y mitigación (columnas 5,6 y 7). El valor calculado estará en unidades de eventos por año y se registrará en la columna 8.

Si el valor de la probabilidad del evento intermedio es menor al valor del criterio del corporativo para eventos de este nivel de severidad, no se requerirá adicionar capas de protección.

Si el valor de la probabilidad del evento intermedio es mayor al del criterio del corporativo para eventos de este nivel de severidad, se requerirá implementar capas de protección.

Si se requiere un nuevo nivel de integridad [FIS], puede ser calculado al dividir el criterio de la instalación para el nivel de severidad del evento, por el valor intermedio de la probabilidad del evento. Una [PFD] para el nivel de integridad

[FIS] por debajo del valor obtenido, deberá seleccionarse como un máximo para el sistema instrumentado de seguridad [SIS] y se registrará en la columna 9.

Tabla 2.20 Nivel de seguridad

#	1	2	3	4	5				6	7	8	9	10	11
					Capas de Protección									
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas	

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

La probabilidad del evento mitigado será ahora calculada al multiplicar el valor de la columna 8 y 9, registrando el valor resultante en la columna 10. Esta secuencia continuará hasta que el equipo haya calculado la probabilidad del evento a mitigar para cada impacto de los eventos que hayan sido identificados.

Tabla 2.21 Probabilidad de mitigar el evento

#	1	2	3	4	5				6	7	8	9	10	11
					Capas de Protección									
	Descripción del impacto de los eventos	Nivel de severidad	Causa iniciante	Frecuencia del evento iniciante	Diseño general del proceso	S C B P	Alarmas	Mitigación adicional, acceso restringido	IPL adicionales de mitigación, diques, válvulas de alivio	Probabilidad de eventos intermedios	SIL para cada FIS	Probabilidad de mitigar el evento	Notas	

Fuente: Análisis de capas de protección LOPA. [8]

La experiencia de los especialistas de Análisis de riesgo y el conocimiento del equipo son agentes importantes en el ajuste de factores en las fórmulas para las condiciones y prácticas de trabajo de la planta y afectación a la comunidad.

El **Riesgo total** de este proceso podrá ser determinado al emplear los resultados obtenidos de la aplicación de las fórmulas.

Si el valor obtenido cumple con los criterios corporativos para la población afectada o bien, el valor es menor al criterio corporativo, en análisis de las capas de protección, está completo.

CAPÍTULO 3

DIAGNÓSTICO

CAPÍTULO 3 DIAGNÓSTICO

El presente capítulo describe la ubicación geográfica, la descripción y el resultado de la evaluación de las proyecciones que realizó la paraestatal del manejo de hidrocarburos, que abarca el proyecto integral Burgos así como también el análisis y diagnóstico de la planta criogénica de gas en cuanto a cada una de sus etapas de proceso, que va desde la etapa de extracción hasta la de compresión, describiendo el aporte y funcionamiento que tiene cada etapa en cuanto al proceso de gas, diagnosticando sus fallas o riesgos en el empleo de instrumentos o técnicas.

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA [18]

El Proyecto Integral Burgos se ubica en el Noreste de México y comprende el norte del estado de Tamaulipas, así como parte de algunos municipios de Nuevo León y Coahuila; colinda al Norte con los Estados Unidos de América y al Oriente con la margen occidental del Golfo de México. Cubre una superficie de 109,605 kilómetros cuadrados; queda entre las coordenadas geográficas de 24° 30' y 29° 30' de latitud Norte y 97° 00' y 102° 50' de longitud Oeste, como se muestra en la figura 3.1

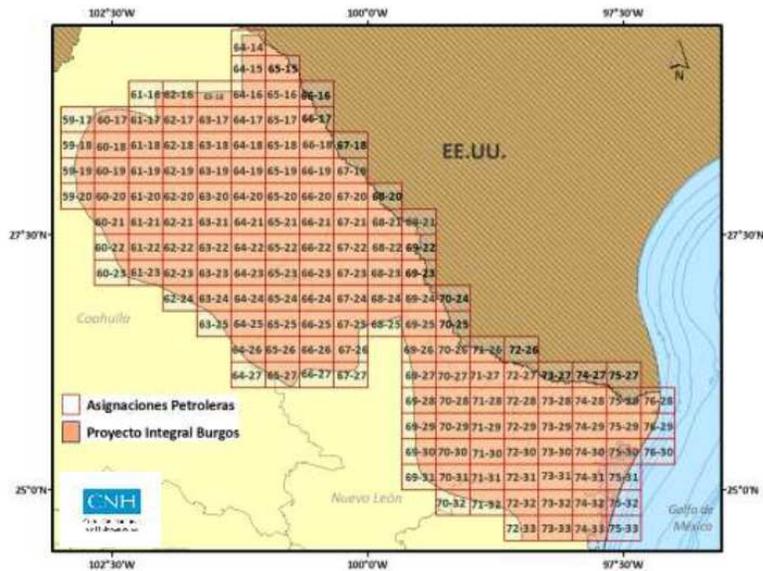


Figura 3.1 Ubicación Geográfica [16]

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO INTEGRAL BURGOS [18]

La cuenca de Burgos abarca 12 municipios de Tamaulipas, 10 de Nuevo León y 12 de Coahuila. En ella ha sido descubierto y se encuentra en la primera fase de explotación el yacimiento de gas natural no asociado más importante de México, que actualmente aporta mil 440 miles de millones de metros cúbicos diarios de gas: 61 por ciento de la producción nacional de este tipo de energético y 26 por ciento de la producción nacional de gas.

Se asienta en las regiones hidrológicas 24 y 25, establecidas por la Comisión Nacional del Agua, y comprende 7 cuencas hidrológicas.

La cuenca de Burgos tiene una superficie con posibilidades prospectivas de explotación de 120 mil kilómetros cuadrados y sumaría a la cuenca de Burgos las de Sabinas y Piedras Negras.

El proyecto Integral Burgos, comprende 5 áreas bien definidas: la primera corresponde al proyecto Reynosa (Oligoceno-Mioceno) que produce gas húmedo y poco aceite; la segunda corresponde al proyecto Camargo (Eoceno Superior y Oligoceno Inferior) que produce gas húmedo y gas seco; la tercera corresponde al proyecto Herreras (Paleoceno-Eoceno) que produce gas seco principalmente y poco gas húmedo; la cuarta comprende al proyecto Presa Falcón (Cretácico Superior y Paleoceno-Eoceno) que produce gas seco, y la quinta que corresponde al proyecto Múzquiz, integrado por la Cuenca de Sabinas (Jurásico Superior y Cretácico Inferior) produce solo gas seco y el área Piedras Negras (Cretácico Superior) que produce gas húmedo y aceite, figura 3.2

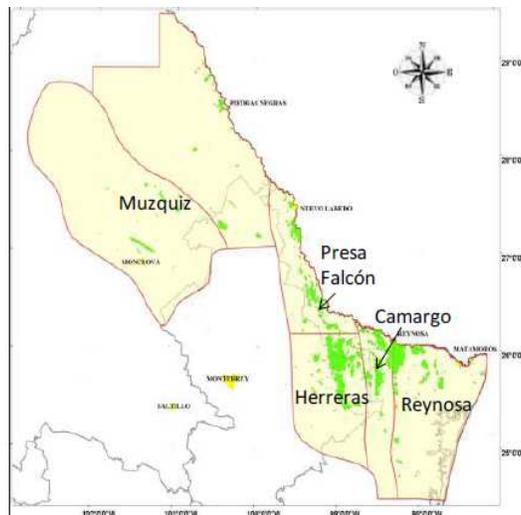


Figura 3.2 Áreas del proyecto Integral Burgos. [16]

De la información señalada por la paraestatal del manejo de hidrocarburos, se determinó que las obras y actividades relacionadas con el proyecto integral de burgos, se encuentran comprendidas en dos proyectos ambientales:

- Proyecto Integral Cuenca de Burgos 2004-2022.
- Proyecto Regional Cuenca de Sabinas Piedras Negras 2007-2027.

En relación con estos proyectos, la paraestatal del manejo de hidrocarburos obtuvo las siguientes autorizaciones:

- Oficio resolutivo S.G.P.A./DGIRA.DEI.2440.04, de fecha 28 de septiembre de 2004, por el que la DGIRA autoriza de manera condicionada la realización del “Proyecto Integral Cuenca de Burgos 2004-2022”, el cual establece el desarrollo de 13,657 obras en un periodo de 19 años (2004-2022), las cuales se dividen de la siguiente forma: 6,493 pozos, 5,897 líneas de descarga, 230 gasoductos, 943 sistemas de producción (estaciones de compresión y recolección) y 154 sistemas de inyección de agua y trasiegos.
- Oficio resolutivo S.G.P.A./DGIRA.DEI.1666.07 de fecha 7 de septiembre de 2007, por el que la DGIRA autoriza de manera condicionada la realización del “Proyecto Regional Cuenca de Sabinas Piedras Negras 2007-2027”, el cual establece el desarrollo de 7,122 obras en un periodo del 2007 al 2027, las cuales se dividen de la siguiente forma: 3,214 pozos y caminos de acceso, 3,214 líneas de descarga, 307 ductos, 319 estaciones y 68 sistemas de inyección.
- Primera modificación al “Proyecto Regional Cuenca de Sabinas Piedras Negras 2007-2027”, correspondiente al Oficio S.G.P.A./DGIRA/DG/4199/08 emitida el 19 de diciembre de 2008, en la cual la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) avala la inclusión a la superficie efectiva autorizada para la ejecución del Proyecto (27,935 km²) el área correspondiente a la porción de las Regiones Terrestres Prioritarias (5,432 km²) comprendidas dentro del polígono establecido como área de estudio en el Manifiesto de Impacto Ambiental modalidad Regional (MIA-R).

La paraestatal del manejo de hidrocarburos envió a solicitud de la CNH, los oficios resolutivos correspondientes a este proyecto. La Figura 2.2 muestra la ubicación de la poligonal del proyecto, el área autorizada ambientalmente y las asignaciones del Proyecto Integral Burgos.

Considerando todo lo expuesto, se concluye que el Proyecto Integral Burgos en sus componentes de exploración y explotación, cuenta de manera parcial con las autorizaciones en materia de impacto y riesgo ambiental para la realización de las actividades autorizadas en los oficios resolutivos correspondientes emitidos por la autoridad (SEMARNAT).

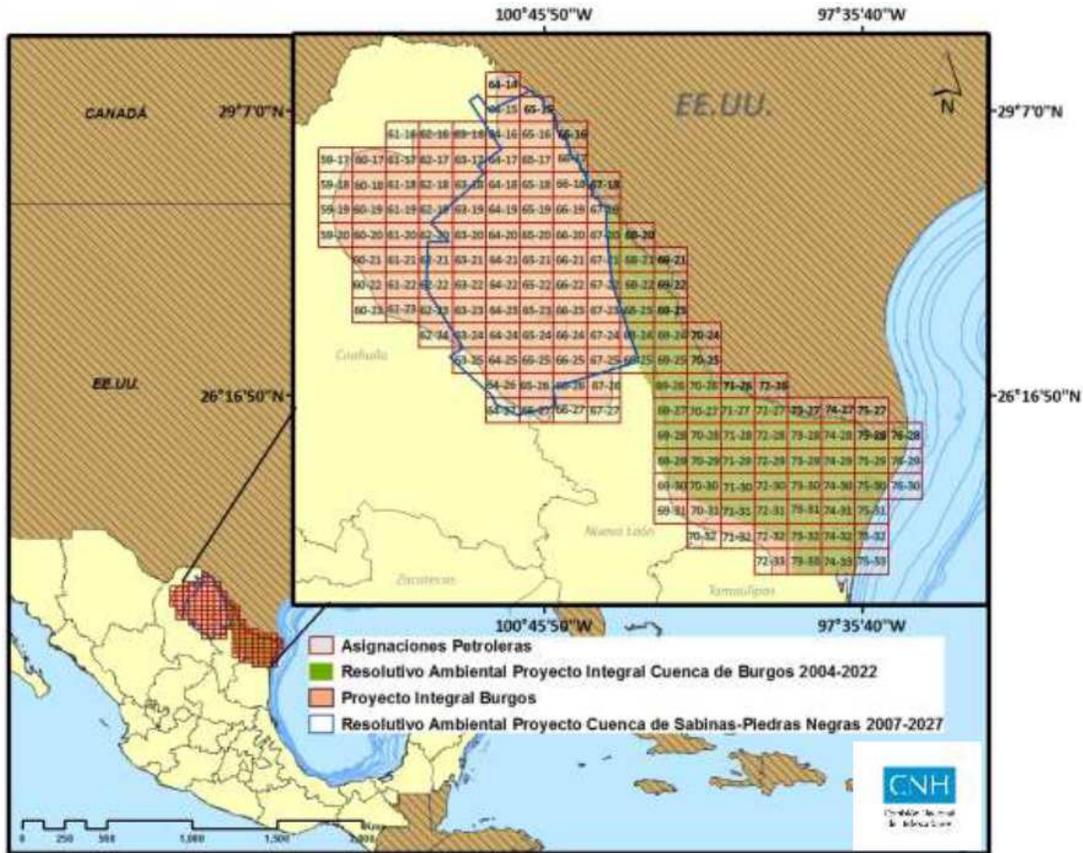


Figura 3.3 Ubicación del proyecto y las asignaciones del Proyecto Integral Burgos. [16]

3.3 EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL PROYECTO INTEGRAL BURGOS [18]

La evaluación por parte de la paraestatal del manejo de hidrocarburos, manifiesta la incorporación de reservas de gas seco, gas húmedo y aceite, en el periodo 2011–2028, diagnosticando un volumen que varía de 1,602 a 2,138 millones de barriles de petróleo crudo; con un valor medio de 1,778 millones de barriles de petróleo crudo, en rocas de edades Jurásica, Cretácica y Terciaria.

Se evalúa también la perforación de 879 pozos exploratorios, la realización de 160 estudios geológicos y 20 estudios geofísicos, que implican una inversión total

exploratoria de 71,604 millones de pesos, de los cuales 66,580 millones de pesos corresponden a inversión estratégica y 5,024 millones de pesos están considerados para inversión operacional.

El diagnóstico de los recursos que se pretenden obtener en cada área que constituye el proyecto integral Burgos se muestra en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Diagnóstico de recursos que se espera recaudar

Áreas del proyecto	Recursos prospectivos a incorporar (millones de barriles de petróleo crudo)
Reynosa	502
Camargo	342
Herrerias	299
Presa Falcón	285
Múzquiz	350
Total	1,778

El total, es el valor medio que se espera obtener en un plazo de 18 años (2011-2028). Estos recursos que se espera obtener varían entre aceite, gas y petróleo.

La paraestatal del manejo de hidrocarburos, evaluó las siguientes tres alternativas para el método de extracción en base a los recursos económicos que tiene.

Alternativa 1. Terminación “tubingless”.

Se basa en la utilización de pozos con terminación “tubingless” (figura 3.4), la cual impacta directamente en la reducción del costo de perforación hasta en un 30%, excluyendo los costos de fracturamiento hidráulico, los indirectos y los gastos administrativos; entre las ventajas operativas se pueden citar la reducción de los volúmenes del lodo, fluidos de terminación, cemento y tubería de acero empleados. Las ventajas económicas son la reducción de costos por menores volúmenes de lodo, cemento, acero, entre otros, y la reducción del tiempo necesario para empezar la producción.

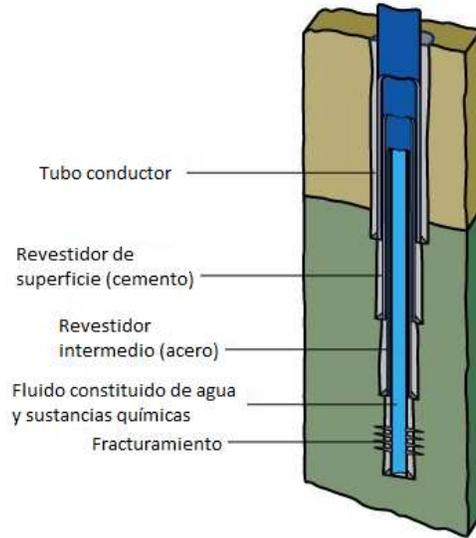


Figura 3.4 Terminación "Tubingless" [16]

Alternativa 2. Perforación de pozos no convencionales.

Se considera la perforación de pozos no convencionales, principalmente para incrementar la perforación de localizaciones horizontales y multilaterales (figura 3.5), lo mismo que la utilización de macroperas para perforar de 2 a 4 localizaciones. La ventaja de esta opción estriba en el alto índice de productividad de los pozos con alto ángulo de desviación y horizontales al tener mayor contacto con los yacimientos productores, para lo cual, se requieren herramientas de geo-navegación avanzadas, registros azimutales y periscopicos.

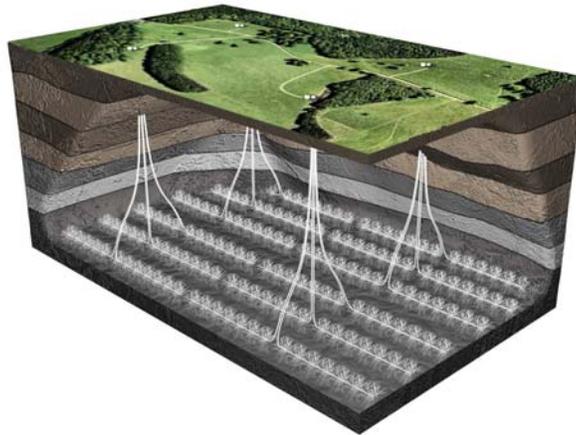


Figura 3.5 Perforación de pozos no convencionales [16]

Alternativa 3. Perforación convencional con aparejo de producción, produciendo por dos ramales.

Considera la perforación convencional con aparejo de producción, produciendo por dos ramales, tubería de producción y espacio anular. El diseño de los pozos de esta opción, consiste en un arreglo de tuberías capaz de explotar independientemente los yacimientos profundos cuyas presiones superan las 5,000 libras por pulgada cuadrada en la tubería de producción y de 3,000 libras por pulgada cuadrada por el espacio anular, entre tuberías de 5½" y 2⅞".

Una vez evaluadas las alternativas para la componente de extracción, la paraestatal del manejo de hidrocarburos identificó que la mejor alternativa por el ahorro económico y el menor tiempo de puesta en marcha es cubierta por la número 1.

3.4 DIAGNÓSTICO DE LA PLANTA CRIOGÉNICA DE GAS

La planta criogénica de gas ubicada en Cuenca de Burgos, se divide en diferentes áreas de proceso, que van desde la extracción hasta el almacenamiento del gas natural, el diagrama que representa el proceso del gas natural que se desarrolla en cuenca de Burgos se muestra en la figura 3.11; en cada área de proceso se describe la contribución que realizan en el tratamiento del gas natural, así como también el diagnóstico de fallas o riesgos. El proceso y las áreas de la planta de gas natural se describen a continuación.

3.4.1 PROCESO DEL GAS NATURAL

El proceso de producción del gas natural no comienza por la extracción mediante perforaciones en pozos terrestres u océanos, comienza en la etapa de exploración para evitar pérdidas de recursos materiales y económicos, posteriormente se hace la perforación para extraer el gas natural y darle un tratamiento adecuado para su fácil almacenamiento y compresión.

Exploración

La exploración se lleva a cabo analizando la composición del suelo, comparándolas con otras muestras sacadas de diferentes zonas en donde ya se ha encontrado gas natural.

En la planta de gas ubicada en Cuenca de Burgos, se utilizó la técnica de prospección geofísica, que consiste en producir artificialmente ondas sísmicas

con una explosión pequeña sobre la superficie terrestre, las ondas sísmicas se propagan a todas direcciones y las ondas generadas llegan al receptor como onda directa, onda reflectada u onda refractada teniendo buenos resultados en la localización de los hidrocarburos.

Extracción

El gas natural se extrae de pozos de petróleo o fracturando la corteza terrestre, que puede efectuarse en tierra o mar. Una vez encontrado el gas natural, debe ser extraído de forma eficiente, ya que es común que el gas natural esté bajo presión y salga de un pozo sin intervención externa. El método de extracción implementado en Cuenca de Burgos es el de fracturación hidráulica, que consiste en el uso aproximado de 15 millones de litros de agua que al combinarse con las sustancias químicas necesarias fracturan la corteza terrestre, dejando salir la acumulación de gas natural del subsuelo, o también en el caso de venir asociado con petróleo.

Tratamiento

El tratamiento consiste en la remoción de condensados, separación, endulzamiento y acondicionamiento del gas natural con la finalidad de transformarlo en diferentes tipos de energía útil (figura 3.6), como gas seco, gas licuado de petróleo y gasolina natural, para diferentes aplicaciones. Este proceso tiene como prioridad la extracción de los elementos líquidos del gas natural y posteriormente de una separación entre los diferentes elementos que los componen.

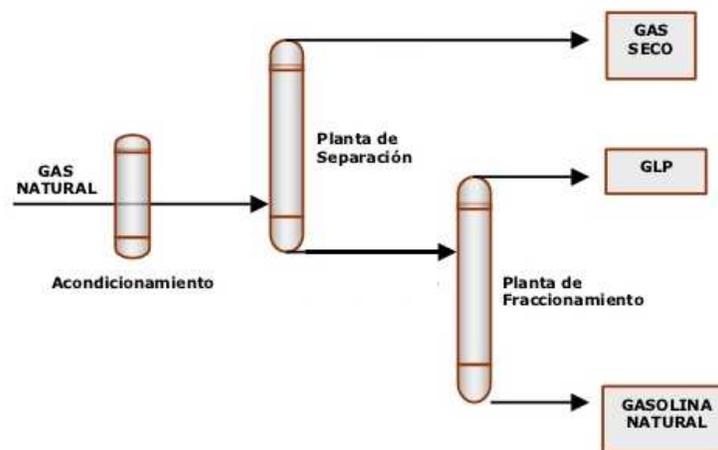


Figura 3.6 Importancia del tratamiento y separación en el proceso de gas natural [16]

La separación que se lleva a cabo en la planta de gas en Cuenca de Burgos se subdivide en diferentes procesos, comenzando por la remoción de condensados y agua. Los condensados son llamados también gasolina natural, porque se compone de hidrocarburos cuyo punto de ebullición está en el rango de la gasolina, la composición de estos hidrocarburos comprende de ácido sulfúrico, Mercaptanos, dióxido de carbono, Alcanos, Ciclohexano y Aromáticos (benceno, tolueno, xileno, etilbenceno). En la figura 3.7 se muestra de forma gráfica de la remoción de condensados y agua.

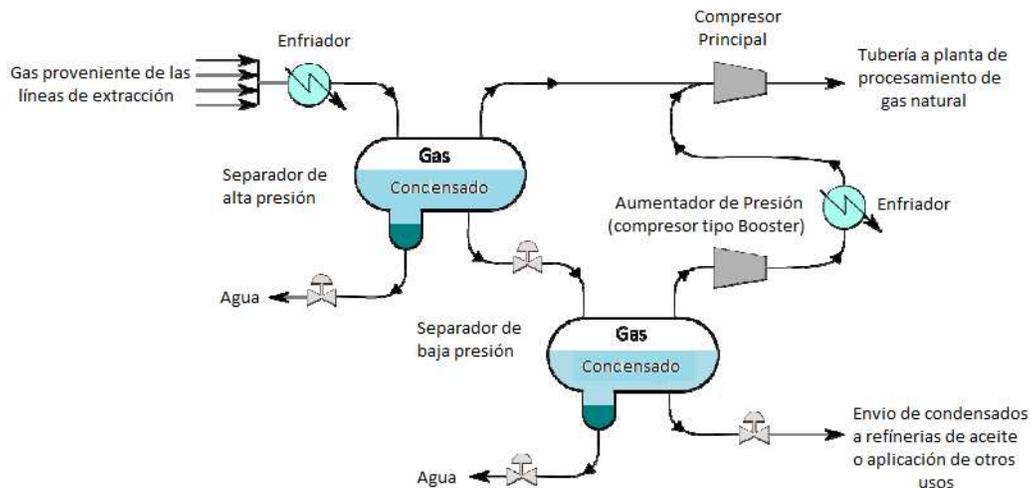


Figura 3.7 Remoción de condensados y agua [16]

La siguiente etapa se denomina endulzamiento. El endulzamiento se hace con el fin de remover los remanentes del ácido sulfúrico y el dióxido de carbono de la primera etapa de separación (remoción de condensados y agua), se denomina endulzamiento porque se remueven los olores amargos y sucios. Los olores amargos son provocados por la presencia de gases ácidos y estos a su vez proliferan por la presencia de agua. Lo que se obtiene en esta etapa de separación es gas dulce, gas húmedo y gases ácidos.

El proceso de endulzamiento que se lleva a cabo en la planta de gas en Cuenca de Burgos se denomina "Tratamiento de gas con aminas", en la figura 3.8 se muestra cómo se lleva a cabo esta etapa de proceso.

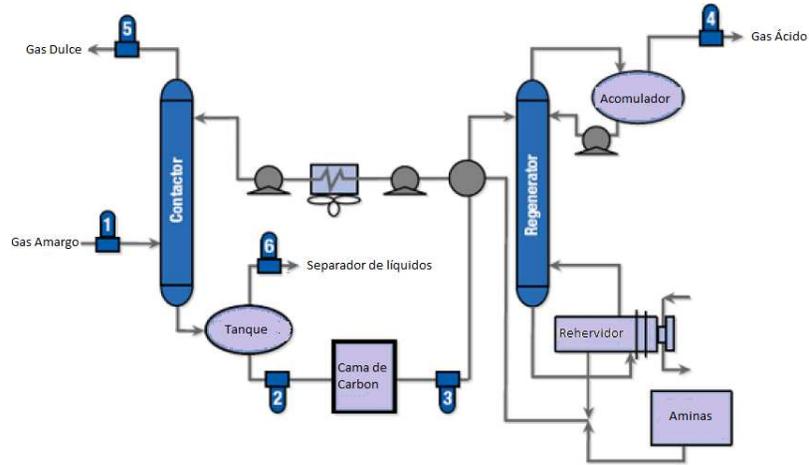


Figura 3.8 Endulzamiento [10]

Ya teniendo el gas endulzado y libre de condensados, se procede a la última etapa de separación denominada “Destilación criogénica”, que tiene como objetivo el rechazo y eliminación de nitrógeno.

El proceso comprende de pasar el gas natural por un separador de alta presión y una unidad de deshidratación para bajarle el contenido de agua que pueda tener de los procesos anteriores, posteriormente se envía a un intercambiador de calor y a un separador de baja temperatura, la importancia de llevar a cabo de manera correcta esta etapa de proceso garantiza la eliminación de:

- Toxicidad del Ácido Sulhídrico
- Corrosión por presencia de dióxido de carbono
- Formación de dióxido de azufre en la combustión, que es altamente tóxico y corrosivo
- Disminución del poder calorífico del gas

En la figura 3.9 se muestra el diagrama de la etapa de “Destilación criogénica”.

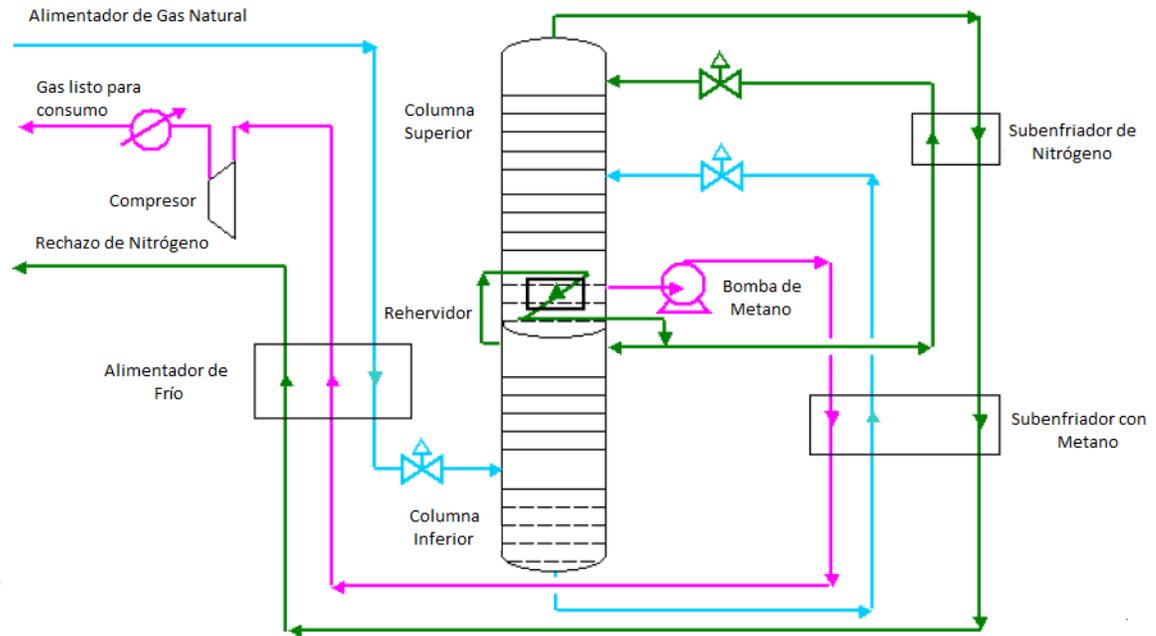


Figura 3.9 Destilación Criogénica [10]

Transporte y almacenamiento

Una vez tratado, el gas natural pasa a un sistema de transmisión para poder ser transportado hacia la zona donde será almacenado. El transporte es vía terrestre a través de gasoductos de acero con un diámetro de 20 a 42 pulgadas. Debido a que el gas natural se mueve a altas presiones, existen estaciones de compresión a lo largo de los gasoductos para mantener el nivel necesario de presión.

El gas natural es comprimido para ser enviado a través de ductos. El área de compresores está formada por cinco trenes o sistemas de compresión de gas, cada tren consiste en tres etapas de compresión que aumentan la presión del gas de 1100 psig en la succión hasta 9000 psig en la descarga. El caudal suministrado de descarga es de 533.33 MMPCGHD (millones de pies cúbicos gas húmedo diario). Los trenes de compresión presentan la estructura mostrada en la figura 3.10

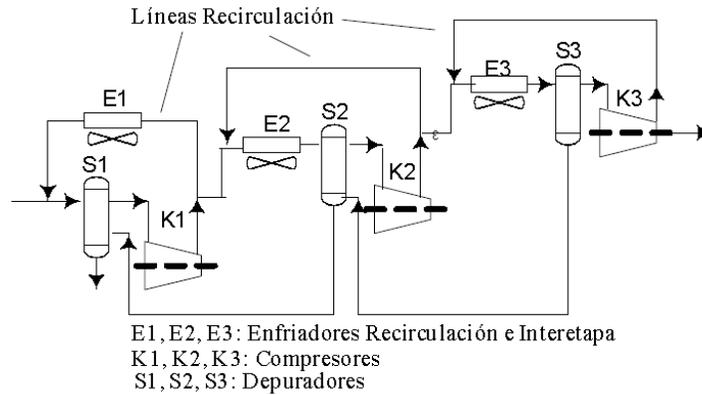


Figura 3.10 Diagrama esquemático de un tren de compresión. [10]

Cada tren de compresión posee indicadores locales y remotos de variables como presión de gas, temperatura de gas, vibración y temperatura en cojinetes de los compresores, nivel en los depuradores, realizando la supervisión de cada uno de los cinco trenes de compresión. Cada etapa está conformada por un compresor respectivo, tres enfriadores empleados para disminuir la temperatura del gas proveniente de las descargas de los compresores y tres depuradores para separar los líquidos que puedan condensarse en el gas, que al comprimirse, se empiezan a condensar los compuestos más pesados, formando líquidos que viajan junto al gas.

El gas natural producido en Cuenca de Burgos se almacena a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión atmosférica en tanques criogénicos especiales para baja temperatura. La constitución de los tanques utilizados por la paraestatal de manejo de hidrocarburos en Cuenca de Burgos es de doble pared; una pared externa de hormigón armado, recubierto con acero al carbono, y una pared interna de acero niquelado al 9%.

En la figura 3.11 se muestra como está constituido un tanque criogénico, como los que son utilizados en Cuenca de Burgos.

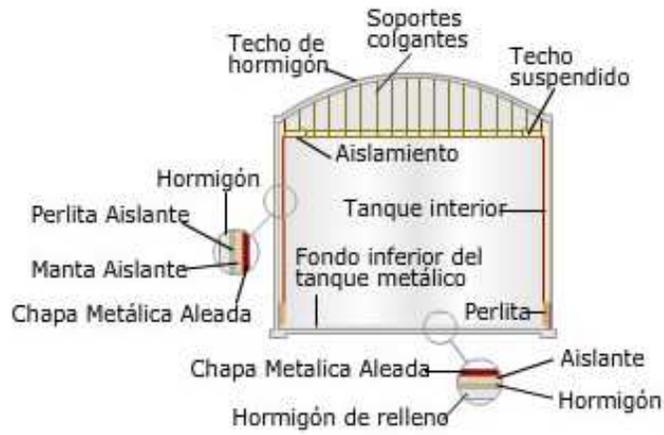


Figura 3.11 Elementos que conforman a un Tanque criogénico [6]

El diagrama que muestra el proceso del gas natural, se muestra en la figura 3.12

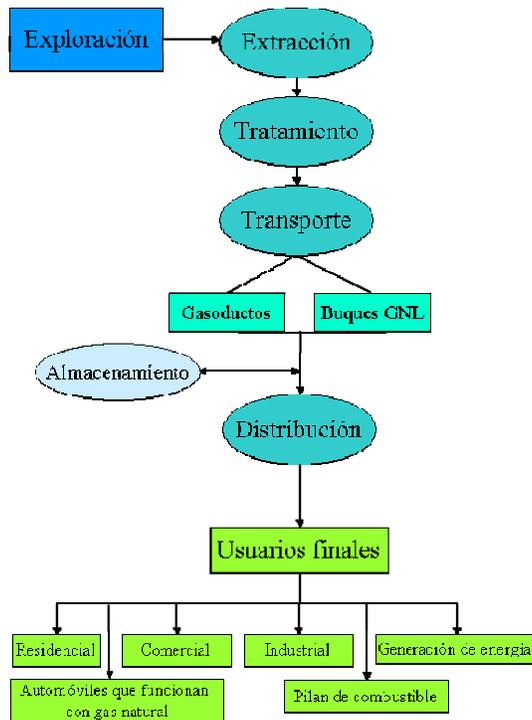


Figura 3.12 Proceso del gas natural

3.4.2 RIESGOS EN EL ÁREA DE EXTRACCIÓN

Las líneas de extracción instaladas en la planta criogénica de gas ubicada en Cuenca de Burgos, transportan gas natural en condiciones fuertemente variables. Esto quiere decir que varían de un producto (refiriéndose al gas) seco o húmedo, refiriéndose a este último el cual contiene agua, ácido sulfúrico, dióxido de carbono e hidrocarburos líquidos que contienen partículas en una amplia gama de flujos y presiones. Dichas líneas de extracción tienen instalados instrumentos de medición llamados “placas de orificios”, considerados como puntos de medición para el monitoreo del caudal. Sin embargo, se detectaron algunos problemas como:

- Desgaste y consumo considerables de las placas de orificios, que causan una deriva de los valores medidos.
- Atascamiento de las líneas de impulsión de presión diferencial.
- Pérdidas de presión causando mayores costes energéticos
- Baja tasa de reducción y gamas dinámicas restringidas

Es muy importante la eliminación de agua libre en las líneas de extracción, ya que de la boca del pozo además de salir gas natural, salen grandes volúmenes de agua altamente corrosiva. El instrumento de medición empleado para la medición de dichos volúmenes de agua se denomina “flujómetros de turbina”, el problema que se diagnostica en este tipo de instrumento es la alta probabilidad de falla ante un flujo pulsante y que las partes en contacto con el agua presentan un desgaste y corrosión frecuentes.

Ahora bien para extender la vida útil de extracción de los pozos en Cuenca de Burgos se usa el método de “inyección de agua”. Esto con la finalidad de aumentar la presión del yacimiento y mejorar la tasa de producción, las cantidades de agua inyectada se monitorean con flujómetros y se retransmiten al sistema de control del proceso. A causa de la alta presión de entrada (por donde es introducida el agua), las paredes de las tuberías tienen una cédula de 40mm+.

Los instrumentos empleados en esta etapa de proceso son flujómetros sumergibles, como las placas de orificios mostrado en la figura 3.12 e instrumentos de presión diferencial que además se encuentran sujetos a abrasión extensiva a causa de los flujos de agua altamente presurizada.



Figura 3.13 Instrumento de medición sumergible “Placa de Orificio” instalado en líneas de inyección [16]

El diagrama que representa los procesos que conforman la etapa de extracción y que fueron descritos se muestran en la figura 3.14

1. Medición de flujo en boca del pozo
2. Eliminación de agua libre
3. Inyección de agua

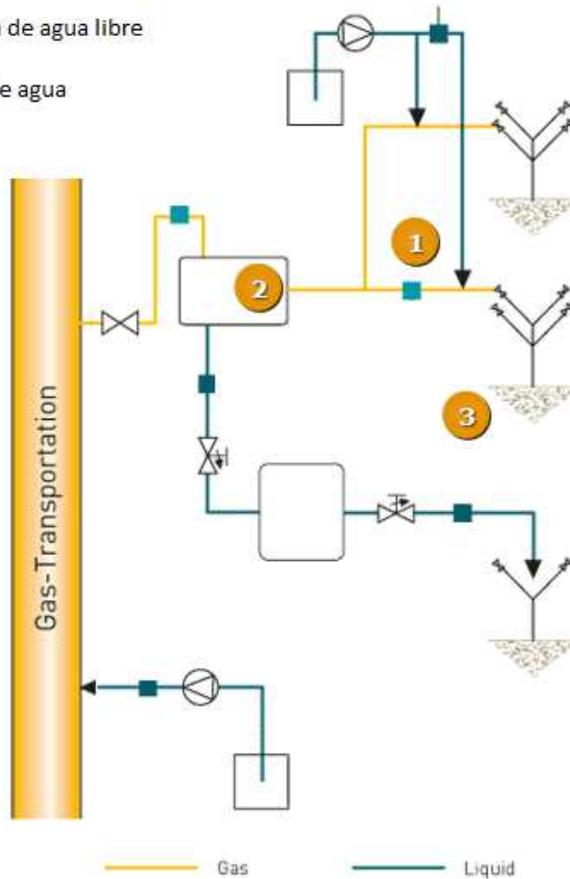


Figura 3.14 Proceso de extracción

Por otra parte, la técnica de extracción denominada “Fracturación Hidráulica” implementada en la extracción de gas natural en los yacimientos de Cuenca de Burgos, podría contaminar los mantos freáticos debido a que la capa de concreto que recubre las paredes del pozo pueda fracturarse por la presión del agua contaminada (líquido frático) y esta a su vez se fugue contaminando los mantos acuíferos, no pudiendo desarrollar cualquier tipo de mantenimiento (predictivo, preventivo o correctivo), debido a la profundidad en donde se desarrolla el proceso y las sustancias químicas empleadas.

Esta técnica comprende de una inversión de 15 millones de litros de agua combinada con otras sustancias químicas para la fractura de la corteza terrestre y la posterior extracción del gas.

El riesgo que se diagnostica en la técnica de extracción es la contaminación de los mantos acuíferos, ya que son explotados para el riego de cultivos y el consumo humano, pudiendo provocar cáncer, daños en la reproducción humana y disminución de la calidad del agua al hacerla no apta para el consumo humano.

En la figura 3.15 podemos apreciar de manera gráfica como se implementa la técnica de “Fracturación Hidráulica”.

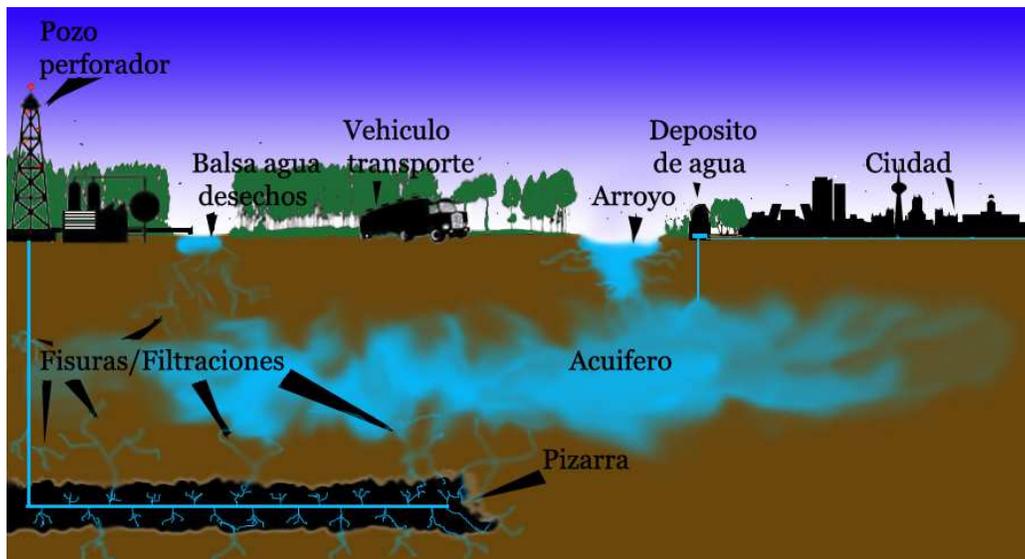


Figura 3.15 Técnica de Fracturación Hidráulica o Fracking. [16]

3.4.3 RIESGOS EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO

Si el contenido de vapor de agua en el gas es muy alto en la etapa de separación, se corre el riesgo que en los gasoductos se formen hidratos de metano sólidos, en las zonas donde la presión sea elevada y la temperatura reducida, generando grandes problemas en los ductos de transporte. Este factor es el más importante en cuanto a la falla de ductos en el área de tratamiento, otros factores son la corrosión prematura provocada por los residuos químicos de la etapa de extracción, los errores humanos en la construcción y ensamblaje de los ductos y los peligros externos a causa de las vibraciones que provocan los motores de alta potencia de los compresores.

Los riesgos existentes por presencia de corrosión abarca el reemplazo de los equipos afectados, paros no programados de la planta, cambios drásticos operacionales, contaminación y pérdida de la amina utilizada en la etapa de endulzamiento, mayor inversión en el material de los ductos al sustituir el acero, impacto ambiental y salud.

3.4.4 RIESGOS EN EL ÁREA DE ALMACENAMIENTO

Para poder almacenar grandes cantidades de gas natural, se debe de criogenizar a una temperatura de -161°C obligando al gas natural de pasar de un estado gaseoso a un estado líquido, reduciendo así 600 veces el volumen que ocuparía en estado gaseoso. Es a esta temperatura en donde existe el riesgo de congelamiento criogénico para el personal, este riesgo está presente cuando el gas de proceso está cerca o por debajo de una temperatura de 0°C , hasta la temperatura de operación más baja de la planta en donde tiene acceso el personal de -40°C . Si el fluido en caso de fuga o accidente es venteado a la atmósfera, puede ocurrir una expansión suficiente como para reducir la temperatura del área en donde ocurre la fuga a niveles de riesgo, y en caso de tener contacto físico con el gas natural estando a una temperatura de -161°C puede provocar quemaduras de tercer grado.

En caso de persistir la fuga en el área de almacenamiento, el gas se encontrará a una temperatura de -161°C (estado líquido) y a presión atmosférica, dependiendo del tamaño de donde se produce la fuga, puede vaporizarse el gas en caso de que sea una fuga de tamaño menor o formar una piscina de líquido en caso de que sea una fuga de tamaño considerable, el gas natural que se vaporiza, forma un gas denso como resultado de su cambio brusco de temperatura, la nube de vapor

se dispersara hasta encontrar una fuente de ignición, consumiendo por completo todo el entorno en el que se haya desplazado.

3.4.5 RIESGOS EN EL ÁREA DE COMPRESIÓN

El gas viaja por los ductos a velocidades muy altas debido a la presión creada por los compresores, formando tapones o slugs. Los ductos se encuentran sometidos a altas temperaturas durante el día causando que la presión del gas natural que están conteniendo aumente de forma significativa, esto a mediano plazo provoca fugas de gas natural en el proceso.

Las bridas que son la unión de los ductos y es en donde se manifiesta las fugas a causa de las altas presiones a la que viene el gas, presentan otros riesgos como lo es la tensión irregular en los pernos. Esto es un procedimiento incorrecto de apriete/ensamble o un difícil acceso a los sujetadores, ya que puede dejar algunos pernos flojos mientras otros están demasiado apretados, lo que puede aplastar y dañar el empaque.

Otros riesgos que se diagnostican en la unión de los ductos son el centrado incorrecto del empaque, caras de bridas sucias o dañadas y altos niveles de vibración. En el centrado incorrecto del empaque, si se instala fuera de su centro en relación con las caras de las bridas, el empaque se comprime de forma irregular y propicia que la junta tenga fugas.

Se diagnostica un riesgo en las caras de bridas sucias o dañadas, la oxidación, ralladuras, suciedad, salientes, salpicaduras de soldadura en superficies de asientos de los empaques, son causantes de una fuga de brida.

Un factor más de riesgo se ubica en la unión de los ductos, son los altos niveles de vibración, debido a las excavaciones de nuevos pozos, causa a la larga una fuga de brida debido a que la tensión en los pernos de apriete va disminuyendo paulatinamente.

Por otra parte, los compresores que se encuentran operando en la planta criogénica Cuenca de Burgos, están en funcionamiento durante todo el día causando un desgaste continuo en sus partes móviles. También se diagnostica otro riesgo aunado, la capacidad nominal de generación de presión por parte de los compresores, que constantemente se encuentra en el valor nominal o por encima de este, debido a las fugas que existe entre las tuberías.

Los ductos altamente presurizados que presentan alguna fuga, son candidatos importantes a presentarse una ignición conocida como “Flama jet” (figura 3.17), la inercia en la fuga hace que el material salga en forma de una pluma alargada entrando en contacto con el aire y creando una mezcla inflamable (figura 3.16). Esta clase de ignición comúnmente es la causa inicial en un incendio o explosión en ductos presurizados, debido a que tienen una alta temperatura de flama y pueden producir una muy intensa radiación térmica representando un peligro no solo por los efectos directos del calor sino también por su propagación.



Figura 3.16 Prueba de fuga en Brida [10]



Figura 3.17 Flama Jet [10]

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se determina el “Nivel de Integridad de Seguridad” [SIL] para los sistemas instrumentados de seguridad [SIS] que operan en la planta criogénica de gas en Cuenca de Burgos, a través de la metodología “Análisis de capas de protección” [LOPA] descrita en el capítulo 2 para cada una de las etapas que conforman la extracción y manejo de gas natural, descritas en el capítulo 3.

4.1 ANÁLISIS DE RIESGOS DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN

Mediante el método “árbol de fallas” se analizará las principales causas que propician las fallas en las líneas de extracción, seguido por la identificación de todos los elementos asociados en el sistema que podría causar que este evento ocurriera.

Esto con el fin de proporcionar una representación simbólica conveniente de la combinación de eventos que producen la ocurrencia del evento de la cima, que en este caso es el de falla en las líneas de extracción (figura 4.1), facilitando la elección de un nivel de integridad de seguridad [SIL], mediante otros métodos a partir de los resultados obtenidos del árbol de fallas.

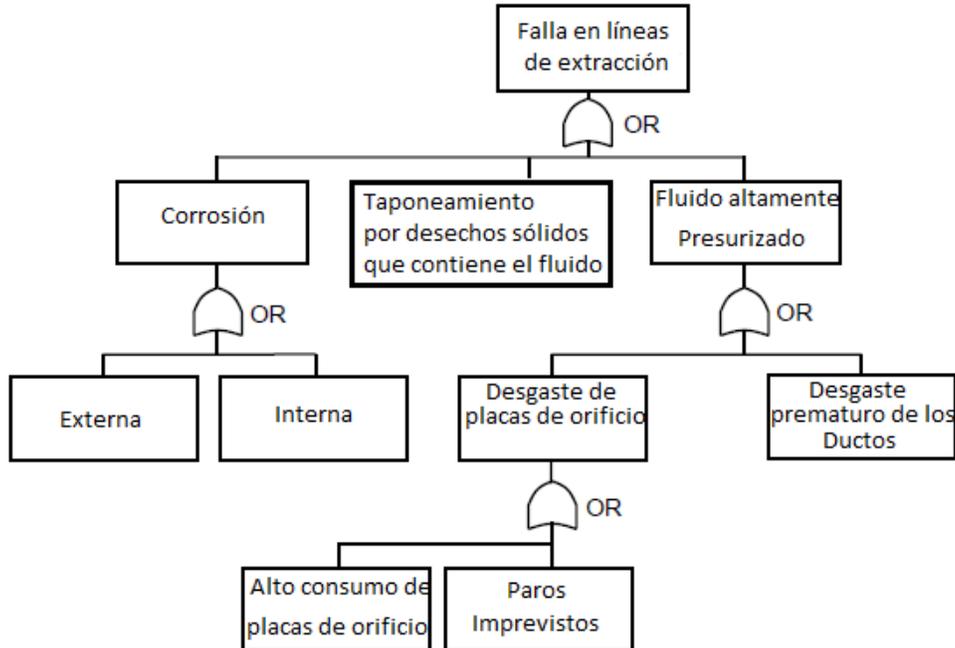


Figura 4.1 Método árbol de fallas en el área de extracción

En la tabla 4.1 se ubican los riesgos y consecuencias del área de extracción descrito en el árbol de fallas (figura 4.1). En esta tabla se le dan valores numéricos a las columnas Vi (gravedad para la vida), M (gravedad para el medio ambiente), P (gravedad de la propiedad), Ve (velocidad de propagación), Pb (probabilidad o frecuencia) y Pr (consecuencia o severidad), descritas en el capítulo 2. Estas variables son las que nos van a determinar el nivel de seguridad [SIL] con el que está operando el área de extracción, tratamiento, almacenamiento y compresión (que se analizarán posteriormente), permitiendo determinar si el nivel de seguridad [SIL] es el indicado y en caso contrario proponer una solución en base a los resultados.

En la tabla 4.1 se establecieron los siguientes valores para el área de extracción:

Tabla 4.1 Análisis de riesgos del área de extracción.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Líneas de Extracción	Medición del flujo de gas natural	-Pérdidas de presión	Paros no programados mermando la tasa de producción	Bienes	-Desgaste y consumo considerable de "Placas de orificio" -Incremento en los costos energéticos -Baja producción de Gas natural y sus derivados	1	2	5	2	Alta (1)	0.8≈1 (A)

Gravedad para la vida (Vi)= 1; Los trabajadores solo padecen dolores de cabeza por el calor, teniendo ese padecimiento durante un día o menos.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 2; La contaminación del gas natural es baja, debido a las impurezas del medio ambiente que rodea al gas durante su extracción, el gas es contenido por las placas de orificio y debido a la alta presurización del gas, el tiempo de vida de las placas de orificio se acorta y necesitan reemplazarse frecuentemente.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; Los paros imprevistos provocan pérdidas económicas catastróficas, causando el alza de los precios de los productos derivados del gas natural y desabasto.

Velocidad de propagación (Ve)= 2; La propagación es media debido a que inadvertidamente puede haber una fuga a causa de la descompostura de una placa de orificio de no ser reemplazada oportunamente.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Alta= 1; La ocurrencia de falla en placas de orificios es muy frecuente y el consumo de estos instrumentos de medición son bastante altos.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 0.8 ≈ 1; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (1 \times 0.4 + 2 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 2 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 0.8 ≈ 1 Este valor corresponde a la letra: A

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.2 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, se determina que dado las condiciones en las que está operando la planta criogénica de gas no cuenta con un nivel SIL para evitar o mitigar los riesgos detectados, por lo que se recomienda tener un nivel de seguridad mínimo [SIL 1].

4.2 ANÁLISIS DE RIESGOS DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN

El principal riesgo en el método de extracción, es el de la contaminación de los mantos freáticos. Este riesgo puede hacerse realidad si no se tiene en cuenta las posibles fallas y sus consecuencias del árbol de fallas de la figura 4.2

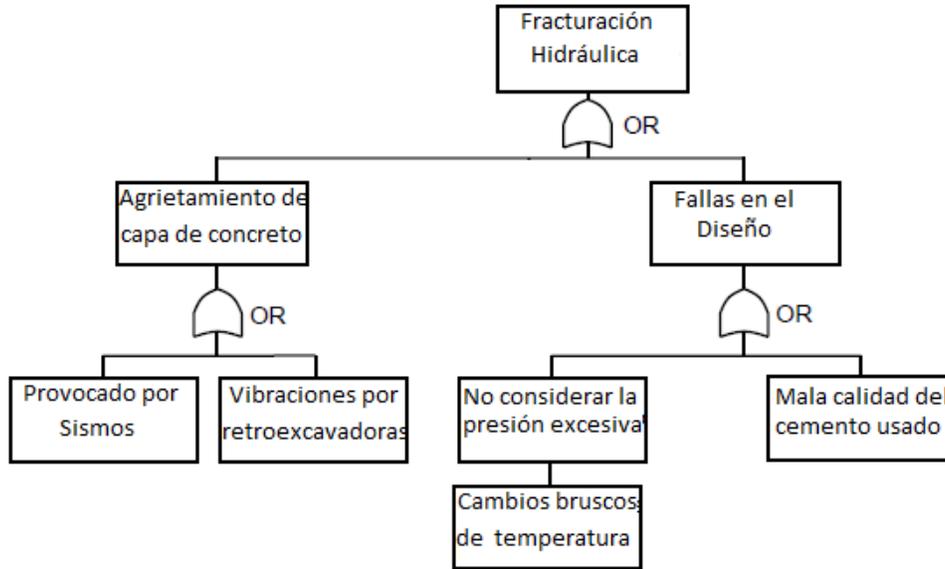


Figura 4.2 Método árbol de fallas en el método de extracción

En la tabla 4.3 se encuentra el análisis de fallas por el método de HAZOP, donde a diferencia del método de árbol de fallas no se representa de manera gráfica pero si tiene campos en donde recabar otro tipo de información importante como los comentarios y las acciones necesarias para evitar o mitigar el evento no deseado (desviación del proceso)

Tabla 4.3 Análisis de riesgos por el método de HazOp para el método de extracción.

Desviación	Posibles Causas	Consecuencias	Evento Impacto	Frecuencia	Salvaguardas	Comentarios	Acciones requeridas	Responsable
Extracción	Fracturación Hidráulica	Contaminación y elevación de costos al consumidor final	2	Permanente	Capa de concreto	El bombeo debe realizarse antes de la fractura de la capa de concreto	Bombeo del líquido frático para minimizar la contaminación	Paraestatal del manejo de hidrocarburos

En la tabla 4.4 se establecieron los siguientes valores para las consecuencias de las fallas del método de extracción analizadas en el árbol de fallas de la figura 4.2 y del análisis de riesgos por el método de HAZOP.

Tabla 4.4 Análisis de riesgos para el método de extracción.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Extracción	Perforación de la corteza Terrestre	-Filtración y contaminación de los mantos freáticos	Enfermedades por consumo de agua contaminada	Personas	Contaminación de los mantos freáticos y riesgo para la salud	4	5	4	4	Alta (1)	1.5≈2 (B)

Gravedad para la vida (Vi)= 4; Las personas que vivan a los alrededores de la planta criogénica y que estén explotando los mantos freáticos para la agricultura y su propio consumo corren alto riesgo de padecer cáncer e ir muriendo a causa de esta enfermedad.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 5; La contaminación de los mantos freáticos es inminente en caso de la ruptura de la capa de concreto, causando una alta contaminación y efectos negativos difundidos en todas las comunidades aledañas que consuman agua de los mantos freáticos contaminados.

Gravedad de la propiedad (P)= 4; La ruptura de la capa de concreto dejará pasar agua a las líneas de extracción del gas aumentando el costo de inversión en el área de tratamiento de separación de agua, añadiendo los gastos médicos que la paraestatal del manejo de hidrocarburos debe cubrir a las personas que presenten enfermedades por el consumo de agua o alimentos extraídos de los mantos freáticos.

Velocidad de propagación (Ve)= 4; La ruptura de la capa de concreto puede suceder sin advertencia, y solo se sabrá de la falla por los efectos difundidos en el incremento de humedad del gas natural extraído o por el aumento de padecimientos cancerígenos de los pobladores.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Alta= 1; La probabilidad es alta, debido a las vibraciones causadas por el método de exploración de más áreas que puedan contener gas natural por medio de la técnica de prospección geofísica, que consiste en producir artificialmente ondas sísmicas con una explosión pequeña sobre la superficie terrestre.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1.5 ≈ 2; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (4 \times 0.4 + 5 \times 0.4 + 4 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1.5 ≈ 2 Este valor corresponde a la letra: B

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.5 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del método de extracción

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Medio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, el nivel de seguridad del método de extracción es [SIL1], ya que la única capa de seguridad es la capa de concreto que recubre la línea de extracción. Pero considerando que en caso de un evento no deseado puede acarrear consecuencias severas, debe de cumplir con un nivel de seguridad [SIL2], como lo recomienda el análisis de riesgos por el método de HAZOP.

4.3 ANÁLISIS DE RIESGOS DEL ÁREA DE TRATAMIENTO

En el área de tratamiento, el principal riesgo es el deterioro de los ductos de transporte del gas natural. A continuación se analizan mediante el método “árbol de fallas” (figura 4.3) la combinación de eventos que provoca el deterioro de los ductos.

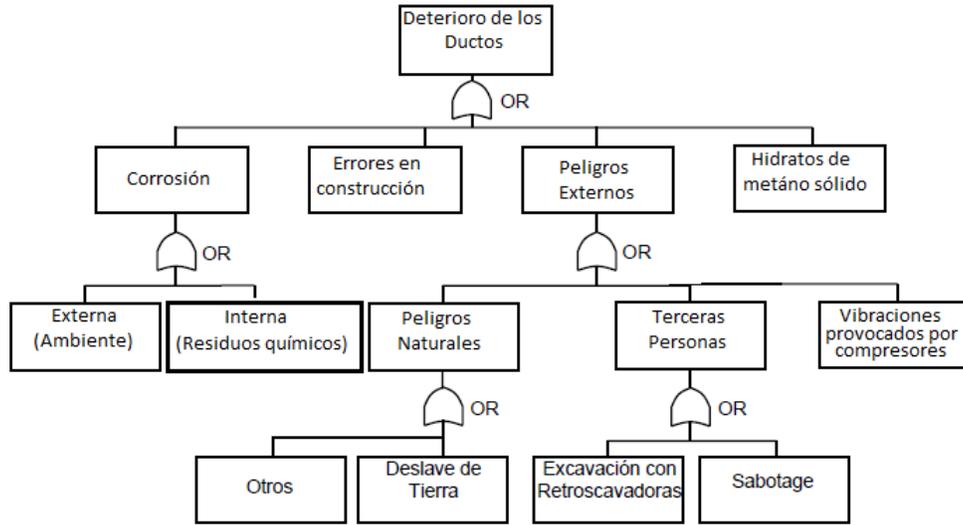


Figura 4.3 Método árbol de fallas en el área de tratamiento

Con la finalidad de poder apreciar las consecuencias que pudieran suscitarse en el caso del deterioro de los ductos de transporte de gas natural, se ilustra una variante del árbol de fallas (figura 4.4), donde se ven claramente las consecuencias de cada evento.

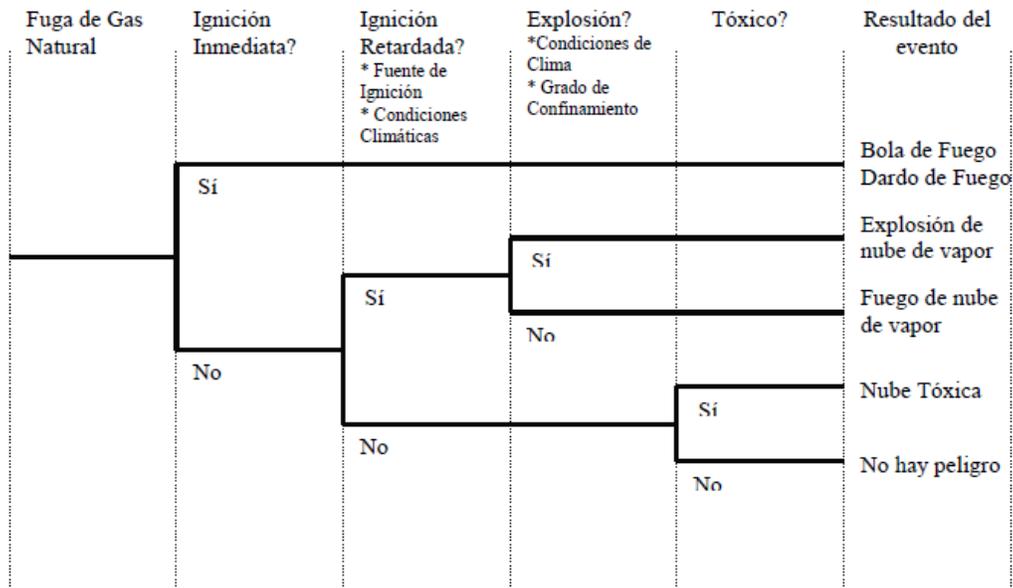


Figura 4.4 Consecuencias en caso de fuga de gas natural

En la tabla 4.6 se analiza por el método HAZOP la posibilidad de ocurrencia de la ruptura de tubos intercambiadores de calor, que aporta datos importantes sobre el análisis de fallas en el área de tratamiento.

Tabla 4.6 Análisis de riesgos por el método de HAZOP para el método de tratamiento.

Desviación	Posibles Causas	Consecuencias	Evento Impacto	Frecuencia	Salvaguardas	Comentarios	Acciones requeridas	Responsable
Intercambiadores de calor	Ruptura de los tubos por sobrepresión	Alto riesgo de ignición o intoxicación a causa de fuga de gas	6	0.5 Por año	Sistema contra incendios	Establecer una ruta de evacuación	Cierre de las válvulas de control y reemplazo del equipo dañado.	Equipo de mantenimiento

En la tabla 4.7 se establecieron los siguientes valores para las consecuencias de las fallas del área de tratamiento analizadas en el árbol de fallas de la figura 4.3 y de la figura 4.4, así como también del análisis de fallas del método HAZOP de la tabla 4.6.

Tabla 4.7 Análisis de riesgos para el área de tratamiento.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Tratamiento	Transporte y separación del gas	-Obstrucción de los ductos de transporte -Corrosión -Ruptura de tubos intercambiadores de calor	Fuga y explosión	Bienes y personas	-Paros no programados -Contaminación del gas natural -Impacto ambiental y a la salud -Riesgo en la seguridad de las personas	5	4	5	4	Alta (1)	1.5=2 (B)

Gravedad para la vida (Vi)= 5; No solo el personal que labora en la planta criogénica de gas, está expuesto a perder la vida en caso de fuga de gas y probable explosión, sino también los pobladores que residen cerca de la planta criogénica de gas, teniendo consecuencias catastróficas al provocar varias muertes y personas heridas, así como también la evacuación de toda persona cerca de la planta.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 4; En caso de que la fuga sea pequeña, se corre el riesgo de que entre en contacto con el personal que labora en el área de tratamiento y empiece a padecer algunos malestares a causa de la inhalación e

intoxicación a causa del gas natural. En caso de que llegue a diseminarse el medio ambiente que lo rodea puede incendiarse, en caso de encontrar un punto de ignición.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En caso de ocurrir una explosión por fuga de gas en los ductos de transporte, puede poner en peligro todos los bienes materiales y personas que se encuentran en ese momento en la planta criogénica de gas, produciendo una pérdida económica muy grande.

Velocidad de propagación (Ve)= 4; La fuga de gas en los ductos de transporte puede suceder sin advertencia, y solo se sabrá por los efectos inmediatos de una explosión.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Alta= 1; La probabilidad es alta, debido a la formación de corrosión, errores en la etapa de diseño y construcción por la falta de capacitación del personal y el medio ambiente que rodea a los ductos, promoviendo su deterioro.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1.5 ≈ 2; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (5 \times 0.4 + 4 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1.5 ≈ 2 Este valor corresponde a la letra: B

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.8 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Medio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, el nivel de seguridad del método de extracción es [SIL1]. Pero considerando que en caso de un evento no deseado puede acarrear consecuencias severas, debe de cumplir con un nivel de seguridad [SIL2].

4.4 ANÁLISIS DE RIESGOS DEL ÁREA DE ALMACENAMIENTO

En el área de almacenamiento, el principal riesgo es el congelamiento criogénico del personal que labora en el área de tratamiento. A continuación se analizan mediante el método “árbol de fallas” (figura 4.5) la combinación de eventos que puede provocar el congelamiento criogénico del personal.

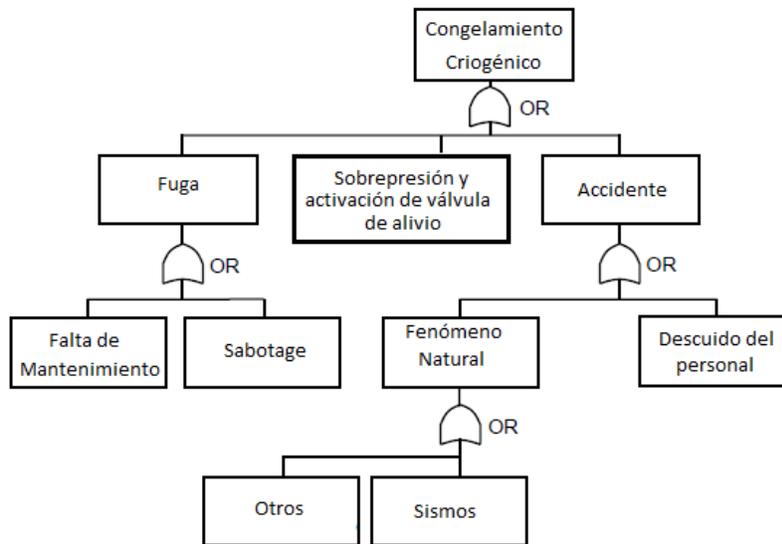


Figura 4.5 Método árbol de fallas en el área de almacenamiento

Con la finalidad de poder apreciar las consecuencias que pudieran suscitarse en el caso de una fuga en el área de almacenamiento, se ilustran las consecuencias en una variante del árbol de fallas (figura 4.6)

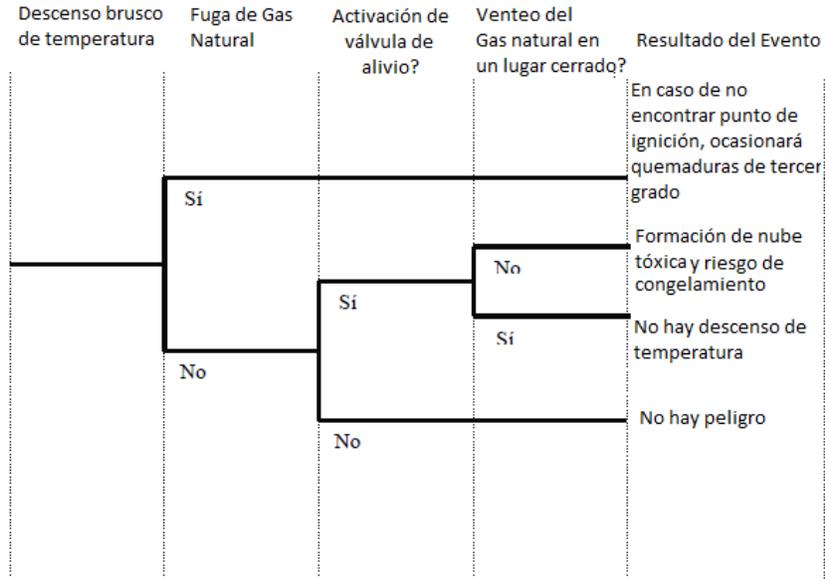


Figura 4.6 Consecuencias en caso de fuga de gas natural en el área de almacenamiento, sin encontrar punto de ignición.

Con la finalidad de enriquecer la información sobre el análisis de fallas en el área de almacenamiento, la tabla 4.9 muestra información adicional sobre las posibles causas de un evento no deseado (desviación del proceso), utilizando el método de HAZOP.

Tabla 4.9 Análisis de riesgos por el método de HAZOP para el método de almacenamiento.

Desviación	Posibles Causas	Consecuencias	Evento Impacto	Frecuencia	Salvaguardas	Comentarios	Acciones requeridas	Responsable
Almacenamiento	Grietas en los Ductos	Pérdida económica y riesgo de explosión	2	4.3 x 10 ⁻³ recipientes-año	Instrumentos indicadores de presión	El reemplazo es obligado y no basta con la reparación	Reemplazo de los ductos del área de almacenamiento	Ingenieros de Mantenimiento.

En la tabla 4.10 se establecieron los siguientes valores para las consecuencias de las fallas del área de almacenamiento analizadas en el árbol de fallas de la figura 4.5 y de la figura 4.6, así como también de la información recabada de la tabla 4.9

Tabla 4.10 Análisis de riesgos para el área de almacenamiento.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Almacenamiento	Criogenización	-Descenso brusco de temperatura -Congelamiento del personal	Fuga y explosión	Bienes y personas	-Quemaduras de tercer grado por contacto accidental -Formación de nube tóxica -Impacto ambiental y a la salud -Riesgo en la seguridad de las personas	4	4	5	3	Media (2)	1.4=1 (A)

Gravedad para la vida (Vi)= 4; Cabe recordar que sólo se están considerando las consecuencias por tener contacto directo con la fuga de gas natural o estar en el área del siniestro en donde está descendiendo la temperatura. No se está tomando en cuenta la posibilidad de un punto de ignición, por lo tanto las consecuencias serían de al menos la muerte de una persona por quemaduras de tercer grado en su cuerpo y la evacuación del personal del área de almacenamiento.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 4; Dependiendo del tamaño de la fuga puede formarse una nube tóxica despedida al medio ambiente circundante amenazando la salud de los trabajadores que estén cerca, o en su defecto la formación de charcos (gas natural en estado líquido a temperatura de -161 °C) que puede entrar en contacto con cualquier trabajador y provocar quemaduras.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En caso de ocurrir una fuga de gas natural en el área de almacenamiento, puede poner en peligro todos los bienes materiales y personas que se encuentran en ese momento en la planta criogénica de gas, produciendo una pérdida económica muy grande, la pérdida o incapacidad de recursos humanos aunado a los gastos médicos.

Velocidad de propagación (Ve)= 3; La velocidad de propagación es alta, causando daños considerables, pero los efectos pueden ser contenidos utilizando los únicos recursos de las válvulas de cierre y las válvulas de alivio.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Media= 2; La probabilidad es media, debido a las válvulas de cierre y de corte, además de ser constantemente monitoreado para saber los litros de gas natural que se está obteniendo.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1.4 ≈ 1; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (4 \times 0.4 + 4 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 3 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1.4 ≈ 1 Este valor corresponde a la letra: A

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.11 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de almacenamiento

		Consecuencia (Severidad)		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, el nivel de seguridad del método de almacenamiento es [SIL1], teniendo en cuenta que la consecuencia que arroja el resultado se considera como menor. Pero en relación a las consecuencias presentadas en los árboles de fallas de las figuras 4.5 y 4.6 las consecuencias son severas. Se recomienda del mismo modo reducir la frecuencia con las que se presentan las fugas para evitar pérdidas económicas y eventos no deseados, proponiendo la necesidad de implementar un nivel de integridad de seguridad más alto; el [SIL 2].

4.5 ANÁLISIS DE RIESGOS DEL ÁREA DE COMPRESIÓN

En el área de compresión, el principal riesgo es la falla en la unión de los ductos. A continuación se analizan mediante el método “árbol de fallas” (figura 4.7) la combinación de eventos que puede provocar la falla en la unión de los ductos.

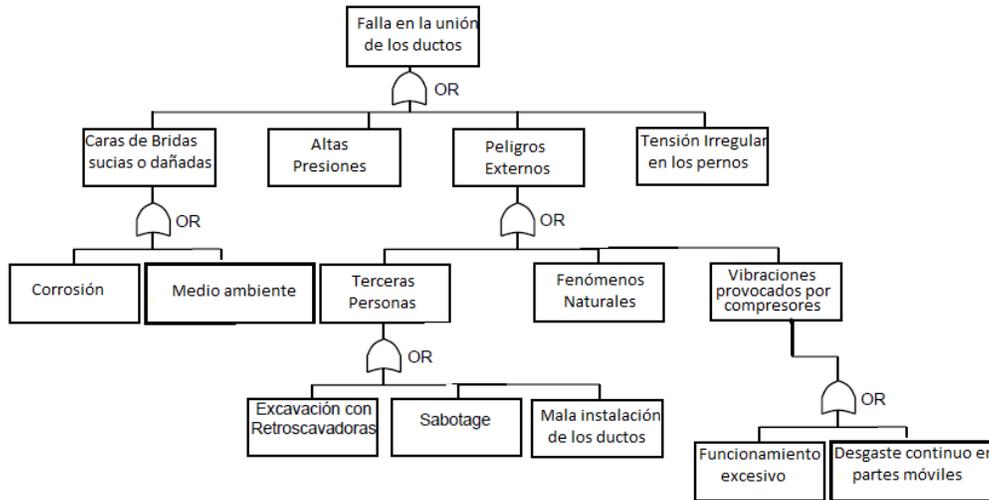


Figura 4.7 Método árbol de fallas en el área de compresión

Aplicando el método HAZOP, se obtiene información adicional para un análisis a fondo de las posibles causas que puede desencadenar un evento no deseado (desviación del proceso), que se ilustra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Análisis de riesgos por el método de HAZOP para el área de compresión.

Desviación	Posibles Causas	Consecuencias	Evento Impacto	Frecuencia	Salvaguardas	Comentarios	Acciones requeridas	Responsable
Presurización	Altos niveles de Presión	Provocan flamas "Jet"	2	0.594 etapa-año de operación	-Indicadores de presión -Indicador de vibración y temperatura en cojinetes	Los compresores están en funcionamiento excediendo su capacidad nominal de operación	Mantenimiento a tuberías, ductos y empaques en bridas para evitar fugas de gas y presión	Ingeniero de procesos
Fugas de gas en Bridas	Cara sucia en las bridas y mal ajuste de los pernos.	-Pérdidas de gas -Pérdida económica -Riesgo de ignición	2	2.6 x 10 ⁻³ Año-Brida	Empaque	Las fugas que presentan las bridas son en su mayoría por errores humanos	Capacitación del personal de instalación de ductos	Ingenieros y técnicos de instalación
Ductos	Término del tiempo de vida del servicio	Exposición a la intemperie y altos niveles de presurización	1	4.72x10 ⁻⁷ L/D	Diques	Ha terminado la vida útil del 5% de los ductos	Reemplazar los ductos	Paraestatal del manejo de hidrocarburos

Acorde a los datos recabados en el análisis de fallas por el método HAZOP y árbol de fallas de la figura 4.7 se analizan las consecuencias de los posibles eventos no deseados en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Análisis de riesgos para el área de compresión.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Compresión	Transporte de gas natural (Ductos)	-Mal ensamblaje de los Ductos	Fuga, explosión y pérdidas de gas natural	Bienes y personas	-Caras de bridas sucias o dañadas -Malformación de empaques por mal ensamblado de ductos -Impacto ambiental y a la salud	5	4	5	4	Alta (2)	1.5=2 (B)

Gravedad para la vida (Vi)= 5; No solo el personal que labora en la planta criogénica de gas, está expuesto a perder la vida en caso de fuga de gas y probable explosión, sino también los pobladores que residen cerca de la planta criogénica de gas, teniendo consecuencias catastróficas al provocar varias muertes y personas heridas, así como también la evacuación de toda persona cerca de la planta.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 4; En caso de que la fuga sea pequeña, se corre el riesgo de que entre en contacto con el personal que labora en el área de tratamiento y empiece a padecer algunos malestares a causa de la inhalación e intoxicación a causa del gas natural. En caso de que llegue a diseminarse el medio ambiente que lo rodea puede incendiarse, en caso de encontrar un punto de ignición.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En caso de ocurrir una explosión por fuga de gas en los ductos de transporte, puede poner en peligro todos los bienes materiales y personas que se encuentran en ese momento en la planta criogénica de gas, produciendo una pérdida económica muy grande.

Velocidad de propagación (Ve)= 4; La fuga de gas en los ductos de transporte puede suceder sin advertencia, y solo se sabrá por los efectos inmediatos de una explosión.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Alta= 1; La probabilidad es alta, debido a la formación de corrosión, errores en la etapa de diseño y construcción por la falta de capacitación del personal y el medio ambiente que rodea a los ductos, promoviendo su deterioro.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1.5 ≈ 2; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (5 \times 0.4 + 4 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1.5 ≈ 2 Este valor corresponde a la letra: B

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.14 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de compresión

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Severo (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, el nivel de seguridad del método de compresión es [SIL1]. Pero considerando que en caso de un evento no deseado puede acarrear consecuencias severas, debe de cumplir con un nivel de seguridad [SIL2].

En base a todos los resultados obtenidos de todas las áreas del proceso del gas natural a partir de los árboles de fallas, HAZOP y matriz de riesgos, se puede proceder a la realización del análisis de fallas por la metodología [LOPA], ya que toda la información recopilada hasta este momento es necesario para llenar los campos de las tablas de [LOPA] comenzando por la causa inicial proporcionado por el método HAZOP, frecuencia de la causa y diseño que fue recabado de los árboles de falla, y por último el campo del nivel de integridad de seguridad [SIL] de una función instrumentada [SIF] que fue cubierto por el método de matriz de riesgos.

Área de Extracción.

Tabla 4.15 Análisis por la metodología [LOPA] del área de extracción

Evento	Evento impacto	Causa inicial	Frecuencia de la causa inicial	Capas de protección					PFD	SIL de SIF	Posibilidad de mitigar el evento	Notas
				Diseño	PBCS	Alarmas	IPL					
Contaminación y elevación de costos al consumidor final	3	Fracturación hidráulica	Permanente	Capas de concreto	Tren de compresores y válvulas de control	-	-	182.5 por año	1	0	Es un proceso de extracción que implica un gasto considerable de recursos económicos y naturales	

Área de Tratamiento

Tabla 4.16 Análisis por la metodología [LOPA] del área de tratamiento

Impacto Evento	Evento Impacto	Causa inicial	Frecuencia de la causa inicial	Capas de protección					PFDD	SIL de SIF	Posibilidad de mitigar el evento	Notas
				Diseño	PBCS	Alarmas	IPL					
Alto riesgo de intoxicación a causa de la fuga de gas	6	Ruptura de los tubos y empaques por sobrepresión	0.5 por año	Enchahu estado para los tubos	Válvulas de control, indicador de presión y Temp.	Sistemas contra incendio	-	0.25/año	2	0	El enchahu estado o es necesario para evitar cambios bruscos de temperatura y al mismo tiempo, cambios de presión	

Área de Almacenamiento

Tabla 4.17 Análisis por la metodología [LOPA] del área de almacenamiento

Impacto Evento	Evento Impacto	Causa inicial	Frecuencia de la causa inicial	Capas de protección						PFD	SIL de SIF	Posibilidad de mitigar el evento	Notas
				Diseño	PBCS	Alarmas	IPL	IPD	IPF				
Explosión de la esfera de almacenamiento	3	Mala selección del tipo de válvulas	0.058 válvula-año	Cuerpo de la válvula fabricado con 316 St. St. Recubierto de estelite.	Posicionador SVI 2 AP y Actuador manual (volante)	Alarma emitida desde el posicionador	Válvulas de seguridad, discos de ruptura y depósito de agua		0.029	2	2.9%	La válvula tipo globo está diseñada para soportar grandes presiones	

Área de Compresión

Tabla 4.18 Análisis por la metodología [LOPA] del área de compresión

Evento	Evento Impacto	Causa inicial	Frecuencia de la causa inicial	Capas de protección						Notas	
				Diseño	PBCS	Alarmas	IPL	PFD	SIL de SIF		Posibilidad de mitigar el evento
Ignición en forma de flamas jet	3	Altos niveles de presión	0.594 etapa-año de operación	Relevador de sobrecaiga	Señal por medio de un sensor a un SCD para que mande la señal de paro al motor del compresor	Sonora-auditiva al operario	Sistemas de fuego y gas	0.297/año	2	0	Los compresores requieren mantenimiento prematuro
Pérdidas de gas Pérdida económica Riesgo de ignición	3	Cara sucia de bridas y mal ajuste de los pernos	2.6×10^{-3}	Empeques que mejoran el sello entre bridas	Presostatos que monitorean los niveles de presión y envían una señal para la apertura o cierres de válvulas	Alarma de evacuación	-	0.0013/año	2	0.26%	Las fugas que presentan las bridas son en su mayoría por errores humanos

4.6 RECOMENDACIONES EN EL ÁREA DE EXTRACCIÓN

Una alternativa de solución para el problema que radica en el área de extracción, en base a los resultados obtenidos del análisis de riesgos por la metodología [LOPA], es sustituir las “placas de orificio” por flujómetros ultrasónicos denominados “clamp-on”. Los beneficios que presenta es el fácil montaje al sólo colocarlo en la parte externa de la pared de la tubería (figura 4.8), y por lo tanto no hay partes sumergidas que puedan encontrarse expuestas a la abrasión del fluido que se está extrayendo. El sistema no necesita mantenimiento debido al acoplamiento permanente con la tubería y a los dispositivos de montaje robustos, evitando así los paros frecuentes y no planeados en las líneas de extracción que provocan una pérdida económica significativa. A continuación se mencionará estas y otras ventajas que ofrecen los flujómetros en las líneas de extracción.

Ventajas:

- Los flujómetros están provistos de tecnología no intrusiva (ninguna parte sumergida, ningún desgaste ni consumo)
- Medición precisa y fiable en presencia de gases húmedos o contaminados
- Amplia tasa de reducción e independencia de los niveles de presurización
- Sin necesidad de mantenimiento
- Responden muy rápidamente a los cambios de flujo
- No se encuentran sujetos a la corrosión ni al desgaste mecánico

Flujómetros Ultrasónicos



Figura 4.8 Acoplamiento del flujómetro ultrasónico en tubería

Los flujómetros de presión diferencial denominados “placa de orificio” no tienen que ser el sistema de medición del flujo de elección obligatorio por las caídas de presión que causan, los flujómetros de tipo turbina y otros tipos de instrumentos mecánicos no funcionan correctamente en condiciones pulsantes y por tanto no son confiables.

De poder aplicar estas recomendaciones y haciendo la comparación con el método árbol de fallas de la figura 4.1, se puede lograr evitar los riesgos que puedan provocar las fallas en las líneas de extracción, a continuación en la figura 4.9 se observa cómo repercute de manera positiva la puesta en marcha de las recomendaciones emitidas.

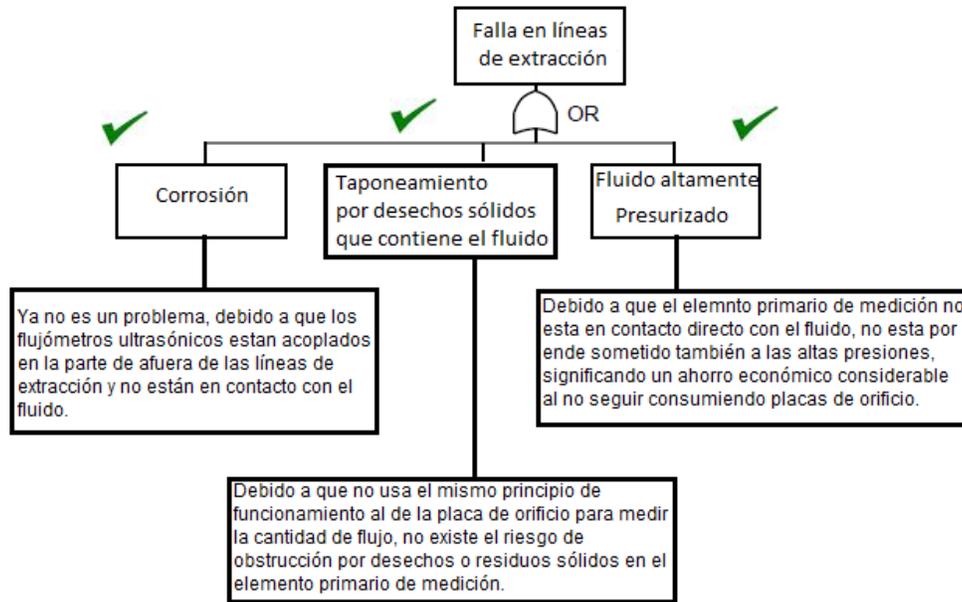


Figura 4.9 Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por el método “árbol de fallas”

En la tabla 4.18 se analizan en base al método de matriz de riesgos, los resultados de las recomendaciones obtenidas en base al método “árbol de fallas” de la figura 4.9

Tabla 4.19 Análisis de riesgos del área de extracción.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Líneas de Extracción	Medición del flujo de gas natural	-Pérdidas de presión	Paros no programados mermando la tasa de producción	Bienes	-Descompostura o descalibramiento de flujómetros ultrasónicos a causa de un golpe accidental o sabotaje	1	1	2	1	Baja (3)	0.4≈1 (A)

Gravedad para la vida (Vi)= 1; Los trabajadores pueden padecer dolores de cabeza por el calor, teniendo ese padecimiento durante un día o menos por las revisiones a cada uno de los flujómetros ultrasónicos instalados en las líneas de extracción.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 1; La contaminación del gas natural ya no es generada por el contacto prolongado con la contaminación que provoca la placa de orificio al saturarse por desechos sólidos.

Gravedad de la propiedad (P)= 2; Los paros imprevistos no sucederían de manera frecuente, debido a que los flujómetros ultrasónicos están montados por la parte de afuera de las líneas de extracción. Evitando así pérdidas económicas considerables.

Velocidad de propagación (Ve)= 1; Es nula la propagación debido a que los flujómetros ultrasónicos registrarían un cambio considerable en la cantidad de flujo que pase por las líneas de extracción, alertando sobre un posible evento no deseado que esté sucediendo en el área de extracción.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Baja= 3; La ocurrencia de falla disminuiría considerablemente en caso de llevarse a cabo las recomendaciones, ya que sólo se limitaría a accidentes aislados o sabotaje.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 0.425 ≈ 1; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (1 \times 0.4 + 1 \times 0.4 + 2 \times 0.3 + 1 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 0.425 Este valor corresponde a la letra: A

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.20 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de extracción con las recomendaciones implementadas

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, se puede observar una notable mejora en cuanto al tema de seguridad en el área de extracción. De poder ser posible implementar estas recomendaciones, se observa que se pasaría de un nivel [SIL] NR a un nivel [SIL] 2 en base al resultado obtenido en el subtema 4.1 “Análisis de riesgos en el área de extracción”, mejorando en base a resultados el nivel [SIL] 1 recomendado.

4.7 RECOMENDACIONES PARA EL MÉTODO DE EXTRACCIÓN

En base a los resultados obtenidos del análisis de riesgos por la metodología [LOPA] se hace la propuesta y mención de otros métodos alternativos sobre el método de extracción de gas natural, como son:

- Perforación a percusión de cable
- Perforación rotatoria

PERFORACION A PERCURSION DE CABLE [22].

El principio de perforación a percusión de cable es el fragmentado o rotura del suelo mediante el golpeo de una pesada herramienta de corte llamada trépano como la que se muestra en la figura 4.11, suspendida de un cable de acero trenzado con una frecuencia de 40 a 50 impactos por minuto. Lo que se traduce en cada impacto es la transmisión de tensión mecánica al cable, que al vencer dicha tensión produce un giro que perfora el suelo.

La ventaja que aporta este método de extracción es la poca inversión de agua y el nulo suministro de químicos para llevar a cabo la tarea de perforación.



Figura 4.10 Elaboración del cable. [21]



Figura 4.11 Aplicación del cable en torre de extracción de gas natural. [22]

PERFORACIÓN ROTATORIA [23].

Este método de perforación es muy versátil, dado que abarca una amplia gama de rocas pudiendo tener propiedades físicas rígidas o blandas. Su principio de funcionamiento radica en un taladro de “mesa rotatoria” accionado por un motor (diésel o eléctrico) de alta potencia, trabaja a altas presiones y profundidades mediante la circulación de un refrigerante que lubrica, refrigera y transporta los desechos dentro del terreno, no teniendo un gran impacto ecológico.



Figura 4.12 Perforación rotatoria aplicada en la extracción de gas natural. [23]

De poder aplicar estas recomendaciones y haciendo la comparación con el método árbol de fallas de la figura 4.2, se puede lograr evitar los riesgos y mitigar las consecuencias que provoca el método de extracción, a continuación en la figura 4.13 se observa cómo repercute de manera positiva la puesta en marcha de las recomendaciones emitidas para el método de extracción.

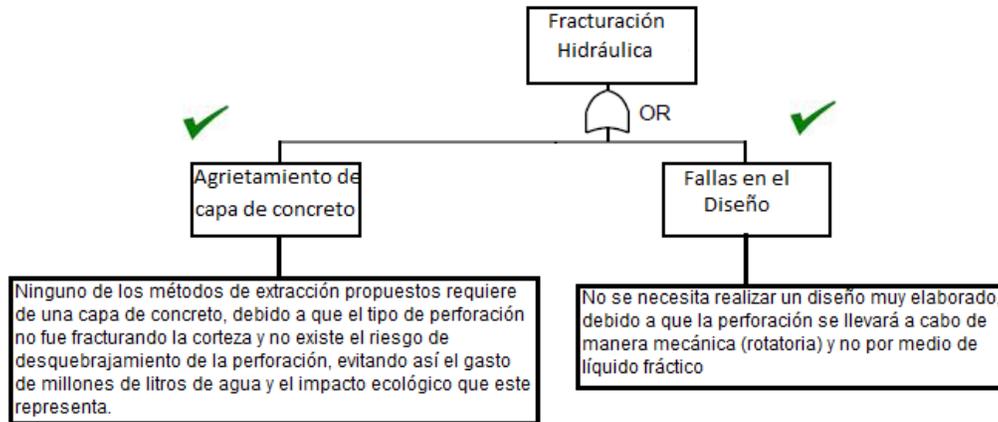


Figura 4.13 Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por el método “árbol de fallas”

Tabla 4.21 Análisis de riesgos para el método de extracción.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Extracción	Perforación de la corteza Terrestre	-Ruptura del cable del trépano por exceso de tensión mecánica	Demora y paros imprevistos	Paraestatal del manejo de hidrocarburos.	Pérdidas económicas considerables	2	1	5	4	Baja (3)	1 (A)

Gravedad para la vida (Vi)= 2; A comparación del método de fracturación hidráulica, no se pone en peligro la salud de las comunidades aledañas. Sólo está en riesgo la integridad física de los trabajadores en el remoto caso de que los cables de torsión del trépano no sean adecuadamente calculados y se rompan a causa de una tensión mecánica excesiva provocando lesiones serias o moderadas, con secuelas que pueden prevalecer por algunas semanas.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 1; El impacto ecológico es suprimido, debido a que los métodos de extracción propuestos no requieren de líquido frático para atravesar la corteza terrestre. Ambos métodos hacen la perforación por principios mecánicos sin poner en riesgo la contaminación de los mantos freáticos

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En el remoto caso de que exista alguna ruptura en los cables de torsión del trépano, la paraestatal dejara de producir grandes cantidades de gas natural por minuto. Esto representa una pérdida económica considerable, esto sin aún contemplar el gasto de un trépano nuevo.

Velocidad de propagación (Ve)= 4; La ruptura del cable sucedería de forma inadvertida debido a los factores externos que influyan en la tensión del cable, es en este aspecto donde cobra importancia el método de perforación rotatoria, en donde el cable es sustituido por motores eléctricos o por motores diésel.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Baja= 3; La probabilidad de que el cable de torsión se rompa es baja, debido a que los cálculos para seleccionar el cable deben de ser supervisados por diversas personas encargadas del proyecto. Por otro lado, los cables están hechos de acero reforzado garantizando su resistencia.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (2 \times 0.4 + 1 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1 Este valor corresponde a la letra: A

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.22 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del método de extracción con las recomendaciones implementadas

		Consecuencia (Severidad) Pr		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD Pb (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

Analizando el resultado anterior, el nivel de seguridad del método de extracción es [SIL] 2, debido a que se puede eliminar el riesgo para la vida de las personas que viven en comunidades aledañas y los métodos de extracción son más amigables con el medio ambiente, en el caso de querer implementar las recomendaciones emitidas, reduciendo el impacto ecológico. De esta manera se obtiene el nivel [SIL] 2 recomendado en el subtema 4.2 “Análisis de riesgos del método de extracción”

4.8 RECOMENDACIONES PARA EL ÁREA DE TRATAMIENTO

Se recomienda la elaboración de un programa de mantenimiento para cada uno de los ductos, de acuerdo a los resultados arrojados por el análisis de riesgos de la metodología [LOPA], si un ducto tiene programa de cambio de servicio o las

condiciones actuales de operación cambian, es conveniente efectuar la reparación total del mismo en la medida que el ducto lo permita, porque el costo del mantenimiento es insignificante comparado con el costo de producción diferida que ocasionaría una falla en algún ducto.

Lo que puede contribuir de manera significativa a elevar la eficiencia del mantenimiento en los ductos, es la continua capacitación y actualización profesional del personal directamente encargado de la inspección, diagnóstico y reparación de ductos, así como el desarrollo de un sistema de información acerca del estado e historial de los ductos propiedad de la paraestatal del manejo de hidrocarburos.

Con la finalidad de poder alargar la vida útil de los ductos, se propone un recubrimiento por “capas” de metal y resina que formen una “camisa” (figura 4.14) que envuelva al ducto para evitar así su prematura corrosión, evitando de la misma forma que se generen fácilmente orificios por donde se pueda presentar cualquier clase de fuga.



Figura 4.14 Camisa de protección para las tuberías

De poder aplicar estas recomendaciones y haciendo la comparación con el método árbol de fallas de la figura 4.3, se puede lograr evitar los riesgos y mitigar las consecuencias que existen en el área de tratamiento, a continuación en la figura 4.15 se observa cómo repercute de manera positiva la puesta en marcha de las recomendaciones emitidas para el área de tratamiento.

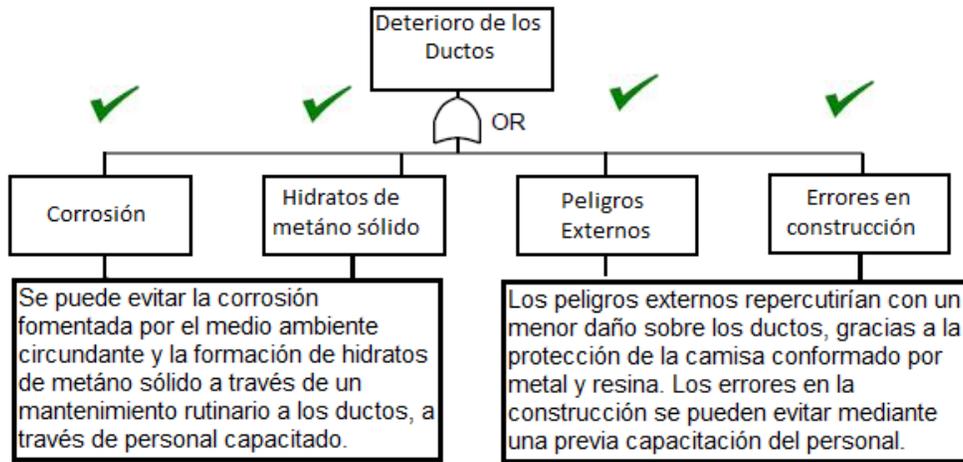


Figura 4.15 Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por el método “árbol de fallas”

Tabla 4.23 Análisis de riesgos para el área de tratamiento.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Tratamiento	Transporte y separación del gas	-Obstrucción de los ductos de transporte -Corrosión -Ruptura de tubos intercambiadores de calor	Fuga y explosión	Bienes y personas	-Paros no programados -Contaminación del gas natural -Impacto ambiental y a la salud -Riesgo en la seguridad de las personas	5	4	5	4	Media (2)	1.5 =2 (B)

Gravedad para la vida (Vi)= 5; El personal que labora en la planta criogénica de gas, sigue con el riesgo latente de perder la vida en caso de fuga de gas y probable explosión, al igual que los pobladores que residen cerca de la planta criogénica de gas, teniendo consecuencias catastróficas al provocar varias muertes y personas heridas, así como también la evacuación de toda persona cerca de la planta.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 4; En caso de que la fuga sea pequeña, se corre el riesgo de que entre en contacto con el personal que labora en el área de tratamiento y empiece a padecer algunos malestares a causa de la inhalación e intoxicación a causa del gas natural. En caso de que llegue a diseminarse el

medio ambiente que lo rodea puede incendiarse, en caso de encontrar un punto de ignición.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En caso de ocurrir una explosión por fuga de gas en los ductos de transporte, puede poner en peligro todos los bienes materiales y personas que se encuentran en ese momento en la planta criogénica de gas, produciendo una pérdida económica muy grande.

Velocidad de propagación (Ve)= 4; La fuga de gas en los ductos de transporte puede suceder sin advertencia, y solo se sabrá por los efectos inmediatos de una explosión.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Media= 2; Poniendo en marcha la recomendación, se tendría una frecuencia media de eventos no deseados, debido al mantenimiento preventivo rutinario por parte del personal capacitado. Las camisas con capas de metal y resina contribuirían a conseguir el objetivo de seguir preservando los ductos y proporcionando seguridad a los operarios por un corto plazo.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 1.5 ≈ 2; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (5 \times 0.4 + 4 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: Pr = 1.5 ≈ 2 Este valor corresponde a la letra: B

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.24 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de tratamiento con las recomendaciones implementadas

		Consecuencia (Severidad)		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

El nivel [SIL 2], es el nivel de seguridad necesario para el área de tratamiento y que sólo se puede conseguir mediante tres cosas: Capacitación del personal, mantenimiento preventivo rutinario y la instalación de camisas conformadas de metal y resina, sobre la superficie de los ductos.

4.9 RECOMENDACIONES PARA EL ÁREA DE ALMACENAMIENTO

En caso de existir un derrame en el área de almacenamiento, el gas se encontrará a una temperatura de -161°C (estado líquido) y a presión atmosférica, dependiendo del tamaño de la fuga puede vaporizarse y salir del área de la fuga con la ayuda de los extractores. El problema radica en el caso de ser una fuga menor de gas, pueda formar una piscina de líquido inflamable y peligroso porque al entrar en contacto con la piel, puede provocar quemaduras de tercer grado. Es por esta razón que se recomienda la elaboración de un área de contención como capa de protección, siendo una opción viable de solución.

Esta capa de protección que se recomienda, se denomina “método de contención por dique”, consiste en elaborar una zanja alrededor del tanque de almacenamiento lo suficientemente ancha y profunda como para contener todo el contenido del tanque, sin que signifique un peligro potencial para los trabajadores que se desempeñan en esa área, en la figura 4.16 se muestra este tipo de capa de protección pasiva.



Figura 4.16 Contención por Dique

De poder aplicar la recomendación del dique de contención y haciendo la comparación con el método árbol de fallas de la figura 4.5, se puede lograr evitar los riesgos y mitigar las consecuencias que existen en el área de almacenamiento, a continuación en la figura 4.17 se observa cómo repercute de manera positiva la puesta en marcha de las recomendaciones emitidas para el área de tratamiento.

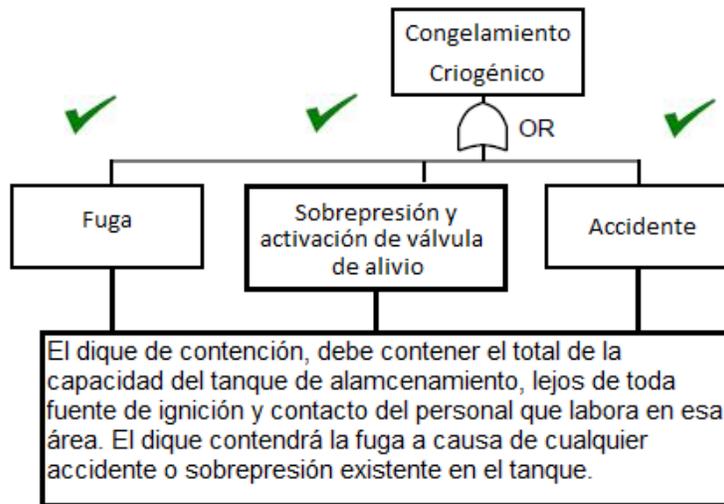


Figura 4.17 Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por el método “árbol de fallas”

Tabla 4.25 Análisis de riesgos para el área de almacenamiento.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Almacenamiento	Criogenización	-Descenso brusco de temperatura -Congelamiento del personal	Fuga y explosión	Bienes y personas	-Quemaduras de tercer grado por contacto accidental -Formación de nube tóxica -Impacto ambiental y a la salud -Riesgo en la seguridad de las personas	3	2	3	3	Baja (3)	1.4=1 (A)

Gravedad para la vida (Vi)= 3; En caso de llegar a implementar el dique de contención, se evita el riesgo de muerte de los trabajadores laborando en esa área al no tener contacto directo con el gas. Sólo habría algunas complicaciones en cuanto a heridas graves o moderadas, a causa del descenso drástico de temperatura.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 2; Con el dique de contención, sólo habrá baja contaminación y los efectos del gas natural estarán contenidos.

Gravedad de la propiedad (P)= 3; En caso de ocurrir una fuga de gas natural en el área de almacenamiento, ya no se pondría en riesgo los recursos materiales y humanos, se tendrá una pérdida mínima de gas siempre y cuando el dique este diseñado para además de contener, dirigir el gas a un área de almacenamiento redundante.

Velocidad de propagación (Ve)= 3; La velocidad de propagación es alta, causando daños considerables, pero los efectos pueden ser contenidos utilizando los únicos recursos de las válvulas de cierre y las válvulas de alivio.

Probabilidad o Frecuencia (Pb)= Baja= 3; La probabilidad es baja, debido a las válvulas de cierre y de corte, además de ser constantemente monitoreado para saber los litros de gas natural que se está obteniendo. Por otra parte el dique de contención evitará eventos no deseados en la planta.

Consecuencia o Severidad (Pr)= 0.95 ≈ 1; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de Vi, M, P, Ve y Pb en la siguiente fórmula:

$$Pr = (Vi \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + Ve \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$Pr = (3 \times 0.4 + 2 \times 0.4 + 3 \times 0.3 + 3 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: $Pr = 0.95 \approx 1$ Este valor corresponde a la letra: A

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.26 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de almacenamiento con la recomendación implementada

		Consecuencia (Severidad)		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

De esta manera se puede comprobar que en caso de poder implementar el dique de contención, se obtiene un nivel de seguridad [SIL2] que esté a la altura de las consecuencias que podrían desencadenarse en caso de un evento no deseado. Se podrán reducir las consecuencias (Pr) y la frecuencia de los eventos.

4.10 RECOMENDACIONES PARA EL ÁREA DE COMPRESIÓN

La propuesta de solución para el área de compresión de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de riesgos de la metodología [LOPA], es la reducción de fugas en la red de ductos de la planta criogénica de gas, para que los compresores no estén forzados a estar funcionando durante tiempos prolongados, el cual no es recomendado por los fabricantes de los compresores. Aplicando el método de recubrimiento de tipo “camisa” en los ductos en los que aún se pueda realizar algún tipo de mantenimiento, aunado a la sustitución de los ductos más

precarios por los motivos antes vistos en el análisis de riesgos, por otros totalmente nuevos se obtendrá una reducción considerable de las fugas, evitando así el uso prolongado de los compresores y el desprendimiento de residuos sólidos de estos a los ductos provocados por el sobrecalentamiento de los motores que generan el aumento de presión en las tuberías.

De poder aplicar la recomendaciones emitidas, para el área de compresión y haciendo la comparación con el método árbol de fallas de la figura 4.7, se puede lograr evitar los riesgos y mitigar las consecuencias que existen en el área de compresión, a continuación en la figura 4.18 se observa cómo repercute de manera positiva la puesta en marcha de las recomendaciones emitidas para el área de compresión.

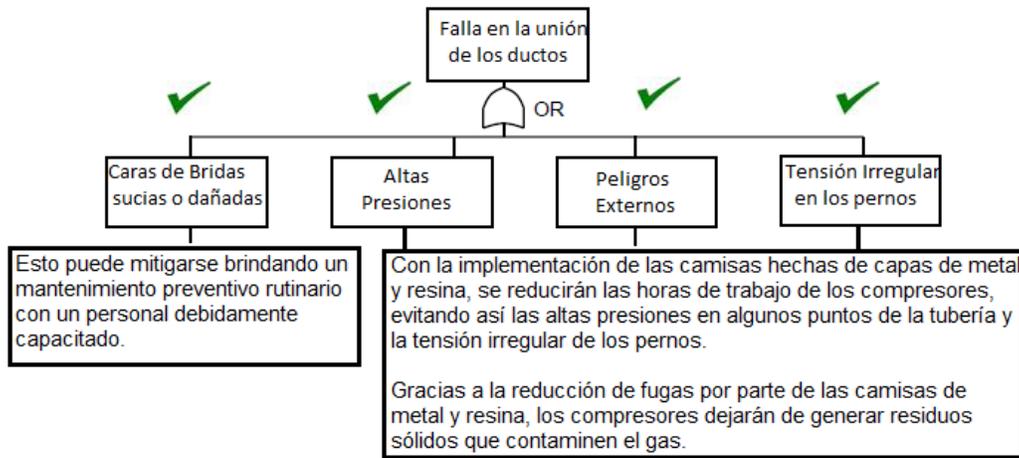


Figura 4.18 Análisis de riesgos con las recomendaciones implementadas por el método “árbol de fallas”

Tabla 4.27 Análisis de riesgos para el área de compresión.

Área o fuente de riesgo	Operación	Amenaza	Tipo de Riesgo	Elemento Vulnerable	Consecuencias	Vi	M	P	Ve	Pb	Pr
Área de Compresión	Transporte de gas natural (Ductos)	-Mal ensablaje de los Ductos	Fuga, explosión y pérdidas de gas natural	Bienes y personas	-Caras de bridas sucias o dañadas -Malformación de empaques por mal ensamblado de ductos -Impacto ambiental y a la salud	5	4	5	4	Alta (2)	1.5=2 (B)

Gravedad para la vida (V_i)= 5; No solo el personal que labora en la planta criogénica de gas, está expuesto a perder la vida en caso de fuga de gas y probable explosión, sino también los pobladores que residen cerca de la planta criogénica de gas, teniendo consecuencias catastróficas al provocar varias muertes y personas heridas, así como también la evacuación de toda persona cerca de la planta.

Gravedad para el medio ambiente (M)= 4; En caso de que la fuga sea pequeña, se corre el riesgo de que entre en contacto con el personal que labora en el área de tratamiento y empiece a padecer algunos malestares a causa de la inhalación e intoxicación a causa del gas natural. En caso de que llegue a diseminarse el medio ambiente que lo rodea puede incendiarse, en caso de encontrar un punto de ignición.

Gravedad de la propiedad (P)= 5; En caso de ocurrir una explosión por fuga de gas en los ductos de transporte, puede poner en peligro todos los bienes materiales y personas que se encuentran en ese momento en la planta criogénica de gas, produciendo una pérdida económica muy grande.

Velocidad de propagación (V_e)= 4; La fuga de gas en los ductos de transporte puede suceder sin advertencia, y solo se sabrá por los efectos inmediatos de una explosión.

Probabilidad o Frecuencia (P_b)= Media= 2; La probabilidad es media, debido a que si se llegan a implementar las recomendaciones emitidas como son: mantenimiento preventivo rutinario y colocación de camisas de metal y resina sobre los ductos, se podrá alargar a corto plazo la vida útil de los ductos garantizando un transporte de gas más seguro.

Consecuencia o Severidad (P_r)= 1.5 \approx 2; Este valor se obtuvo sustituyendo los valores de V_i , M , P , V_e y P_b en la siguiente fórmula:

$$P_r = (V_i \times 0.4 + M \times 0.4 + P \times 0.3 + V_e \times 0.3) / 4$$

Al sustituir los valores en las variables correspondientes tenemos:

$$P_r = (5 \times 0.4 + 4 \times 0.4 + 5 \times 0.3 + 4 \times 0.3) / 4$$

Obteniendo el resultado: $P_r = 1.5 \approx 2$ Este valor corresponde a la letra: B

Determinando el nivel de [SIL] en la matriz de riesgos:

Tabla 4.28 Resultado del nivel [SIL] en la matriz de riesgo del área de compresión con las recomendaciones implementadas

		Consecuencia (Severidad)		
		Menor (A)	Serio (B)	Extenso (C)
PROBABILIDAD (Frecuencia)	Baja 3	SIL2	SIL3	SIL3
	Media 2	SIL1	SIL2	SIL3
	Alta 1	NR	SIL1	SIL3

En caso de poder implementar las recomendaciones emitidas sobre el mantenimiento preventivo rutinario y las camisas de metal con resina, disminuiría considerablemente la frecuencia de sobrecalentamiento de los compresores a causa del uso excesivo que se genera por la existencia de orificios y fugas en los ductos. Evitando de igual forma la contaminación del gas por residuos sólidos carbonizados provenientes del compresor.

CONCLUSIONES

Se demostró mediante la metodología “Análisis de capas de protección” [LOPA] las deficiencias en cada una de las etapas del proceso de la planta criogénica de gas “Cuenca de Burgos”, Reynosa con resultados evidentes en base al estudio de las fallas y fórmulas matemáticas en cuanto a la aplicación de las matrices de riesgo refieren.

La metodología [LOPA] nos permite determinar el nivel de integridad de seguridad [SIL] adecuado para cada etapa del proceso, evaluar la zona de trabajo y emitir recomendaciones que ayudarán a evitar o mitigar los eventos no deseados.

En la planta criogénica de gas “Cuenca de Burgos”, Reynosa se pudo detectar los riesgos potenciales que puede terminar en desastre o eventos no deseados. Se aplicó la metodología [LOPA] en las etapas de extracción, tratamiento, almacenamiento y compresión, emitiendo de forma clara y oportuna algunas recomendaciones para evitar dichos desastres o emergencias ambientales.

De llevar a cabo estas recomendaciones, se corregirán las debilidades del proceso redituando una mayor producción en condiciones más seguras, la metodología “Análisis de capas de protección” [LOPA], aplicada correctamente y con la suficiente información garantiza identificar el suceso iniciador, la frecuencia de ocurrencia, consecuencias, gastos económicos a causa de desastres y gasto excesivo en cuanto a la sobreinstrumentación que pueda tener cualquiera de las etapas de un proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. José María Cortés Díaz, **SEGURIDAD E HIGIENE DEL TRABAJO**, ISBN: 970-15-0285-X, Editorial Alfaomega, 2002.
2. Wiley, **GUIDELINES FOR HAZARD EVALUATION PROCEDURES**, Editorial An AIChE industry Technology Alliance, tercera edición. 1997.
3. J. Ruiz Gimeno, **GUÍA TÉCNICA “ANÁLISIS DE RIESGO EN LOS ESTABLECIMIENTOS AFECTADOS DE NIVEL INFERIOR”**, Editorial Universidad de Murcia, 1998.
4. **LAYER OF PROTECTION ANALYSIS “SIMPLIFIED PROCESS RISK ASSESSMENT**, Editorial Center for Chemical Process Safety, 2000.
5. Jesús G. Martínez Ponce de León, **“INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE RIESGOS”**, Editorial Limusa, 2002.
6. Helena Montiel, **ANÁLISIS DE RIESGOS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, Editorial UPC, 1999.
7. Antonio Creus, **INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**, ISBN: 978-84-2671668-2, Editorial Marcombo, 2011.
8. **ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)**, recuperado de www.redinsafe.com/home1/redinsaf/public_html/.../LOPA.pdf
9. **DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE INTEGRIDAD DE SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD**, recuperado de www.pemex.com.mx/files/standards/.../nrf-045-pemex-2003.pdf
10. **SEGURIDAD FUNCIONAL EN PLANTAS DE PROCESO: SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD Y ANÁLISIS SIL**, recuperado de www.inerco.es/ficheros/comun/articulos/010505%20Oilgas.pdf
11. **SEGURIDAD FUNCIONAL “SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD” PARA PROCESOS DEL SECTOR INDUSTRIAL**, recuperado de www.pemex.com/index.cfm?action=statusfilecat
12. **SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD (SIS)**, recuperado de http://sauron.etsi.urv.es/DEEEA/docs/uni_estiu_07/cp_4_3.pdf.
13. **EXPLOSIONES EN CUENCA DE BURGOS**, recuperado de <http://laprensa.mx/notas.asp?id=146868>, 18 de septiembre de 2012.
14. **EXPLOSIONES EN GUANAJUATO**, recuperado de <http://www.eluniversal.com.mx/notas/435157.html>

15. **INTEGRATING HAZOP Y LOPA**, recuperado de http://www.acm.ab.ca/uploadedFiles/003_Resources/Articles_in_ProcessWest/Integrating%20HAZOP%20&%20LOPA.pdf. 1 de octubre de 2007.
16. **DICTAMEN DEL PROYECTO INTEGRAL DE BURGOS**, recuperado de http://www.cnh.gob.mx/docs/dictamenes/Dictamen_Burgos.pdf, enero 2012.
17. **EXPLOSION EN CADEREYTA**, recuperado de <http://www.proceso.com.mx/?p=100975>, el 07 de septiembre de 2010.
18. **PERFORACIÓN A PERCURSIÓN DE CABLE**, recuperado de <http://www.iph.com.ar/descargas/petroleros.pdf>, en Marzo de 2009.
19. **PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PERFORACIÓN A PERCURSIÓN DE CABLE**, recuperado de <http://www.iph.com.ar/descargas/petroleros.pdf>
20. **PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PERFORACION ROTATIVA** recuperado de <http://yacimientos-de-gas-condensado.lacomunidadpetrolera.com/2010/04/perforacion-rotatoria-herramienta.html>
21. **IMPORTANCIA DEL GAS NATURAL** recuperado de <http://www.importancia.org/gas-natural.php>

ANEXOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

TÉRMINOS

Actuador

Es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.

Árbol de Eventos

Es una ilustración gráfica de sucesos potenciales que puedan dar como resultado fallas de equipos específicos o errores humanos.

Auditable

En la metodología [LOPA] es la necesidad de proveer de información acerca de lo que se está llevando a cabo.

Consecuencia

En la metodología [LOPA] es el resultado de una desviación del proceso obteniendo una acción no deseada que es necesaria evitar o mitigar.

Controlador

Manipula la entrada de las variables al sistema, para obtener el efecto deseado en la salida pudiendo ser de diferentes tipos: Proporcional, Derivativo, Integral Proporcional Derivativo, Proporcional Integral, Proporcional Integral Derivativo.

Deflagración

Combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación, sin explosión.

Eoceno

Una división de la escala temporal geológica, es una época geológica de la Tierra, la segunda del período Paleógeno en la Era Cenozoica.

Escalación

Es la sucesión ordenada de datos que representa la información de manera gráfica para observar el grado de repercusión de un evento/impacto.

Hardware

Corresponde a todas las partes tangibles de un sistema informático o controlador. Sus componentes pueden ser eléctricos, electrónicos, electromecánicos o mecánicos.

HazOp

Es una técnica de identificación de riesgos bajo la premisa de que los accidentes ocurren como consecuencia de una desviación del proceso.

Hidratos

Es un término utilizado en química orgánica para indicar que una sustancia contiene agua.

Manipular

Capacidad para manejar una variable específica de acuerdo a las condiciones iniciales de un proceso transmitidas desde un controlador.

Mitigación

Es la reducción de la vulnerabilidad o atenuación de los daños potenciales sobre la vida y los bienes causados por un evento.

Oligoceno

Es una división de la escala temporal geológica, es la tercera época geológica del Período Paleógeno en la Era Cenozoica.

Perjuicio

En la metodología [LOPA] es el daño que se obtiene de la consecuencia de una desviación del proceso.

Perturbación

Es una acción que proviene del entorno que rodea al proceso y es la causa inicial de la desviación del proceso.

Sensor

Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.

Vulnerable

Es la susceptibilidad de los sistemas o procesos a la consecuencia evento/impacto que tenga como resultado la desviación del proceso.

ABREVIATURAS

[CCF] Falla de causa común

[DGIRA] Dirección general de impacto y riesgo ambiental

[EPA] Análisis de la preparación de emergencias

[ER] Estimación de riesgos

[ESD] Sistema de paro de emergencia

[EUC] Equipo bajo control

[FRR] Factor de reducción de riesgo

[FTA] Análisis de árboles de fallas

[IEC] Comisión electrotécnica internacional

[IPL] Capa independiente de protección

[LEGEEPA] Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente

[LOPA] Análisis de capas de protección

[PEP] Pemex Exploración y producción

[PD] Disco de presión

[PSV] Válvula de seguridad de presión

[PL] Capa de protección

[QRA] Análisis cuantitativo de riesgos

[RBD] Diagrama de bloques de confiabilidad

[SIF] Función Instrumentada

[SIL] Nivel de integridad de seguridad