



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EL MÉTODO BOW-TIE EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS EN PROCESOS

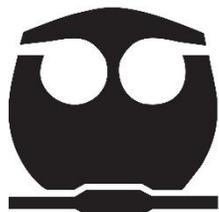
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

ZAIR MARTÍNEZ GUILLÉN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2021





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: MODESTO JAVIER CRUZ GOMEZ

VOCAL: Profesor: EZEQUIEL MILLAN VELASCO

SECRETARIO: Profesor: RAMÓN EDGAR DOMINGUEZ BETANCOURT

1er. SUPLENTE: Profesor: ELISA ELVIRA GUINEA CORRES

2° SUPLENTE: Profesor: JOSÉ ARTURO MORENO XOCHICALE

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO NACIONAL DE CONTROL TOTAL DE PERDIDAS S.A. DE C.V.

ASESOR DEL TEMA:

ING. RAMÓN E. DOMINGUEZ BETANCOURT

SUSTENTANTE:

ZAIR MARTÍNEZ GUILLÉN

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
Glosario	8
ABSTRACT	11
OBJETIVO.....	11
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO II. HISTORIA DEL MÉTODO BOW-TIE.....	14
2.1 La Seguridad de los Procesos.....	14
2.2 Orígenes del Bow-Tie.....	17
2.3 Filosofías Implícitas en el Método Bow-Tie.....	20
CAPITULO III. LAS METODOLOGÍAS BASE DEL BOW-TIE	21
3.1 Árbol de Fallas	21
A) Aspectos generales.....	21
B) Construcción del diagrama.....	22
C) Observaciones del método.....	24
3.2 Árbol de Eventos	24
A) Aspectos generales.....	24
B) Construcción del diagrama.....	25
C) Observaciones del método.....	27
3.3 Análisis de Causa-Consecuencia	28
A) Aspectos generales.....	28
B) Construcción del diagrama.....	28
C) Observaciones del método.....	29
3.4 Análisis de Barreras	30
A) Aspectos generales.....	30
B) Construcción del diagrama.....	31
C) Observaciones del método.....	32
CAPITULO IV. EL MÉTODO BOW-TIE.....	33

4.1 El Bow-Tie como método de análisis de riesgos.....	33
4.2 Los Elementos del Bow-Tie	34
A) Peligro.....	34
B) Evento Base.....	36
C) Consecuencia	37
D) Amenaza.....	38
E) Barrera	40
F) Factor de degradación.....	41
G) Control de Degradación	42
4.3 Recomendaciones para el desarrollo de un Bow-Tie.....	43
CAPITULO V. IMPORTANCIA DE LOS ANÁLISIS DE RIESGOS.....	46
5.1 Concepto de riesgo	46
5.2 Administración del riesgo	47
5.3 Principio ALARP.....	49
CAPITULO VI. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO BOW-TIE PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS.....	51
6.1 Análisis de riesgos con el Método Bow-Tie	51
6.2 Descripción general del proceso	51
6.3 Equipos de proceso.....	54
A) Estación de compresión	54
B) Secador.....	54
C) Compresor	55
D) Tanques de almacenamiento	56
E) Dispensarios	57
F) Tuberías y accesorios	58
6.4 Sistemas de seguridad y control en el proceso.....	59
6.5 Elaboración del Diagrama Bow-Tie	61
A) Peligro.....	61
B) Evento Base.....	63
C) Consecuencia	64
D) Amenaza.....	65
E) Barrera	67

F) Factor de degradación.....	69
G) Control de degradación.....	71
CAPITULO VII CONCLUSIONES	73
Anexo. Diagramas de Bow-Tie.....	74
Bibliografía	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Refinería de Jamnagar.	14
Fig. 2.2 Desastre de la Plataforma Piper Alpha.....	18
Fig. 2.3 Diagrama del Método Bow-Tie de Shell.	19
Fig. 2.4 Modelo del Queso Suizo.	20
Fig. 3.1 Construcción del Árbol de Fallas.....	23
Fig. 3.2 Construcción del Árbol de Eventos.	25
Fig. 3.3 Escenario de evento.....	26
Fig.3.4 Elementos del Análisis de Barreras.....	30
Fig. 3. 5 Construcción del Análisis de Barreras.....	31
Fig. 4.1 Diagrama de Bow-Tie.....	33
Fig. 4.2.1 Representación de un peligro en el Bow-Tie.....	34
Fig. 4.2.2 Representación de un evento base en el Bow-Tie.	36
Fig. 4.2.3 Representación de consecuencias en el Bow-Tie.....	38
Fig. 4.2.4 Representación de amenazas en el Bow-Tie.	39
Fig. 4.2.5 Representación de barreras en el Bow-Tie.	41
Fig. 4.2.6 Representación de factores de degradación en el Bow-Tie.	42
Fig. 4.2.7 Representación de los controles de degradación.....	43
Fig. 5.2 Etapas del análisis de riesgo.	47
Fig. 5.3 Principio ALARP.	50
Fig. 6.2 Plano de las distintas secciones de la planta de distribución.	52
Fig. 6.3.1 Equipo secador de GN.	55
Fig. 6.3.2 Equipo de compresión de gas natural.	56
Fig. 6.3.3 Tanques de almacenamiento de GNC.	57
Fig. 6.3.4 Maquina que dispensa GNC en las islas.....	58

Fig. 6.5.1 Peligro para equipo de compresión.....	62
Fig. 6.5.2. Evento base para equipo de compresión.	63
Fig. 6.5.3. Consecuencias para el equipo de compresión.....	64
Fig.6.5.4 Amenazas para el equipo de compresión.	66
Fig. 6.5.5. Barreras de prevención para el equipo de compresión.	68
Fig. 6.5.6 Factores de degradación para el equipo de compresión.....	70
Fig. 6.5.7 Controles de degradación para el equipo de compresión.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Elementos para la construcción del Árbol de Fallas.....	22
Tabla 3.2 Conceptos para la construcción del Árbol de eventos.....	25
Tabla 3.3 Símbolos utilizados para el diagrama de Análisis de Causa- Consecuencia.....	29
Tabla 6.5.1 Pautas y preguntas guía sobre los peligros.....	61
Tabla 6.5.2 Pautas y preguntas guía para el evento base.	63
Tabla 6.5.3 Pautas y recomendaciones para la selección de consecuencias.	64
Tabla 6.5.4 Pautas para la selección de amenazas.	65
Tabla 6.5.5 Pautas para la selección de barreras.	67
Tabla 6.5.6 Pautas para la selección de factores de degradación.	69
Tabla 6.5.7 Pautas para la selección de los controles de degradación.....	71

Glosario

Accidente: Evento o combinación de eventos no deseados o inesperados que tienen consecuencias tales como lesiones al personal, daños a terceros en sus bienes o personas, daños al medio ambiente, daños a instalaciones o alteración a la actividad normal del proceso.

Administración de riesgos: Proceso de toma de decisiones que parte del estudio de riesgos y el análisis de opciones técnicas de control, considerando aspectos legales, sociales y económicos, y establece un programa de medidas de eliminación, prevención y control, hasta la preparación de planes de respuesta a emergencias.

ALARP: As Low As Reasonably Practicable –Término utilizado para describir un nivel objetivo para reducir el riesgo que implementaría medidas de reducción de riesgo a menos que los costos de la reducción del riesgo en tiempo, problemas o dinero sean muy desproporcionados al beneficio.

Amenaza: Un posible evento iniciador que puede resultar en la pérdida de control de contención de un peligro.

Análisis de riesgos: Conjunto de técnicas que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos, fallas de los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias a los empleados, a la población, al ambiente, a la producción y/o las instalaciones.

Barrera: Una medida de control o agrupación de elementos de control que por sí solos pueden evitar que una amenaza se convierta en un evento superior o puede mitigar las consecuencias de un evento superior una vez que ha ocurrido.

Consecuencia: El resultado indeseable de un evento de pérdida, generalmente medido en efectos de salud y seguridad, impactos ambientales, pérdida de propiedad y costos de interrupción del negocio.

Control de degradación: Medidas que ayudan a evitar que el factor de degradación deteriore la barrera. Se encuentran en la vía que conecta la amenaza de degradación con la barrera de la vía principal.

Escenario de riesgo: Determinación de un evento hipotético, en el cual se considera la ocurrencia de un accidente bajo condiciones específicas, definiendo mediante la aplicación de modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales, las zonas que potencialmente puedan resultar afectadas.

Evaluación de riesgos: El proceso mediante el cual los resultados de un análisis de riesgos; son utilizados para tomar decisiones, ya sea mediante la clasificación relativa de las estrategias de reducción de riesgos o mediante la comparación con los objetivos de riesgo.

Evento: Suceso relacionado a las acciones del ser humano, al desempeño del equipo o con sucesos externos al sistema, que pueden causar interrupciones y/o problemas en el sistema. En este documento, evento es causa o contribuyente de un incidente o accidente o, es también una respuesta a la ocurrencia de un evento iniciador.

Evento Base: En el análisis de riesgos de Bow-Tie, es un evento central que se encuentra entre una amenaza y una consecuencia correspondiente al momento que hay una pérdida de control o pérdida de contención de un peligro.

Factor de degradación: Una situación, condición, defecto o error que compromete la función de una barrera de la vía principal, ya sea derrotándola o reduciendo su efectividad. Si una barrera se degrada, los riesgos de la vía en la que se encuentran se incrementan.

HAZOP: Una técnica cualitativa sistemática para identificar y evaluar los peligros del proceso y los posibles problemas operativos, utilizando una serie de pautas para examinar las desviaciones de las condiciones normales del proceso.

Método Bow-Tie: El Bow-Tie muestra un peligro, su evento base, amenazas y consecuencias, con las posibles barreras de prevención y de mitigación además la vía de degradación contiene controles de degradación que respaldan a la barrera de la vía principal contra las amenazas de degradación identificadas.

Peligro: Una operación, actividad o material con el potencial de causar daño a las personas, la propiedad, el medio ambiente, el negocio o simplemente una fuente potencial de daño.

Procedimiento: La descripción de las actividades de manera secuencial de una tarea o tareas específicas, aplicables a la operación, mantenimiento, revisión e investigación de los procesos y equipos críticos.

Riesgo: El riesgo es una medida de la lesión humana, daño al ambiente o pérdidas económicas en términos de la probabilidad de ocurrencia del incidente y la magnitud de las pérdidas o daños.

ABSTRACT

El Método Bow-Tie es una excelente herramienta de análisis de riesgos debido a que muestra la relación entre amenazas, peligros y consecuencias, además, permite el detallado análisis de las salvaguardas implementadas en un proceso. Su difusión fue iniciada en la industria de procesos, pero en la actualidad ya es utilizada por industrias de diferentes áreas entre las cuales están: la aeronáutica, seguridad, cuidado de la salud y este número se va incrementando. Es una herramienta de información muy visual, esto permite de forma clara fundamentar la toma de decisiones en áreas donde se lleva a cabo la administración de riesgos.

The Bow-Tie Method is an excellent risk analysis tool due to it shows the relationship between threats, hazards, and consequences, as well as allowing a detailed analysis of the safeguards implemented in a process. Its spread to begin in the process industry but current is it already used by industries of different areas, including aeronautics, safety, and health; the fields of application continue to increase. It is very visual information tool that allows to clearly explaining the basis for decision-making in areas where risk management is carried out.

OBJETIVO

Dar difusión al Método Bow-Tie por ser un instrumento de análisis muy completo y versátil en el análisis de riesgos en procesos químicos. Servir a las personas que se inician en la comprensión de los métodos de análisis de riesgos (Alumnos, ingenieros o profesionistas interesados en el método) y en la administración del riesgo.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El análisis de riesgos en la actualidad juega un papel importante debido al uso dado por las empresas y organizaciones, éstas buscan generar condiciones más eficientes y seguras en el desempeño de sus operaciones. El aspecto legal también ha incentivado el uso de sistemas de administración de la seguridad donde se ve como herramienta útil el análisis de riesgos. No se pueden permitir en estos tiempos consecuencias fatales que afecten al medio ambiente, a la sociedad civil y en último caso las instalaciones.

Este escrito presenta el Método Bow-Tie, como una herramienta de análisis de riesgos, aunque su origen tiene ya algunos años, su aplicación se inició en el sector de extracción y procesamiento de hidrocarburos. Hoy posee un amplio reconocimiento, además, de una gran aceptación en la industria de procesos debido a su potencial como herramienta de comunicación hacia los distintos miembros de una empresa. Su fuerte es el amplio análisis enfocado sobre las medidas de protección y mitigación implementadas en las distintas etapas de un proceso, ya sea nuevo o existente.

Se entra en materia, abordando el tema de “seguridad de los procesos”, donde por razones económicas siempre se ha buscado la mejora continua, en consecuencia, es uno de los aspectos con mayor relevancia en la actualidad. La evolución de los métodos de análisis desafortunadamente muchas veces ha sido el resultado de lecciones aprendidas de eventos trágicos. Esto se describe en el aspecto histórico sobre el Método Bow-Tie. (Capítulo 2)

Ningún conocimiento en la vida del ser humano surge por generación espontánea es más bien el resultado del proceso iterativo de observación y mejora de los conocimientos con los que se cuentan, es así como surgen modelos innovadores; el Bow-Tie es uno de ellos, tiene sus fundamentos en metodologías anteriores a él, entre las cuales están el árbol de eventos y el árbol de fallas. (Capítulo 3)

Los métodos de análisis de riesgos cuentan con conceptos generales muy intuitivos, estos permiten el estudio de un riesgo particular, pero esto no es suficiente. Por ello se deben describir y conceptualizar las ideas que dan sentido a un método, es lo que se trata de lograr con los términos: Peligro, Evento Base, Consecuencia, Amenaza, Barrera, Factor y Control de Degradación, en los capítulos sobre conceptos. (Capítulo 4 y 5)

Conocer los aspectos conceptuales sobre un tema es importante porque permite dar a conocer ideas con nuevos enfoques, pero todo es más claro si se ejemplifica, en este documento se realiza un caso de aplicación para que el lector cuente con un marco de referencia si desea utilizar el método en un futuro. (Capítulo 6 y 7)

El ritmo con el que la competitividad se ha incrementado ha generado la búsqueda de herramientas de comunicación más sencillas y eficientes, el Método Bow-Tie es un instrumento que condensa aspectos importantes sobre la seguridad de los procesos, pero eso no quiere decir que sea un análisis superficial, es muy detallado y enriquecedor.

CAPITULO II. HISTORIA DEL MÉTODO BOW-TIE

2.1 La Seguridad de los Procesos

Las actividades humanas por naturaleza llevan asociadas un cierto nivel de riesgo. Lo que puede provocar este riesgo es la exposición o el manejo de sustancias peligrosas, los procedimientos y condiciones bajo las cuales se desarrollan ciertas actividades, así como también los elementos componentes de equipos y su desempeño en el proceso. El desarrollo de procesos se ha incrementado con las nuevas tecnologías y los materiales descubiertos, esto es positivo porque ha traído una mejor calidad de vida con productos innovadores, mejores servicios y una notable capacidad de producción.

Todo lo mencionado anteriormente ha conducido al ser humano a idear y construir grandes complejos de instalaciones industriales y en consecuencia han incrementado la exposición al riesgo de los trabajadores, pero también para los asentamientos y ecosistemas naturales ubicados en la periferia de estos. Un ejemplo de ello es la refinería de Jamnagar, la más grande que existe actualmente ubicada en la India. Fig. 2.1.



Fig. 2.1 Refinería de Jamnagar.

Los grandes proyectos industriales deben ser diseñados, construidos, operados o en su caso desmantelados bajo estándares y códigos técnicos rigurosos fundamentados en las buenas prácticas de ingeniería [1]. Esto es lo ideal, pero en la práctica se busca que las inversiones económicas, seguridad técnica y operación sean óptimas. No necesariamente ocurre esto siempre, en ocasiones pasar por alto la seguridad ha conducido a consecuencias catastróficas.

Si bien las causas para cada evento indeseado son distintas, es probable que los procedimientos mal ejecutados, condiciones inseguras, falta de mantenimiento en las instalaciones, la desviación en las condiciones de operación normal sin medidas de control adecuadas, los errores en la administración de la organización o los sistemas de seguridad mal implementados puedan ser un foco iniciador que sería mejor evitar.

Todos aquellos eventos catastróficos ocurridos en distintas épocas en la industria de procesos generalmente ocasionan grandes daños, cobrando la vida de personas, logrando serios daños ecológicos o causando pérdidas económicas millonarias, a estos los hemos llamado “Eventos de Accidentes Mayores”. El análisis de riesgos puede ser utilizado para estudiar eventos indeseados como esos. Algunos de ellos pueden ser: explosiones, derrames, liberación de gases o vapores tóxicos al medio ambiente.

Muchas de las consecuencias en los grandes accidentes son fatales, pero el ser humano se ha preocupado por tener lecciones aprendidas de cada uno de esos eventos, su estudio a detalle ha dado origen a legislaciones con regulaciones más amplias y estrictas en el ámbito de la seguridad con el fin de evitar más pérdidas de vidas o daños al ambiente [2].

En el ámbito técnico los trabajos de investigación han permitido la creación de métodos de análisis de riesgos, modelos predictivos y un cúmulo de registros de información con bases de datos con el objetivo de que los nuevos procesos o los ya existentes no cometan los mismos fallos.

Después de accidentes químicos como el de Bhopal, India y el de San Juan Ixhuatepec, México se creó el *Center for Chemical Process Safety* en EU que recopiló metodologías completamente desarrolladas para su uso en la investigación de accidentes [3]. Las metodologías creadas para el análisis de riesgos han evolucionado y la profundidad de un estudio depende del enfoque con el cual el analista necesite abordar el escenario de riesgo.

Entre los distintos métodos existen aquellos utilizados para analizar las causas, otros permiten el desarrollo de escenarios de peligros para prevenirlos con sistemas de seguridad, también están aquellos enfocados en el análisis de consecuencias. Para cada método el alcance depende de la calidad de la información con que se cuente, así como de los recursos disponibles.

A continuación, se mencionan algunos de los métodos de análisis de riesgo más utilizados en la industria; Lista de verificación, Análisis ¿Qué pasa sí?, Análisis de Modos de Falla y Efectos, Análisis Funcional de Operabilidad (HAZOP), Análisis de Capas de Protección (LOPA), Árbol de Fallas, Árbol de Eventos, entre otros. En capítulos posteriores vamos a profundizar en algunos de estos métodos.

2.2 Orígenes del Bow-Tie

Hasta ahora lo mencionado sobre el *Método Bow-Tie*, es su utilidad como herramienta para el análisis de riesgos. Hay mucha incertidumbre con respecto a su origen, en este apartado se realizará un pequeño esbozo histórico del método. Se piensa que fue en el año 1979 en la Universidad de Queensland en Australia, en las notas de un curso sobre “Análisis de Peligros” (HAZAN) impartido por la *Imperial Chemical Industries* ¹ donde aparecen los primeros *Diagramas del Método Bow-Tie*, pero el origen exacto, del cómo y el cuándo se llevó a cabo el primer taller quedó en incógnita al solo presentarse los diagramas [4].

Desde aquella primera aparición del *Diagrama de Bow-Tie* en 1979, pasaron 9 años y una catástrofe en el Mar del Norte, la plataforma *Piper Alpha* ² cobró la vida de 167 personas, pérdidas millonarias para la empresa *Occidental Petroleum* y una investigación de 180 días a cargo de *Lord Cullen* ³, culminando en un informe que examinaba las causas del accidente, recopilaba las lecciones aprendidas y daba 106 recomendaciones de cambio para la administración de la seguridad [5].
Fig. 2.2.

La investigación se llevó a cabo con el fin de adoptar un nuevo régimen de seguridad para las operaciones en alta mar, con este nuevo sistema tan riguroso se buscaba conocer la causalidad de eventos no deseados, la comprensión de las amenazas y el riesgo que forma parte de las operaciones normales para contar con un sistema que asegurará el control sobre los peligros. Probablemente esta nueva filosofía de seguridad en la industria incentivara el desarrollo y uso del *Método Bow-Tie* en el sector petrolero.

¹ Fue una compañía británica dedicada a la producción de pinturas y productos químicos especiales.

² Fue una plataforma petrolera a cargo de la empresa *Occidental Petroleum* sufrió una explosión el 6 de Julio de 1988.

³ Ex miembro del Poder Judicial Escocés, que dirigió la investigación del desastre de *Piper Alpha*.



Fig. 2.2 Desastre de la Plataforma Piper Alpha.

Conocer los peligros y las causalidades de los accidentes ayudó a desarrollar y planear formas de control sobre los mismos de forma más sistemática y generalizada en las distintas instalaciones [4]. Fue la empresa petrolera holandesa *Royal Dutch de Grupo Shell* quien en los 90's llevó a cabo una amplia investigación sobre la aplicación del *Método Bow-Tie*, (en adelante *Bow-Tie*) definiendo estrictamente los elementos componentes del método y dando pauta para implementar el *Bow-Tie* como estándar general para el análisis y gestión de riesgos en sus operaciones en todo el mundo. Esta contribución incremento la difusión del método en otras empresas del sector, reconociéndolo como el *Método Bow-Tie de Shell* [6]. Fig. 2.3.

La difusión lograda por Shell del *Bow-Tie*, se extendió fuera de la industria del petróleo como herramienta de análisis y gestión de riesgos de accidentes mayores, abarcando industrias mineras, aéreas, marítimas y del sector nuclear. Durante los años 2001 al 2004 la Unión Europea encargó a una lista de 10 países un proyecto nombrado ARAMIS, éste desarrolló un conjunto de metodologías para implementar los principales requisitos de la Directiva SEVESO II⁴ [7].

⁴ Directiva que se formo después del accidente de Seveso, Italia con el fin de legislar e implementar medidas ante accidentes industriales mayores con el fin de proteger el ambiente y a la población.

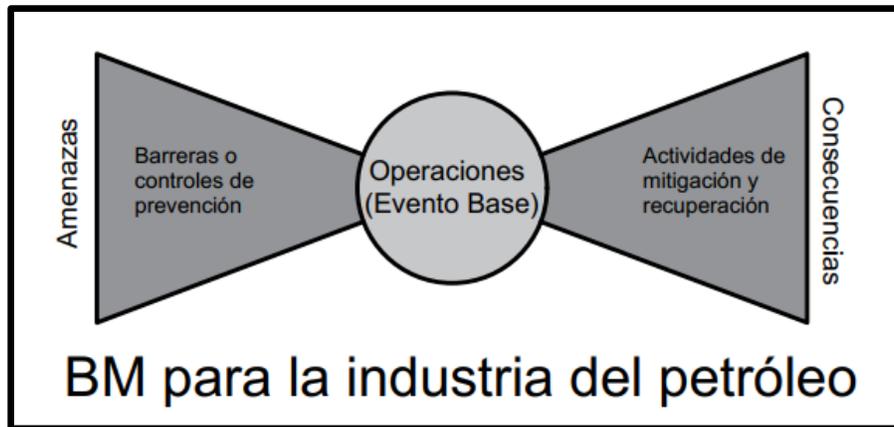


Fig. 2.3 Diagrama del Método Bow-Tie de Shell.

El objetivo del proyecto ARAMIS fue construir una nueva Metodología de Evaluación de Riesgos Accidentales para la industria. La metodología que se desarrolló se dividía en distintas etapas, la primera de ellas tenía el fin de llevar a cabo la identificación de peligros de eventos mayores (MIMAH). En esta se implementó una estrategia que utilizaba el *Bow-Tie* por su utilidad como herramienta de comunicación de riesgos a personal no técnico, además, de definir con precisión y amplitud los equipos, eventos críticos y consecuencias. También se llegaron a utilizar el Árbol de Fallas y el Árbol de Eventos, pero fue el diagrama de *Bow-Tie* el que le dio la estructura para un mejor análisis [7].

La Directiva SEVESO II tiene como objetivo la seguridad de la ciudadanía y proteger la calidad del medio ambiente. Esto lo logra con contribuciones técnicas como la proporcionada por el proyecto ARAMIS, estudios de seguridad más amplios, políticas de seguridad para prevención de accidentes graves en las empresas con Sistemas de Gestión más eficientes y en el sector público políticas que implican más información disponible al público, disposiciones para nuevas instalaciones y también sobre la notificación e informes de accidentes [8].

2.3 Filosofías Implícitas en el Método Bow-Tie

Existe un modelo de protección que está fundamentado en un concepto militar que surgió durante la Primera Guerra Mundial y dio las bases para el sistema de seguridad del primer reactor nuclear construido por *Enrico Fermi*⁵ en 1942, el concepto fue “Defensa en profundidad” esta filosofía de diseño plantea la construcción de distintas capas de protección independientes para una misma falla con el objetivo de evitar sucesos que conduzcan a un accidente mayor [9].

El concepto fue tomado por el psicólogo *James Reason*⁶ quien propuso un modelo de causalidad de accidentes que nombro Modelo de Queso Suizo donde propone representar una capa de protección con una rebanada (como se muestra en la Fig. 2.4). Cada una de las rebanadas puede tener vulnerabilidades, las cuales hacen que la confiabilidad no sea 100% efectiva y representan la probabilidad de falla [10].

Por lo tanto, con este modelo ocurre un accidente cuando una amenaza sigue una trayectoria que puede alinearse a través de las distintas vulnerabilidades de las capas y concluir en un accidente. Estas directrices y los métodos que se describen en el capítulo siguiente son el punto de partida para el desarrollo del *Bow-Tie*.

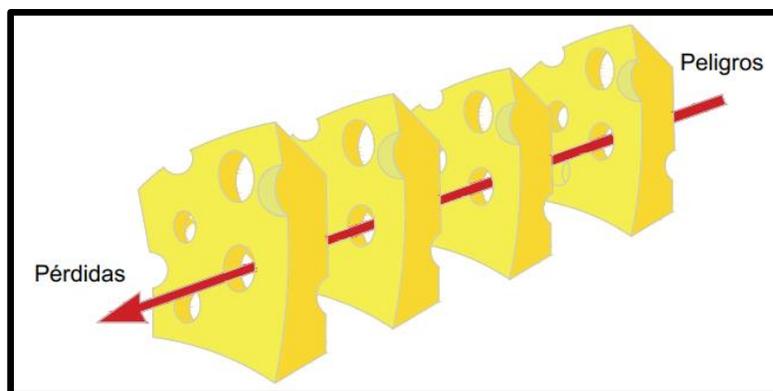


Fig. 2.4 Modelo del Queso Suizo.

⁵ Físico italiano que construyó el primer reactor de fisión nuclear en la Universidad de Chicago formando parte del Proyecto Manhattan, en los E.U.

⁶ Psicólogo que propuso una teoría sobre el Error Humano de donde nace el concepto “Modelo de Queso Suizo”.

CAPITULO III. LAS METODOLOGÍAS BASE DEL BOW-TIE

3.1 Árbol de Fallas

A) Aspectos generales

El Método del Árbol de fallas fue desarrollado en 1942 por H.A. Watson de los Laboratorios Bell con el propósito de evaluar el Sistema de Lanzamiento y Control de los misiles Minuteman I. Con los beneficios observados, la empresa Boeing lo implemento en el proceso de diseño y producción de aviones, haciendo de este método un uso intensivo debido a su utilidad [11]. En una forma sencilla de explicar, se realiza un diagrama donde se analiza un evento base (suele ser un evento de riesgo mayor) posteriormente, utilizando lógica Booleana se descompone en eventos, hasta obtener los eventos más simples.

Los eventos simples suelen ser los modos de falla, los cuales de forma individual o combinada causan el evento no deseado. Al ser un diagrama de descomposición lógica los eventos suelen utilizar las compuertas lógicas “and” y “or”, con el fin de formar conjuntos mínimos de fallos en donde a cada evento se le asigna una probabilidad de ocurrencia que sirve para evaluar la ocurrencia del evento base [2]. Los elementos que se muestran en la Tabla 3.1 son los que se utilizan en el diagrama.

Evento Principal	Evento	Suceso no desarrollado	Compuerta "OR"	Compuerta "AND"
Representa el evento principal el cual se descompone en eventos más sencillos.	Representan los eventos más sencillos y pueden ser intermedios o simples.	Suceso no desarrollado debido a una falta de información o debido a que no se considera necesario.	Indica la ocurrencia un suceso si al menos uno de los sucesos de la parte inferior ocurre. La probabilidad del evento superior es la suma de las probabilidades de los eventos inferiores.	Indica la ocurrencia de un evento solo si ambos sucesos conectados en la parte inferior ocurren. La probabilidad del evento superior es el producto de las probabilidades individuales.
				

Tabla 3.1 Elementos para la construcción del Árbol de Fallas.

B) Construcción del diagrama

Para la construcción del diagrama se pueden seguir las instrucciones de la Fig. 3.1. A continuación se da una sencilla explicación de cada etapa.

Recopilación de información: En esta etapa se requiere reunir información útil sobre el sistema para conocer las condiciones de funcionamiento, las posibles fallas o condiciones anormales, todo esto para un mejor análisis. La información de partida en ocasiones suele ser la siguiente:

- i. Condiciones de diseño y operación del sistema.
- ii. Manuales de operación proporcionados por fabricantes de los equipos.
- iii. Bitácoras de operación y mantenimiento de los equipos.
- iv. Observaciones y recomendaciones del personal de campo.

Definir el sistema de estudio: Se delimitan las fronteras del sistema, suele ser aquella parte de la instalación donde se realiza una actividad, operación o proceso de forma manual o automatizada, además existe una interacción entre equipos, trabajadores y sustancias.

Construcción del diagrama: Durante esta etapa se define el objetivo y alcance del diagrama, posteriormente se propone el evento base y aplicando lógica deductiva se desarrollan todos los eventos simples y probables que lo pueden causar.

Análisis cualitativo: Esta etapa sirve para determinar y analizar los conjuntos mínimos de fallos, estos son trayectorias a través de las compuertas lógicas formados por eventos simples que conducen al evento base. También sirven para la comprensión entre eventos no relacionados en un conjunto de falla.

Análisis cuantitativo: Etapa de alta especialidad donde se suele requerir la experiencia e información histórica sobre incidentes o accidentes del proceso. Se recomienda tener un conocimiento profundo del proceso, los mecanismos, el modo en el que se desarrollan y los efectos que pueden tener las fallas. Buscar y asignar probabilidades a los eventos puede ser un problema tedioso y el analista debe tener cierto criterio, el cual dará calidad al diagrama.

Ajuste del sistema: Etapa donde se revisa que todos los factores importantes están incluidos en el diagrama.

Monitoreo del sistema: Se evalúan las probabilidades obtenidas y se dan las observaciones y recomendaciones del analista.

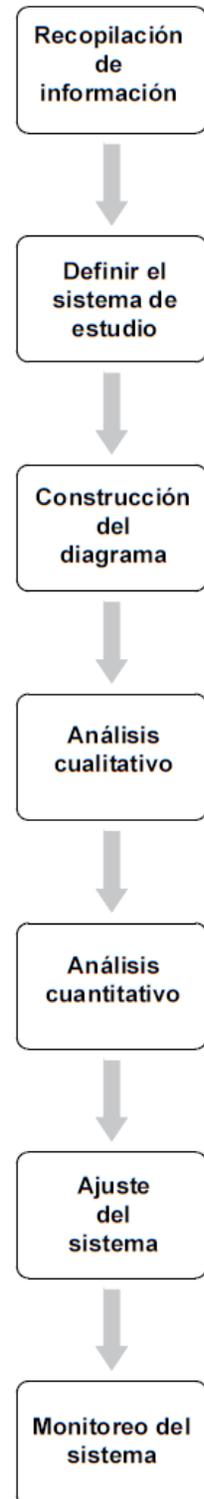


Fig. 3.1
Construcción del
Árbol de Fallas.

C) Observaciones del método

- El método utiliza lógica binaria, ésta permite un análisis desde un evento base hasta eventos causales simples.
- Permite el análisis desde múltiples eventos causales.
- El análisis puede tener enfoque cualitativo o cuantitativo, depende mucho de la calidad de la información proporcionada del proceso.
- La confiabilidad de la asignación de probabilidades suele depender de los datos con los que se cuenten del mismo proceso o de instalaciones similares.
- Permite la toma de decisiones sobre riesgos a evitar o posibles mejoras en el proceso.

3.2 Árbol de Eventos

A) Aspectos generales

Este método sirve para realizar la identificación y análisis de posibles consecuencias que son causadas por un evento inicial, éstas se representan en un diagrama donde a cada consecuencia posible le resulta cierta probabilidad. En este método se toman en consideración los sistemas de protección o mitigación según su estado de éxito o fracaso, los dos modos de actuar posibles. El método suele estar asociado al árbol de fallas debido a que el evento base de este, suele ser el punto de partida del diagrama [12].

El método fue diseñado por un grupo de ingenieros cerca del año de 1974, durante una evaluación de riesgo realizada a un reactor nuclear, al equipo de ingenieros se le hizo tedioso dibujar distintos diagramas de fallas y decidieron condensar los resultados de las distintas consecuencias en un solo diagrama que nombraron Método de Árbol de Eventos [11].

Los conceptos utilizados para la construcción del diagrama se muestran en la Tabla 3.2.

Escenario de accidente	Conjunto de eventos en secuencia donde el ultimo conduce a un accidente.
Evento inicial	Evento que inicia la cadena de sucesos que llevan al accidente.
Evento Pivote	Evento intermedio que resulta del análisis de los sistemas de protección donde, el Éxito del sistema mitiga el accidente y si Fracasa se le denomina evento agravante.

Tabla 3.2 Conceptos para la construcción del Árbol de eventos.

B) Construcción del diagrama

El conjunto de instrucciones que sirven de guía para la construcción del Árbol de Eventos se puede identificar en la Fig. 3.2

Recopilación de la información: Debemos tener información de partida del proceso para conocer los modos de falla puede ser la siguiente:

- i. Condiciones de diseño y operación.
- ii. Manuales de operación proporcionados por fabricantes de los equipos.
- iii. Bitácoras de operación y mantenimiento de los equipos.
- iv. Observaciones y recomendaciones del personal de campo.

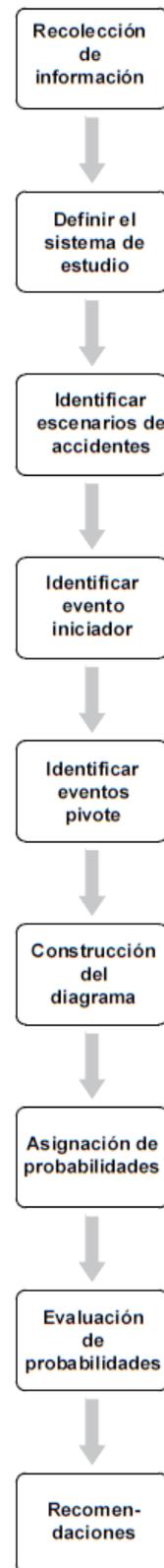


Fig. 3.2 Construcción del Árbol de Eventos.

Definición del sistema de estudio: En el método anterior definimos lo que es un sistema, partiendo de ello, es necesario definir las fronteras del sistema de estudio para el método de Árbol de Eventos, en ocasiones puede ser sencillo identificarse si se ha elaborado un Árbol de Fallas.

Identificar los escenarios de accidentes: En esta etapa se lleva a cabo la evaluación de los posibles escenarios a desarrollarse en el sistema, como una secuencia de eventos que culminan en una consecuencia fatal.

Identificar el evento iniciador: Se selecciona el evento iniciador, este puede ser cualquier evento que interrumpa una operación normal, fallas inherentes al proceso, fallas de un sistema de apoyo o inclusive puede ser un evento externo [2].

Identificar eventos pivote: En esta etapa se identifican las barreras de seguridad o las contramedidas involucradas en los escenarios de accidentes, estas medidas dan origen a las compuertas binarias que enuncian el éxito o fracaso de cada barrera. La información de funcionamiento de las barreras suele proporcionarse en la información de diseño o de operación del proceso, donde el éxito de una barrera evita que se termine en una consecuencia no deseada [11]. Fig. 3.3.

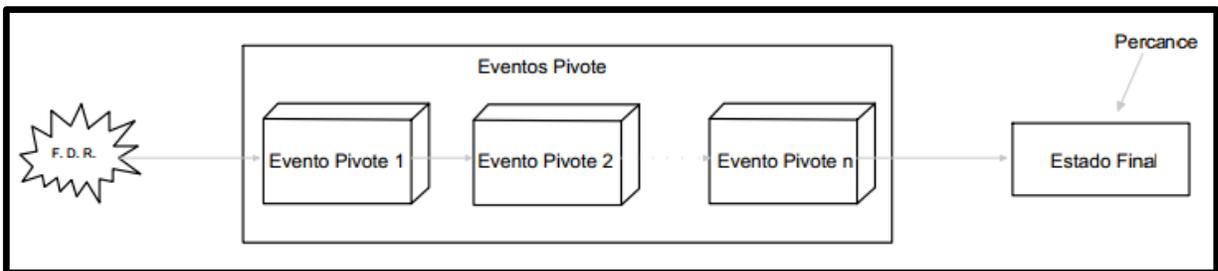


Fig. 3.3 Escenario de evento.

Construcción del diagrama: En esta etapa se arma el escenario, partiendo con el evento iniciador, los eventos pivote se enuncian en la parte superior del diagrama e indican los sistemas de protección o mitigación que se encuentran instalados, posteriormente se conecta el evento iniciador a través de las compuertas binarias de los eventos pivote los cuales culminan en un evento controlado o en una consecuencia.

Asignación de probabilidades: Se obtienen probabilidades de eventos en la literatura o también se pueden calcular con correlaciones o modelos. El analista puede asignar valores para eventos con registros históricos o modelar aquellos de los que no se tenga registro, pero que pueden llegar a causar gran impacto.

Evaluación de las probabilidades: Se obtienen las evaluaciones de las secuencias de eventos a través de cada compuerta binaria. El número de sistemas de protección permitirá la eliminación o impedimento de la consecuencia. Todo esto, da una idea de la calidad de las barreras y las posibilidades de ocurrencia de una consecuencia.

Recomendaciones: En esta etapa se realizan las observaciones del analista sobre el proceso, los sistemas de prevención y respuesta, si existen áreas de mejora y recomendaciones que permitan una operación más segura.

C) Observaciones del método

- El método utiliza lógica binaria que permite un análisis de las probabilidades de ocurrencia de las consecuencias a través de las barreras.
- Se pueden evaluar distintas consecuencias de un evento iniciador.
- Para un enfoque cualitativo se deben respaldar las consecuencias con una matriz de riesgos para tener una mejor percepción del riesgo.
- Permite evaluar los sistemas de protección existente.
- Es posible identificar donde se puede implementar una barrera aun no existente.

3.3 Análisis de Causa-Consecuencia

A) Aspectos generales

Método gráfico creado con el fin de aclarar los accidentes relevantes ocurridos en instalaciones nucleares complejas. Fue propuesto por Dan S. Nielsen en los 70's, por un lado, el método tiene el propósito de presentar una conexión lógica entre un espectro de consecuencias relevantes donde se le asignan probabilidades de ocurrencia a consecuencias individuales para que sean evaluadas. El diagrama general del método se compone de un evento crítico conectando a un diagrama de causas y aun diagrama de consecuencias [13].

B) Construcción del diagrama

Para la construcción del diagrama de este método se utilizan los siguientes conceptos:

Escenario de accidente: Serie de eventos los cuales regularmente se miden con respecto al tiempo, es decir son secuenciales y culminan en un evento no deseado.

Evento crítico: Es el evento el cual indica la desviación de un parámetro que rebasa un límite de seguridad o control. Por ejemplo: Desviaciones notables en la operación de un reactor.

Diagrama de causa: Es aquel donde se investigan las causas del evento crítico. Bien pueden ser el diagrama obtenido del Árbol de Fallas Cuantitativo.

Diagrama de consecuencia: Es aquel donde se investigan las consecuencias del evento crítico. Bien puede ser el diagrama obtenido del Árbol de Eventos Cuantitativo.

Se utilizan los siguientes elementos de la Tabla 3.3 para la elaboración del diagrama, son conocidos como símbolos de Nielsen.

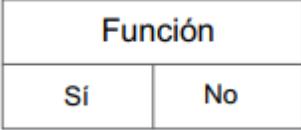
Evento Inicial	Evento Intermedio	Consecuencia
Evento iniciador de un escenario de accidente que es independiente.	Evento que evalúa la funcionalidad de un sistema de seguridad.	Representa el resultado de una secuencia de eventos.
		

Tabla 3.3 Símbolos utilizados para el diagrama de Análisis de Causa-Consecuencia.

Para la construcción de este tipo de diagramas se debe definir el evento crítico, posteriormente, desarrollar los procedimientos de construcción descritos para los métodos anteriores.

C) Observaciones del método

- El método fue diseñado para plantas nucleares complejas, por lo tanto, se puede utilizar para análisis de instalaciones complejas.
- Su utilización puede dar a conocer si los sistemas y procedimientos son óptimos para el sistema de estudio.
- Permite evaluar si un evento iniciador puede convertirse en uno o más eventos indeseados.
- Muestra la conexión lógica entre las causas de un evento crítico y sus posibles consecuencias.
- Los escenarios de riesgo se pueden evaluar cuantitativamente.

3.4 Análisis de Barreras

A) Aspectos generales

El método de Análisis de Barreras tiene su origen en el Modelo de Energía de Haddon, donde se proponen 10 estrategias para la prevención de riesgos [11]. Los conceptos que se toman del Modelo de Haddon son: barrera, fuente de energía⁷ y objetivo a proteger. Con base en estos conceptos se construye una herramienta de análisis para la evaluación de las barreras con el propósito de prevenir flujos de energía no controlados que afecten o dañen al trabajador y/o a las instalaciones.

En el método se propone un escenario donde se construye una secuencia lógica de eventos los cuales se enfrentan a cada una de las barreras y se observa el posible desempeño de esta. Al completar el análisis de las barreras existentes se puede tener la idea del grado de protección con el que se cuenta en el caso de un siniestro. Observar la Fig. 3.4 para identificar los componentes del método.

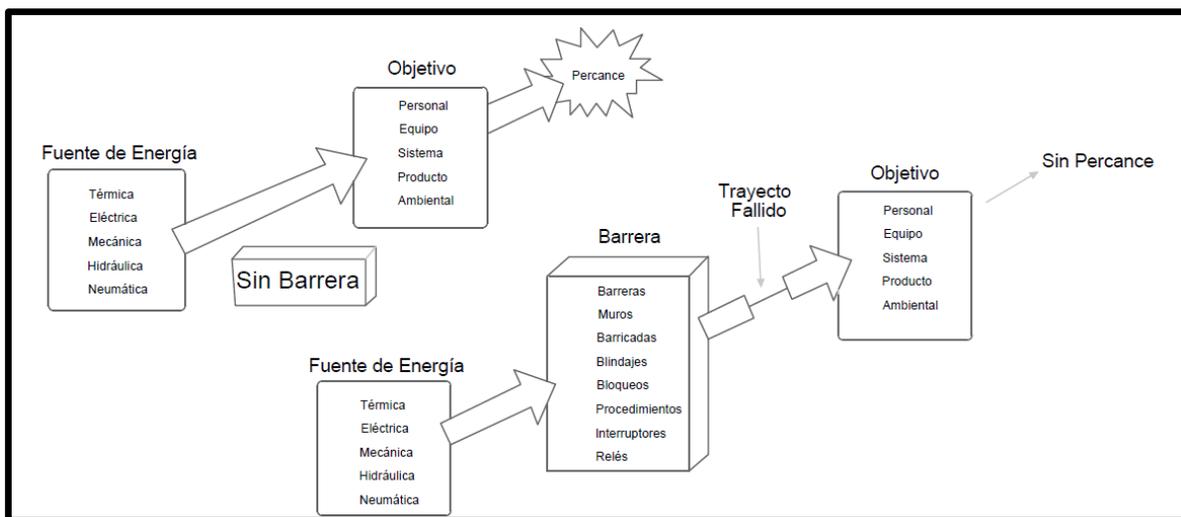


Fig.3.4 Elementos del Análisis de Barreras.

⁷ Puede ser el material, mecanismo o proceso que tenga la capacidad de causar daño debido a la energía intrínseca asociada debido a las condiciones en las que se encuentran o puede evolucionar.

B) Construcción del diagrama

A continuación, vamos a explicar las definiciones que permiten la comprensión del método y también iniciar la construcción del diagrama según las instrucciones de la Fig. 3.5.

Fuente de energía: Todo tipo de material, mecanismo proceso que contiene energía potencial que puede ser liberada. La energía liberada por cualquiera de estas tres formas puede causar un daño a personas o equipos, estos suelen ser los dos elementos importantes para proteger.

Trayectoria de energía: Es la trayectoria que sigue el flujo de energía desde la fuente a través de las distintas barreras.

Barreras de energía: Todo instrumento material o administrativo que sirva para degradar el impacto del daño, causando los peligros de las fuentes de energía en los elementos a proteger.

Después de conocer los conceptos elementales, se describen los pasos a seguir para la construcción del diagrama de este método.

Identificación de las fuentes de energía: Toda actividad, proceso o instalación tiene asociado riesgos, son estos riesgos los cuales permiten identificar las fuentes de energía. Para cada una de las fuentes se puede hacer un análisis, por lo tanto, se selecciona una fuente a la vez.

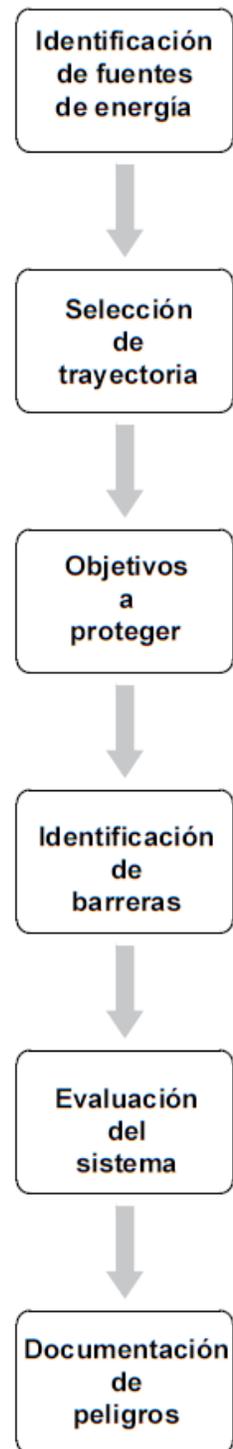


Fig. 3. 5
Construcción del
Análisis de
Barreras.

Selección de trayectoria: Las fuentes de energía suelen tener una secuencia de eventos los cuales pueden causar daños a los alrededores. Cada una de las secuencias concluye en un daño específico y se analiza de forma individual.

Identificación y selección de objetivos a proteger: Al definir las trayectorias es fácil identificar los objetivos que se desean proteger.

Identificación de las barreras de seguridad: Se identifican los tipos de barreras existentes o de posible implementación para degradar el impacto que pueda causar una fuente de energía.

Evaluación de los sistemas de protección: Al tener identificadas las barreras, éstas se deben analizar con detalle para posteriormente evaluar la eficacia y efectividad de protección que puede proporcionar.

Documentación de peligros: Al tener una evaluación, la cual proporcione el grado de seguridad con el que cuenta el sistema se pueden documentar los resultados obtenidos.

C) Observaciones del método

- El método es sistemático y permite construir una estructura lógica de eventos donde las barreras protegen de los posibles peligros.
- El método se puede aplicar a instalaciones sencillas o complejas que cuenten con distintos tipos de barreras para una o más fuentes.
- El método tiene un alcance limitado porque se enfoca en las barreras físicas, pero suele ignorar algunos factores, como el error humano.
- El método permite el análisis exhaustivo de los riesgos posiblemente presente en las trayectorias de las fuentes de energía.
- El método es sencillo de aplicar, pero se requiere una buena información de las barreras y sus peligros.

CAPITULO IV. EL MÉTODO BOW-TIE

4.1 El Bow-Tie como método de análisis de riesgos

El Método Bow-Tie es una herramienta de evaluación de riesgos la cual permite el análisis de escenarios, dando a conocer los posibles peligros enfrentados por una organización, además fundamenta con información técnica la toma de decisiones sobre la administración del riesgo por parte del personal directivo. El Bow-Tie toma su nombre de la forma adquirida por el diagrama cuando es representado gráficamente, similar a una corbata de lazo o también llamada corbata de moño. Como se muestra en la Fig. 4.1 [14].

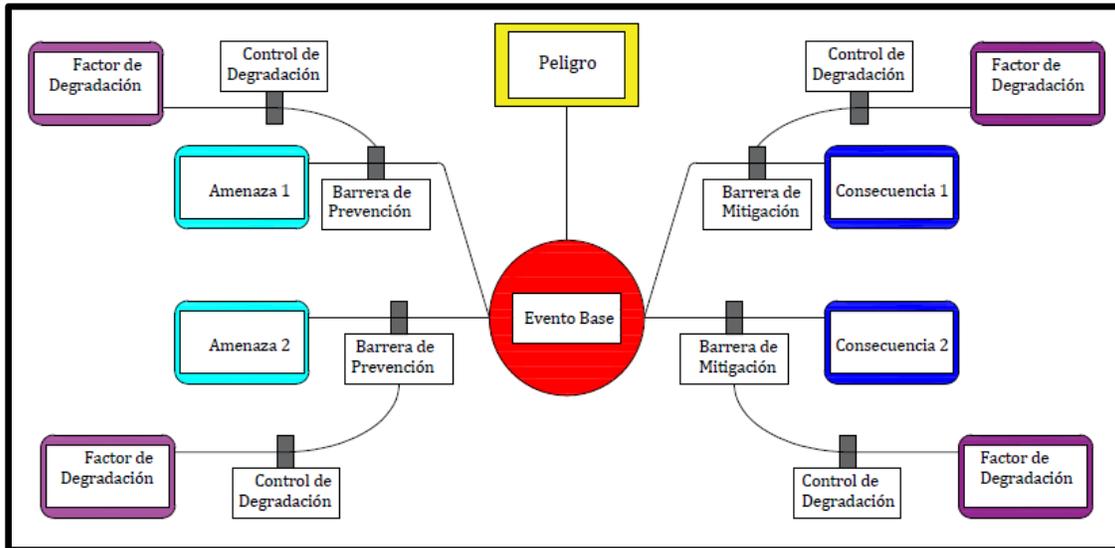


Fig. 4.1 Diagrama de Bow-Tie.

Esta representación muy amigable la convierte en una herramienta de comunicación muy eficaz porque brinda información sobre un evento de riesgo junto a las posibles amenazas causantes, análogamente muestra la relación entre las posibles consecuencias resultado del riesgo del evento base. Si bien existen métodos de análisis similares con la capacidad de brindar información sobre las relaciones causales entre amenazas, consecuencias y peligros, es el análisis detallado de las barreras y las relaciones con las formas de control lo que la convierte en una herramienta muy completa como instrumento de análisis.

4.2 Los Elementos del Bow-Tie

El método se fundamenta en algunos conceptos elementales, cada uno de ellos debe ser muy bien comprendido para una buena construcción del diagrama, a continuación, los mencionamos: Peligro, Evento Base⁸, Consecuencia, Amenaza, Barrera, Factor de Degradación y por último Control de Degradación. Los elementos serán explicados con detalle para un buen entendimiento del método, posteriormente en el capítulo 6, se desarrolla cada uno en el caso de aplicación.

A) Peligro

Las actividades con sus procedimientos, los equipos junto a sus condiciones de operación, las sustancias y sus propiedades fisicoquímicas pueden tener en algunas situaciones cierto nivel de riesgo. Cada una de las situaciones mencionadas pueden ser llamadas fuentes de riesgo, si se asocian a un escenario en particular proporcionando con ello una idea del nivel de daño que se puede llegar a causar bajo ciertas condiciones, cada una de estas situaciones en particular puede ser identificadas como un “Peligro”. En la Fig. 4.2.1 se observa que el peligro es el primer elemento en un diagrama de Bow-Tie.

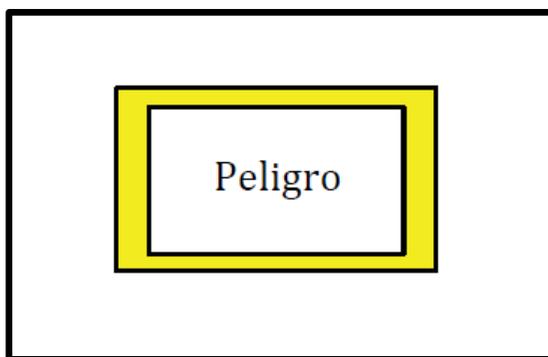


Fig. 4.2.1 Representación de un peligro en el Bow-Tie.

⁸ En este documento el Término Top Event utilizado en la bibliografía en inglés se traduce como Evento Base en todo el texto. En otros textos se traduce como evento principal.

Definir un peligro es el paso inicial en la construcción del diagrama de Bow-Tie, hacer una buena elección permite determinar el alcance y fijar el nivel de detalle que tendrá el Bow-Tie [10]. Los peligros suelen ser parte del negocio como situación habitual, a menudo son la razón de existir de la empresa, además, de ser fundamentales para ejecutar una operación que genera valor. Entonces puede decirse sobre ellos que son situaciones bajo control en condiciones normales, pero pueden desencadenar una secuencia de eventos no deseados al perderse el control sobre los mismos [14].

Formular un peligro no es algo complejo, pero se deben elegir las palabras precisas y suficientes para proporcionar información adecuada del escenario que se planea describir y analizar. Al momento de formular un peligro es recomendable observar aspectos cualitativos, estos permitirán idearse el escenario de riesgo. Aspectos acerca del contexto donde se desarrolla el evento o aspectos geográficos pueden ayudar. También se pueden utilizar variables cuantitativas, éstas proporcionarán una idea de la magnitud del acontecimiento, esto ayuda a describir un peligro de forma más adecuada, porque brinda más información detallada sobre el proceso, dando una magnitud o escala del evento no deseado.

Se utilizan herramientas distintas al Bow-Tie, para la identificación de peligros en la industria de procesos, algunos de ellos son: El HAZOP, HAZID⁹, PHA¹⁰, entre muchos otros [12]. A partir de una amplia identificación de peligros se pueden seleccionar aquellos en los cuales es preciso profundizar en detalles sobre las secuencias de eventos que pueden presentar. Como consejo final al formular un peligro se debe utilizar un lenguaje entendible, seleccionando un escenario en una situación bajo control de la cual pueda deducir una secuencia de eventos que reflejen el daño potencial.

⁹ Método que se utiliza para la identificación de riesgos llamado en inglés Hazard Identification.

¹⁰ Método utilizado para la identificación y análisis de riesgos que lleva el nombre de Preliminar Hazards Analysis.

B) Evento Base

Como lo menciona el Manual de la Metodología BowTieXP de la CGE Risk –Un evento base no es una catástrofe aún, pero expone a la compañía a los daños potenciales que tienen probabilidad de ser ocasionados por un peligro [14]. Después de seleccionar un peligro llega el momento de definir el evento base, este es el elemento principal, conecta las amenazas con las posibles consecuencias. Se puede ver como el momento justo cuando se pierde el control sobre el peligro o se pierde la contención del peligro y culmina en consecuencias causantes de daños o pérdidas. Este tipo de eventos se desea no ocurran, pero si llegaran a suceder se debe hacer lo posible por recuperar el control y evitar la ocurrencia de siniestros.

Para formular el evento base se debe dar una idea del concepto de pérdida de control en un determinado escenario y la forma como ocurre. Además de agregar información cualitativa o cuantitativa de contexto, esto permitirá indagar sobre las posibles amenazas, sistemas de barreras y consecuencias, relacionadas con el evento base. El analista debe tener cuidado de seleccionar aquellos eventos base, claves para los objetivos del análisis y no confundir con un peligro o consecuencia, ya que si se requieren estudiar distintas posibles pérdidas de control sobre un peligro será preciso realizar más de un diagrama de Bow-Tie. La ubicación del evento base es en el centro del diagrama como se muestra en la Fig. 4.2.2.

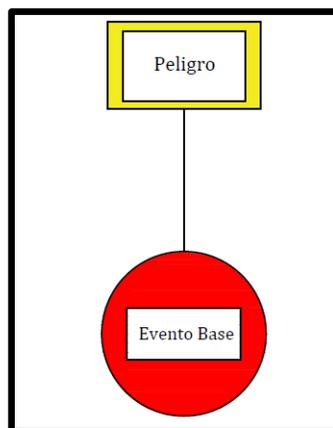


Fig. 4.2.2 Representación de un evento base en el Bow-Tie.

C) Consecuencia

Las consecuencias son la principal razón que incentiva la creación de un diagrama Bow-Tie, estos eventos no deseados conducen a pérdidas o daños, los cuales se desean evitar durante la vida operativa de una organización [14]. El método se puede utilizar para el análisis de todo tipo de riesgos, pero para el alcance definido en este trabajo se analizarán escenarios de eventos mayores. El motivo de esta decisión es porque los escenarios de riesgos mayores suelen ser los más severos en impacto sobre los bienes y los de mayor percepción por el público en general cuando ocurren.

Para la selección de las consecuencias utilizadas en el diagrama, cada una de ellas debe ser un resultado posible del evento base, la selección de una consecuencia específica debe permitir el análisis de las barreras. Se deben evitar seleccionar escenarios triviales para no generar un Bow-Tie genérico, se busca proporcionar un diagrama que genera valor para la toma de decisiones.

La calidad de un buen diagrama radica en la información que brinda, la parte más importante son las consecuencias seleccionadas. Al hablar de consecuencias a menudo se suele pensar en lesiones, muertes, pérdidas económicas o daño al ambiente [10]. Estos pueden ser el resultado de un escenario de riesgo cualquiera, generando con ello un diagrama no muy útil. La tarea de formular una consecuencia en el Bow-Tie debe ir más allá, pensando en un evento que describa una relación entre el evento base y la posible fatalidad.

Una buena consecuencia debe permitir implementar el análisis de los sistemas de mitigación (barreras de mitigación), éstas contribuirán al impedimento de las consecuencias. Una consecuencia bien redactada debe proporcionar una idea de la magnitud de la fatalidad que sea coherente y predeciblemente lógica. En la Fig. 4.2.3 se muestra el lugar que ocupan las consecuencias.

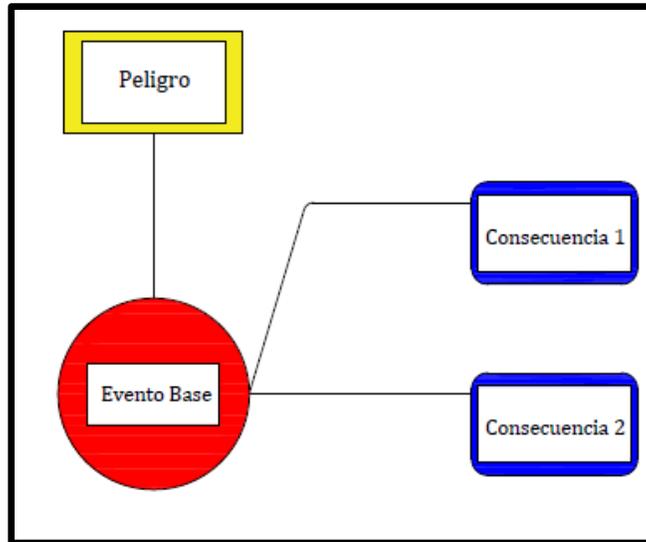


Fig. 4.2.3 Representación de consecuencias en el Bow-Tie.

Es indistinto el orden en el cual se formulan las consecuencias y las amenazas, pero se sugiere seleccionar primero las consecuencias porque de esta forma se tiene una referencia concreta sobre las posibles amenazas causantes del evento base.

D) Amenaza

El método Bow-Tie posee la característica de mostrar las relaciones causales entre las amenazas y el evento base. En esta sección se describe a detalle el concepto de amenaza; suele ser el evento antecedente a la pérdida de control sobre el peligro para desencadenar el evento base [10]. En la práctica para poder identificar las amenazas, es importante el conocimiento de las fuentes de riesgo, el Bow-Tie como lo mencionamos anteriormente no es un instrumento de identificación de causas de peligros, pero puede auxiliarse de métodos que sí lo son, para la identificación puede ayudar, llevar a cabo sesiones de tormentas de ideas con el personal adecuado que conozca los aspectos necesarios que se requieran cumplir.

Las amenazas deben cumplir algunas características para su utilización en el diagrama de Bow-Tie, cada una de las amenazas debe tener una descripción adecuada, ésta debe permitir percibir de forma clara y directa la forma como se lleva a cabo el desarrollo de la misma dando origen a la pérdida de control sobre el peligro, además las amenazas deben ser independientes, suplir de esta condición no excluye que se lleve a cabo el desarrollo de múltiples amenazas en forma paralela o consecuyente, incrementando la probabilidad de ocurrencia de un evento base [10].

Para un evento base pueden existir distintas amenazas que lo causen, es decir, cada una por si sola puede lograr la ocurrencia de la consecuencia, pero es recomendable que se analicen aquellas muy severas, pero poco probables. Otro aspecto que tomar en cuenta al llevar a cabo el análisis es la existencia de barreras, factores de degradación y sistemas de control, estos incrementan la comprensión de cómo pueden interactuar todos los elementos en el sistema. Las amenazas se ubican en la sección izquierda del diagrama como lo muestra la Fig. 4.2.4.

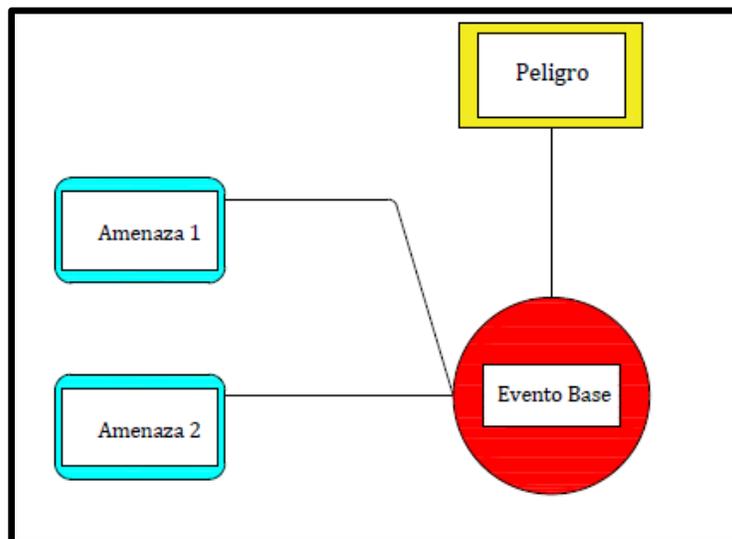


Fig. 4.2.4 Representación de amenazas en el Bow-Tie.

E) Barrera

El peligro, evento base, amenaza, y consecuencia forman la estructura característica del diagrama de Bow-Tie, dando a conocer los escenarios de eventos no deseados, pero son las barreras los elementos con una gran importancia ya que permiten evaluar la protección con que se cuenta frente a los distintos peligros.

¿Qué son las barreras? Generalmente, son todas aquellas medidas con la capacidad de actuar contra aquellos eventos que buscan alterar el estado de normalidad en las condiciones deseadas sobre un peligro [10]. Las barreras pueden tener distintas funciones dependiendo del elemento contra el cual actúan además de brindar un análisis detallado de los sistemas disponibles para la prevención, el control o la mitigación de las amenazas, el evento base y/o las consecuencias.

De acuerdo con la función a desempeñar, las barreras pueden utilizarse en ambos lados del evento base, se nombran barreras de prevención o proactivas si se colocan entre las amenazas y el evento base, pero si se ubican entre éste y la consecuencia se nombran barreras de mitigación o de recuperación. Frente a las amenazas una barrera puede actuar de dos formas distintas, por un lado, trata de eliminar la amenaza actuando antes de materializarse ésta y, por otro, trata de prevenir el evento base en cuyo caso ya no actúa específicamente sobre la amenaza, pero evita que se desarrolle el escenario del evento base [14].

Los peligros conducen a las consecuencias cuando se pierde el control sobre el evento base, nuevamente las barreras pueden actuar atenuando la probabilidad o mitigando la severidad de las consecuencias. Las barreras de recuperación actúan con el fin de recuperar el control para que un suceso no deseado culmine en una consecuencia, en caso de ya haber ocurrido el evento base, se debe tratar de mitigar el acontecimiento para evitar una consecuencia fatal. Es importante que cada una de las barreras sean independientes, efectivas y auditables para tener un marco de referencia con la capacidad de evaluar la calidad de las barreras.

La formulación correcta de las barreras es importante porque permite transmitir a los usuarios del diagrama no solo los elementos que forman parte de la barrera sino también muestran el momento justo y la forma como actúa sobre la amenaza, evento base o consecuencia. Puede existir más de una barrera en las trayectorias conductoras al evento base o las consecuencias, pero es recomendable ubicarlas conforme el tiempo en el cual actúan, además, de no ser dependientes de las amenazas o de las otras barreras. La Fig. 4.2.5 muestra el lugar ocupado por las barreras en los diagramas de Bow-Tie.

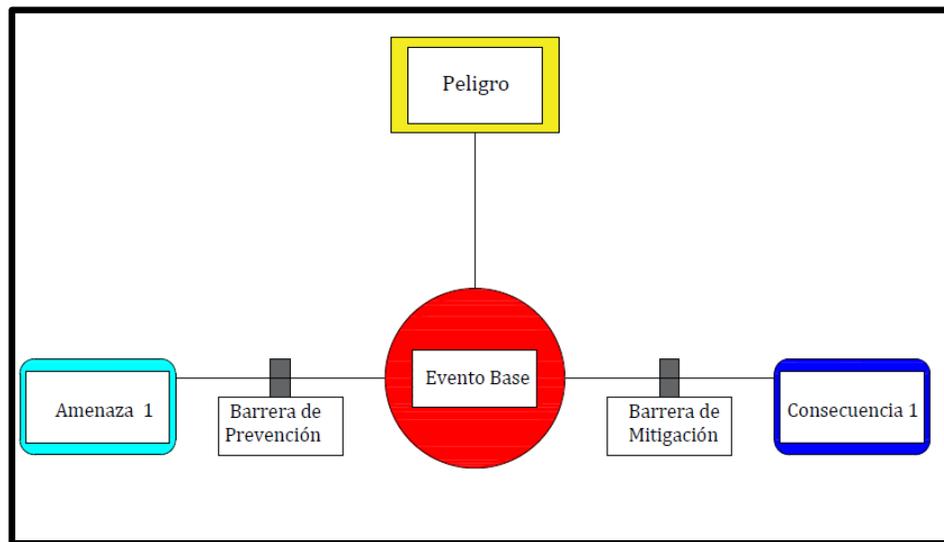


Fig. 4.2.5 Representación de barreras en el Bow-Tie.

F) Factor de degradación

Existen elementos en el Bow-Tie, los cuales disminuyen el buen desempeño de las barreras para el momento en el cual son requeridas. Estos son los factores de degradación, a menudo suelen ser situaciones que merman la efectividad de una barrera aumentando la probabilidad de falla, ocasionando un evento base o una consecuencia indeseada [10]. El lugar ocupado por los factores de degradación en el diagrama es la parte inferior de la barrera a la cual puede afectar, como lo indica la Fig. 4.2.6. En la redacción de un factor de degradación debe quedar claro el factor causante de la falla de la barrera, con esto se puede indagar sobre las posibles medidas de control que se pueden implementar.

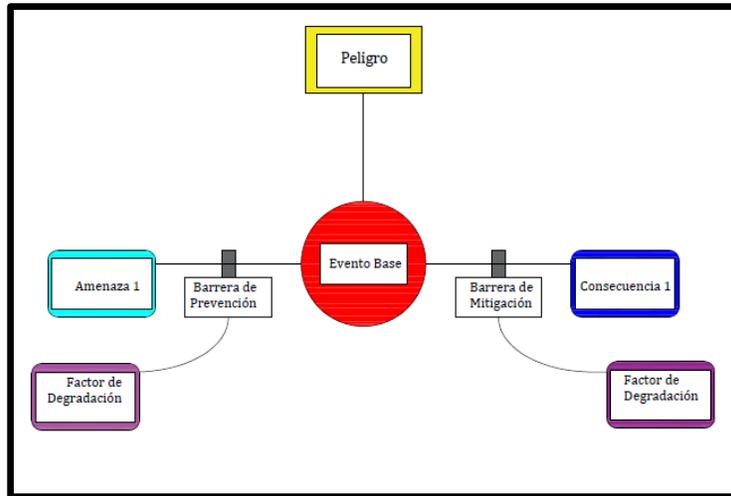


Fig. 4.2.6 Representación de factores de degradación en el Bow-Tie.

Los factores de degradación no deben indicarse solo como un modo de falla de las barreras, sino que deben agregar información que permita relacionarse a algunos instrumentos que incrementen la fiabilidad de las barreras.

G) Control de Degradación

Los controles de degradación son una parte importante del diagrama Bow-Tie, porque buscan prevenir el deterioro de las barreras con acciones asociadas al error humano, condiciones anormales o fallas en los servicios secundarios. Suelen ser menos rigurosas a diferencia de las barreras, pero están asociados a sistemas administrativos o técnicos. Puede existir más de un control de degradación para una barrera, pero se recomienda se mencionen solo aquellas que proporcionan una protección significativa.

Los controles de degradación suelen ubicarse entre las barreras y los factores de degradación sobre los cuales actúan como lo indica la Fig.4.2.7. Por último, se mencionan ejemplos posibles de fundamentar un control de degradación: estándares de ingeniería, gestión de contratistas, gestión de sistemas de cambio, capacitación o evaluaciones de seguridad laboral entre otros.

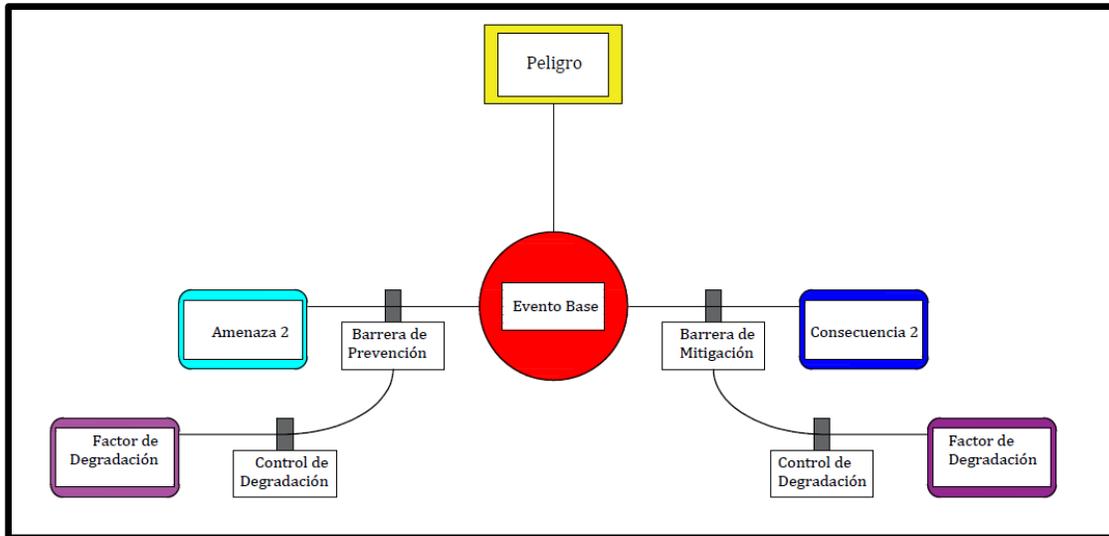


Fig. 4.2.7 Representación de los controles de degradación.

4.3 Recomendaciones para el desarrollo de un Bow-Tie

Los diagramas de Bow-Tie presentan un formato visual, éste permite la comprensión de las causas y las consecuencias de los principales peligros, con las distintas barreras, de forma entendible para personas no expertas, personal de campo, ingenieros y gerentes [10]. A continuación, se dan algunas recomendaciones aplicables al momento de llevar a cabo un taller para la realización de un Bow-Tie.

Es común utilizar un diagrama Bow-Tie para comprender las barreras y los controles además de permitir evaluar si son suficientes para cumplir con los requerimientos de seguridad [14]. El diagrama puede ser realizado por personas conocedoras del método, partiendo de otros diagramas realizados con anterioridad, pero en este caso el producto final debe ser realizado por un experto. Lo más recomendable para la elaboración de un diagrama de Bow-Tie es realizar un taller donde participe personal experto, esto permitirá la discusión y el análisis desde distintos enfoques.

La realización de un taller es prácticamente un conjunto de sesiones estructuradas donde se llevan a cabo tormentas de ideas, en ellas participan: un líder, un secretario y un equipo de expertos familiarizados con el proceso u operación sobre el cual se realiza el estudio. De las sesiones debe resultar información consensuada, ésta permitirá el desarrollo de los diagramas. El número de diagramas resultantes se debe acordar entre los participantes de acuerdo con la extensión del estudio. A continuación, se dará una descripción de cada participante del taller.

Líder: Este será el guía del taller. Se recomienda que tenga una amplia experiencia en campo, con un conocimiento profundo del proceso. Se va a encargar de controlar las intervenciones de los participantes e incentivar las discusiones en los detalles donde se podría requerir una mayor profundidad para obtener información consensuada entre todos los participantes. De igual manera el líder dará una introducción sobre las estrategias y el cómo se va a desarrollar toda la metodología y el taller.

Secretario: Este debe conocer los métodos de evaluación de peligros a utilizar y entender de forma general el proceso de análisis de riesgos. Debe saber sintetizar ya que esta habilidad le va a permitir condensar las ideas clave, éstas permitirán el desarrollo de los documentos preliminares para la elaboración de los diagramas. Junto al líder debe revisar la calidad y coherencia de los diagramas generados durante las sesiones. Debe hacer el trabajo de síntesis de forma eficiente para facilitar el desarrollo de conclusiones entre los participantes y el líder.

Equipo de trabajo: Son los encargados de aportar información sobre aspectos importantes de las operaciones diarias. Suelen estar conformados por los siguientes encargados: ingeniero de procesos, ingeniero de operaciones, ingeniero de mantenimiento, ingeniero de instrumentación y control, ingeniero de seguridad y análisis de riesgos, así como técnicos o personal con conocimientos requeridos de forma especial. Se recomienda que no cambien los miembros del equipo durante el desarrollo de las sesiones para lograr una mejor fluidez en el desarrollo del taller.

Existen algunas acciones, las cuales son requeridas para una buena organización y ejecución del taller, entre ellas destacan las siguientes:

- a) Determinar con el personal administrativo y técnico los objetivos y propósitos del estudio, así como acordar el alcance de éste. Junto a ello se debe planear la forma de trabajo a adoptar para el desarrollo del taller.
- b) Documentar la información técnica disponible para un buen análisis de peligros en las instalaciones, los principales documentos son los siguientes: Diagramas de flujo de proceso, diagramas de instrumentación y control, planos de distribución de equipos, planos de las instalaciones, hojas de datos de sustancias y manuales de procesos y operación.
- c) Motivar la participación de cada uno de los participantes ya que ellos pueden motivar el análisis de escenarios habituales, pero también de casos especiales los cuales lleven a situaciones de riesgo poco comunes con la posibilidad de llegar a tener un alto impacto en la administración de riesgos.
- d) Evaluar de forma objetiva la calidad y coherencia de los diagramas Bow-Tie generados.

El éxito de un buen Bow-Tie depende mucho del desempeño del facilitador y del grado de compromiso por parte de los miembros del equipo, así como también del nivel de participación de cada uno de ellos.

CAPITULO V. IMPORTANCIA DE LOS ANÁLISIS DE RIESGOS

5.1 Concepto de riesgo

La ocurrencia de catástrofes en la industria de procesos es baja, pero si llegan a ocurrir causan daños considerables. Por ello es importante que la industria de procesos evolucione de la mano con los sistemas de administración del riesgo así como con sus formas de análisis de riesgos esto para una mejor seguridad en los procesos.

Si bien el concepto de riesgo nace de la percepción humana sobre los eventos con capacidad de causar daños o pérdidas, existen dos variables, éstas nos ayudan a definirlo. La primera de ellas es la probabilidad o también llamada frecuencia de ocurrencia de un evento la segunda variable es la severidad o consecuencia, ésta se relaciona con el grado de impacto de daño posible de causar. Se puede evaluar el riesgo y con ello categorizarlo de acuerdo con los niveles de tolerancia si se le asigna un valor con una expresión de la siguiente forma:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

El Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos (Center for Chemical Process Safety, CCPS), en el libro “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis” propone la siguiente definición:

“El riesgo es una medida de la lesión humana, daño al ambiente o pérdidas económicas en términos de la probabilidad de ocurrencia del incidente y la magnitud de las pérdidas o daños” [15].

El libro de PMBOK, el cual es referencia en la administración de proyectos, menciona que la administración del riesgo incluye los procesos donde se lleva a cabo la planificación de la gestión, identificación, análisis, planificación de la respuesta, implementación de la respuesta y monitoreo de los riesgos en un proyecto [16]. Con ello el deber ser de una empresa es garantizar instalaciones diseñadas y operadas con un nivel de riesgo aceptable.

La fiabilidad de la seguridad en las empresas se puede lograr con sistemas de administración eficientes, estos permitirán el uso de buenas prácticas, procedimientos de seguridad efectivos y un buen desempeño y gestión de los recursos humanos.

5.2 Administración del riesgo

La administración del riesgo es un proceso de varias etapas, pero es la etapa de análisis donde se deben plantear escenarios lógicos, estos lograrán una visión completa de los riesgos y sus posibles consecuencias. Se pueden aplicar distintas metodologías y cada una de ellas ofrece ventajas y desventajas. El análisis tiene una secuencia de pasos generalizados, estos suelen cubrir las distintas metodologías de análisis [17]. En la figura 5.2.1 se muestra un diagrama con la secuencia de acciones.

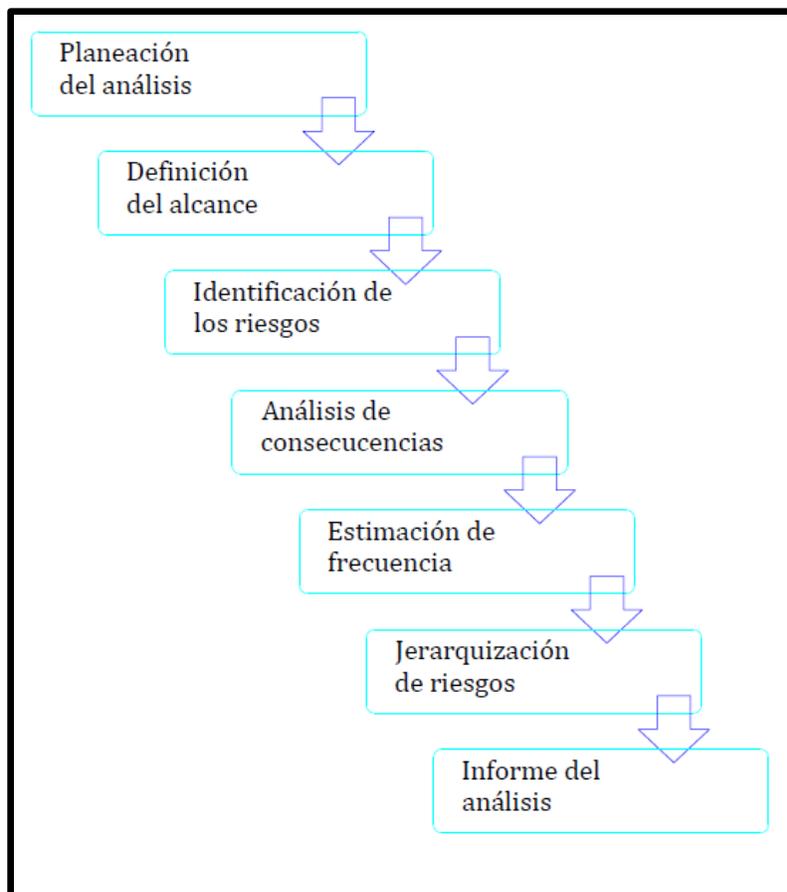


Fig. 5.2 Etapas del análisis de riesgo.

Las etapas son descritas a continuación:

a) Planeación del análisis: Primera etapa, en ella se establecen los lineamientos, reglamentos y marco normativo o técnico en el cual se va a fundamentar el análisis. Se seleccionan las metodologías a utilizar durante el análisis, se solicita la documentación técnica requerida del proceso y la instalación. También se define el equipo, organigrama y plan de trabajo.

b) Definición del alcance: Se busca conocer las necesidades y requerimientos de quien será el usuario del análisis de riesgo. Con el análisis de la información técnica recabada se lleva a cabo la definición de los objetivos y el alcance el cual tendrá el estudio. Esto dará una idea del grado de detalle y la profundidad al elaborar el análisis.

c) Identificación de los riesgos: Etapa donde es fundamental la experiencia y el conocimiento de los expertos, esta visión permitirá visualizar aquellos escenarios que conduzcan a eventos no deseados o problemas relacionados con la operación del proceso o proyecto. Los análisis históricos de incidentes y análisis de riesgos previos se pueden tomar como punto de partida en esta etapa.

d) Análisis de consecuencias: Etapa donde se deben plantear las consecuencias de un evento iniciador, suele guiarse por el grado de detalle del estudio y la especificación del riesgo. Aquí en esta etapa se puede utilizar la matriz de riesgo como criterio para la estimación del daño de posibles consecuencias.

e) Estimación de frecuencia: Al tener definida una consecuencia debemos continuar con el análisis de la frecuencia. En esta etapa pueden servir los registros de datos históricos de incidentes de la misma instalación o de las instalaciones que manejen el mismo proceso y sean parecidos. Si no se cuentan con los datos históricos se pueden recurrir a correlaciones o modelos probabilísticos.

f) Jerarquización del riesgo: Al tener una idea de la consecuencia y su frecuencia, se puede evaluar el riesgo para compararlo con un criterio de aceptación. Los criterios de aceptación pueden variar abarcando aspectos de salud, seguridad, ambiente, económicos, entre otros.

g) Informe de análisis del riesgo de procesos: Es la etapa final que va a recopilar todos los resultados y observaciones para condensarlo en un informe de análisis de riesgos de proceso. En este informe se van a incluir las observaciones más relevantes con el fin de plantear aquellas recomendaciones, éstas permitirán la mitigación o atenuación del riesgo. Esto dará origen a estrategias y decisiones que permitan la toma de decisiones para la administración del riesgo.

5.3 Principio ALARP

El análisis de riesgos nos permite llevar a cabo la identificación y evaluación de los peligros que pueden afectar la vida operativa de una instalación además de eso puede darnos una idea del nivel de riesgo con el que se cuenta dependiendo si se utiliza un método de evaluación cuantitativo o cualitativo. En la industria de procesos se utiliza el principio ALARP para aplicar criterios de aceptabilidad. Fig. 5.3. Este principio tiene la función de categorizar el nivel de riesgo utilizando factores como lo son: los recursos disponibles, el nivel de riesgo original y el nivel de riesgo alcanzado si se realiza la implementación de salvaguardas [18].

Es común asociar el principio ALARP¹¹ con un Análisis Costo Beneficio, pero en la administración del riesgo en procesos se debe tomar en cuenta la probabilidad de que las cosas no salgan bien y conduzcan a eventos no deseados además del costo de mantener inoperativa la instalación por la posible falla. Es decir, se debe ponderar el grado de protección ganado por implementar las barreras y el precio a pagar por ello [12]. En esta decisión influye mucho la capacidad financiera de la empresa y el grado de riesgo aceptable que no afecte la operación de una instalación.

¹¹ “As Los As Reasonably Practicable” es un criterio que permite evaluar la tolerancia al riesgo en español se puede traducir como Tan Bajo Como Sea Razonablemente Factible.

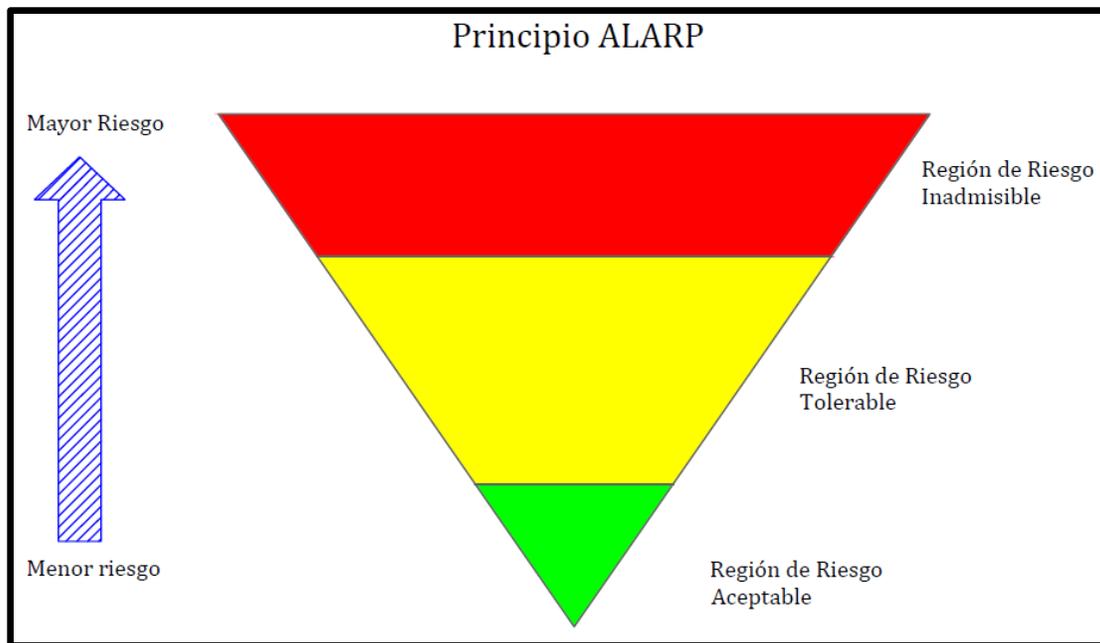


Fig. 5.3 Principio ALARP.

Después de aplicar el principio ALARP se puede llevar a cabo la Administración del Riesgo, pero en una empresa esto no es más que el comienzo para empezar la ejecución de otra etapa llamada Administración del Cambio donde se monitorea y da soporte a las decisiones tomadas.

CAPITULO VI. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO BOW-TIE PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS.

6.1 Análisis de riesgos con el Método Bow-Tie

En esta sección se realizará el análisis de riesgos para una “Estación de servicio de gas natural comprimido de uso vehicular” con un enfoque cualitativo utilizando el Método Bow-Tie. Para el estudio se cuenta con información sobre las instalaciones, los procedimientos y las condiciones de operación.

Es importante conocer los riesgos inherentes de este tipo de instalaciones debido a que se encuentran en un entorno en el cual podrían causar daños a la sociedad civil. En la normativa mexicana es la NOM-028-STPS-2012 en su numeral 5.3 la cual exige a las empresas contar con un análisis de riesgos en procesos y equipos críticos con sustancias químicas peligrosas, con el fin de tener un sistema de administración de seguridad, evitando la ocurrencia de eventos mayores y proteger de daños a las personas, a los centros de trabajo y a su entorno [19].

Se van a describir con detalle las condiciones de operación de los equipos, con ello el lector obtendrá una clara comprensión de la identificación de los peligros, así como los elementos que se utilizan para la elaboración del diagrama. De la misma manera se van a resumir el conjunto de recomendaciones, preguntas guía e información complementaria que se utilice para la elaboración del diagrama.

6.2 Descripción general del proceso

La estación de servicio de Gas Natural (GN) comprimido se encuentra en una zona urbana ubicada en Cd. Juárez, Chihuahua; la estación cuenta con una capacidad de suministro de 33,600 Sm³/día; erigida en un área construida de 107 m², en un terreno de 7200 m² disponibles. Se procesa gas natural, el cual está compuesto por una mezcla de hidrocarburos cuya composición es 94% de Metano, 4.5% de Etano y 1.5% de otros hidrocarburos y gases como dióxido de carbono y nitrógeno.

El proceso se divide en secciones según la actividad a realizar, cada una de ellas se mencionan a continuación: a) Estación de regulación y medición, b) Equipo secador, c) Equipo de presurización, d) Sistema de almacenamiento en tanques y e) Isla de suministro con dispensarios. En la Fig., 6.2 se puede ver un plano de las secciones de la planta de distribución.

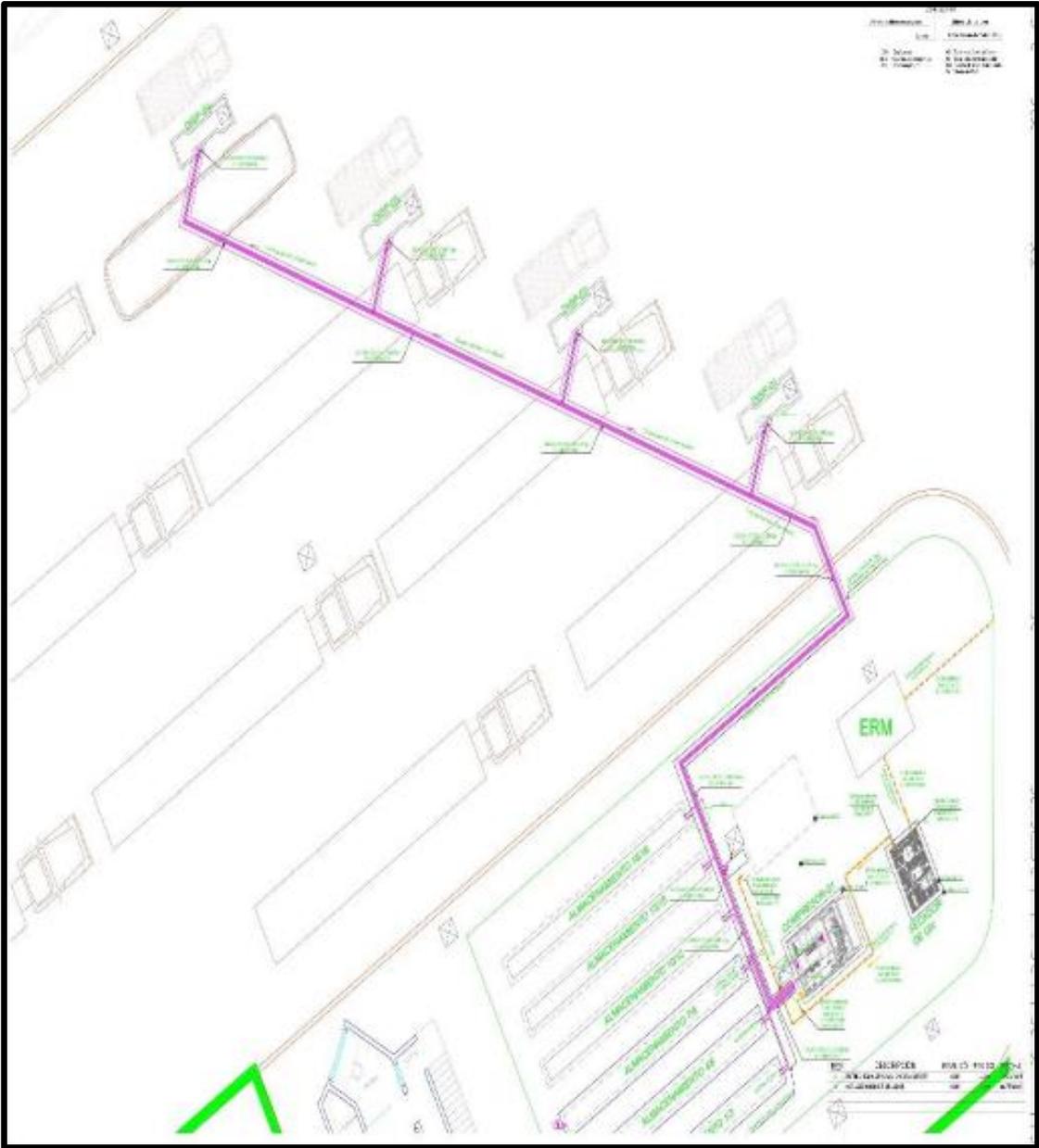


Fig. 6.2 Plano de las distintas secciones de la planta de distribución.

El proceso, consiste en el llenado de gas natural comprimido a vehículos automotores, para ello, se tiene que acondicionar el gas de las condiciones del sistema de ductos a las condiciones de operación de consumo. El proceso inicia en la estación de regulación y medición (ERM) donde se recibe un flujo de 1400 Sm³/h a una presión de 157 psi de gas natural por medio de una empresa distribuidora nacional. Posteriormente la corriente de gas se hace pasar a través de un filtro secador con el objetivo de eliminar impurezas y disminuir la humedad, este equipo tiene la capacidad de procesar hasta 2550 Sm³/h a una presión de trabajo de 150 psi.

Después de la etapa de filtración, el GN se conduce en un ducto de 4'' de diámetro con un flujo de 469 Sm³/h y 100 psi de presión hacia un compresor que tiene una presión de succión de entre 60-101 psi y presuriza la corriente de gas hasta los 3600 psi, este equipo acondiciona el gas conforme a las características de consumo y se envía a través de una tubería de alta presión de 1'' de diámetro, ubicada en trincheras hacia la sección de venta al público.

Parte del gas comprimido se utiliza para satisfacer la demanda en la isla de dispensarios (alta presión) y también para su almacenamiento en la sección de tanques de almacenamiento (baja, media y alta presión). El área de almacenamiento cuenta con 18 tanques para Gas Natural Comprimido (GNC), cada uno con capacidad de 655 Sm³. Los tanques de almacenamiento permiten que el compresor tenga intervalos de inactividad en función de la demanda.

La isla de dispensarios de atención al público tiene cuatro unidades dispensadoras con capacidad de 350 Sm³/h (Capacidad total de 33,600 Sm³/día). Están ubicados en un patio de gran extensión (Aprox. 80 m²) esto con el fin de evitar aglomeraciones y ocasionar posibles impactos que causen daño a los equipos dispensadores.

6.3 Equipos de proceso

El proceso llevado a cabo en las instalaciones conlleva cambios en las propiedades físicas del fluido de trabajo a través de la modificación de variables de proceso: para ello utiliza equipo de alta tecnología, éste facilita la implementación de múltiples sistemas de seguridad en la operación de los equipos. Esto debido a las altas presiones y bajas temperaturas de operación del fluido, también debido a las propiedades fisicoquímicas que adquiere el gas natural.

La mezcla de GN suele ser segura si se maneja en zonas bien ventiladas y con procedimientos de seguridad adecuados, pero si ocurren fugas o fallas en los equipos pueden ocasionar escenarios de riesgos mayores esto debido a su inflamabilidad. A continuación, se describen los equipos que forman parte del proceso y su función principal.

A) Estación de compresión

Es el equipo donde se controlan y miden las variables como son: presión, temperatura, volumen, flujo y poder calorífico del GN proporcionado a través del gasoducto. La instalación está diseñada para manejar un flujo de 1400 Sm³ con una velocidad de flujo de 20 m/s y una presión de 157 psi en una tubería de 3" de diámetro. La característica esencial de esta etapa es proporcionar una presión constante al fluido sin importar el flujo.

B) Secador

La función del equipo secador es la eliminación de impurezas, así como también la disminución de la humedad, con esto se busca evitar que durante el proceso de compresión el GN se condense y acumule en las tuberías y/o tanques de almacenamiento. Este fenómeno es más probable que ocurra en temporadas de invierno donde las temperaturas suelen ser muy bajas en el área geográfica donde se encuentra instalada la estación.

La temperatura y presión de operación para este equipo son 25 °C y 130 psi. En la Fig. 6.3.1 se puede observar un diagrama del equipo secador para gas natural.

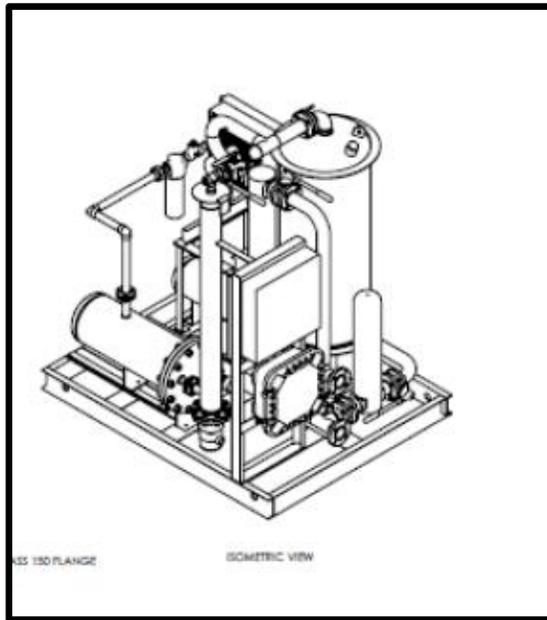


Fig. 6.3.1 Equipo secador de GN.

C) Compresor

Este equipo es el corazón del proceso porque proporciona el GNC a la presión a la cual está listo para ser almacenado en los tanques y/o despachado en las máquinas dispensadoras. Para la estación de compresión, con base a la demanda de servicio se seleccionó un compresor de arreglo en “W” de 4 etapas controlado por un sistema de PLC que de forma inteligente activa el equipo en el momento que es requerido, los controles son ubicados en el área de tableros en la subestación. La presión máxima de compresión que alcanza el gas es de 3600 psi. En la figura 6.3.2 se muestra un diagrama del equipo de compresión de gas natural.

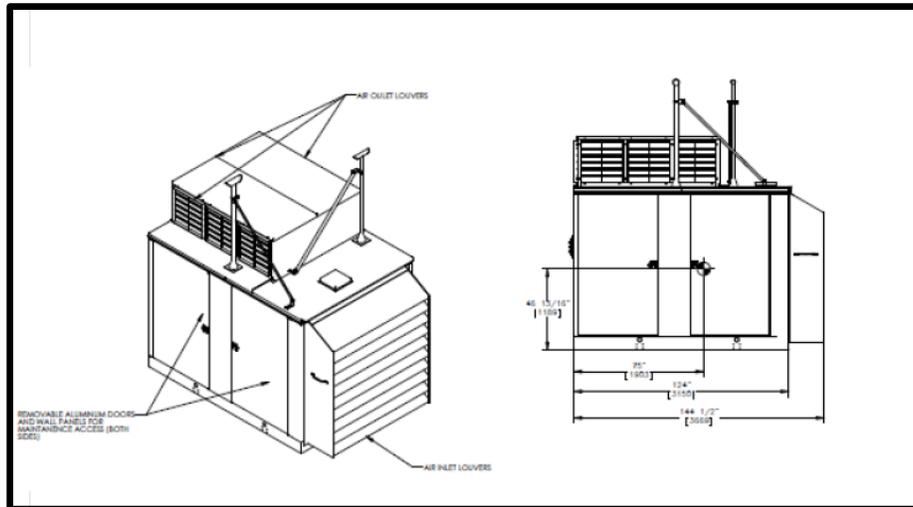


Fig. 6.3.2 Equipo de compresión de gas natural.

D) Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son un conjunto de 18 recipientes fabricados de acero al carbono en una sola pieza y se encuentran interconectados para ofrecer una mayor capacidad del almacenamiento, cada uno de los tanques tiene una capacidad de 655 Sm^3 (459 kg) su arreglo en paralelo da un margen de fluidez y velocidad de llenado que permite no requerir el trabajo continuo del compresor. Cada uno de los tanques cuenta con las válvulas de relevo y de descarga para liberar el exceso de presión o la presencia de condensados si llegaran a existir. Los tanques para el almacenamiento de gas son mostrados en la Fig. 6.3.3

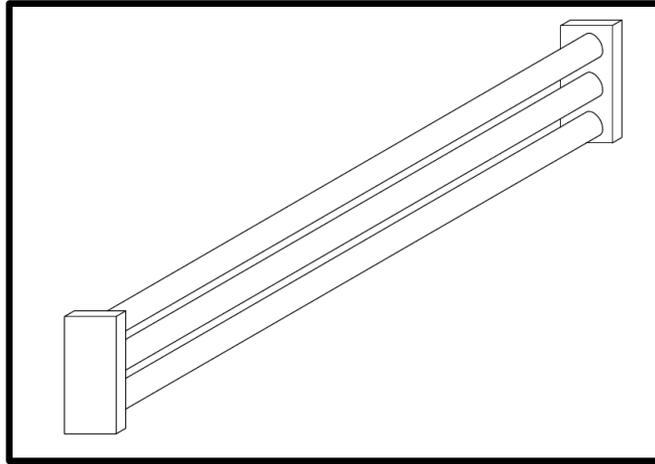


Fig. 6.3.3 Tanques de almacenamiento de GNC.

E) Dispensarios

Los equipos utilizados para despachar el gas cuentan con un sistema inteligente éste calcula y corrige el volumen de llenado del tanque tomando en cuenta las condiciones de llenado, la temperatura ambiente y del gas con el objetivo de evitar el sobrellenado del tanque. También se cuenta con válvulas solenoides y cableado a prueba de explosión en las instalaciones eléctricas. Además de sistemas de bloqueo de suministro en caso de ruptura o sobrepresión en las líneas. En la figura 6.3.4 se puede observar un diagrama del tipo de dispensadores utilizados en la estación de gas natural.

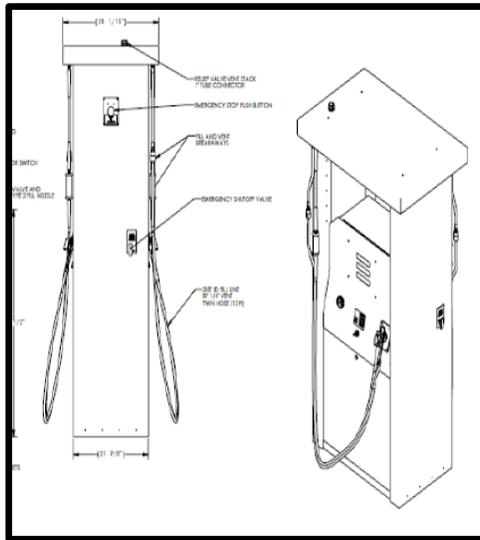


Fig. 6.3.4 Maquina que dispensa GNC en las islas.

F) Tuberías y accesorios

Las tuberías utilizadas en la estación ERM para la sección de baja presión son de los siguientes diámetros nominales: 4", 3" y 2"; distribuyen el gas hasta la llegada del compresor. Cuenta con un sistema de protección catódica a base de ánodos de sacrificio de magnesio.

6.4 Sistemas de seguridad y control en el proceso

Hemos descrito que la operación inicia con el suministro de gas natural de un ducto a través de una acometida hacia el sistema de regulación y medición, en esta etapa se cuenta con el conjunto de reguladores y medidores de flujo. Se garantiza que el valor de la presión sea constante con un flujo suficiente de acuerdo con lo requerido por los equipos de las etapas subsecuentes.

El sistema de tuberías en la sección ERM cuenta con válvulas reguladoras y de relevo para liberar sobrepresión aguas abajo además de válvulas de cierre y/o seccionamiento para llevar actividades de paro de emergencia o mantenimiento cuando sea requerido.

La sección de entrada a la etapa de compresión cuenta con una válvula de aislamiento manual para cortar el suministro de gas en caso necesario, seguida de una válvula de corte automática controlada de forma inteligente por un sistema PLC, regularmente esta válvula se abre al iniciarse el ciclo de compresión y se encuentra cerrada mientras el compresor está inactivo, ya sea debido a un paro manual o de emergencia también se puede cerrar por una falla en el suministro eléctrico o daño del actuador.

El proceso de compresión es un sistema de 4 etapas, donde el gas se hace pasar a través de pistones, los cuales permiten el incremento de la presión del gas al reducir el volumen de los cilindros sucesivos y suministrar trabajo. Esto ocasiona que las partículas tengan fricción entre ellas mismas e incrementen su temperatura debido al estrechamiento del volumen del pistón y al trabajo suministrado, por ello es necesario colocar un sistema de enfriamiento forzado entre cada etapa de compresión y un intercambiador de calor para el flujo de salida.

El compresor es activado por un sistema de PLC, el cual verifica mediante sensores la existencia de flujo a las condiciones de presión requerida en la succión (160 psi), las temperaturas y presiones en las interetapas, así como las condiciones de funcionamiento óptimas del motor y de los distintos componentes del sistema. Si esto no se cumpliera el sistema tiene la capacidad de emitir alarmas visuales y sonoras las cuales no cesan hasta corregir la anomalía.

Una vez comprimido el gas se envía a través de tuberías de acero inoxidable a la sección de equipos dispensarios si existe mucha demanda o al conjunto de tanques de almacenamiento, estas decisiones las toma un control inteligente de un sistema de PLC como el utilizado en la etapa de compresión. Los tanques de almacenamiento siguen normas internacionales y cuentan sistema de relevo de presión y de aislamiento individual por tanque.

La última sección es el punto de transferencia de GNC hacia los tanques de los vehículos, a través de las máquinas dispensadoras un sistema de PLC mide las condiciones de presión, flujo y temperatura, para llenar de forma correcta el tanque. Las máquinas dispensadoras cuentan con válvulas check las cuales evitan el contraflujo hacia tanques de almacenamiento además incluyen sistemas de seguridad, estos suspenden el flujo en caso de fuga y válvulas de relevo y venteos en caso de sobrepresión.

Por último, cada una de las secciones cuentan con paros de emergencia y equipos manuales de extinción contraincendios, con sus respectivos procedimientos y protocolos de emergencia haciéndolo suficiente en términos legales. (Esto, debido a que la normativa mexicana no exige el uso de aspersores contra incendio en las instalaciones).

6.5 Elaboración del Diagrama Bow-Tie

Es momento de seleccionar los elementos que van a formar parte del diagrama. Para el ejemplo de aplicación, se tomó la sección de compresión, como medio para explicar los eventos seleccionados. En el apéndice se muestran los diagramas para las distintas secciones que no se describen a detalle en esta sección.

A) Peligro

Como se indicó en la sección 4.2, la identificación de riesgos suele partir de las probables fallas que puede tener un equipo, para el caso de la estación de gas vehicular, las variables de proceso y sus condiciones de proceso son el punto de partida. En la Tabla 6.5.1 se proporcionan pautas que caracterizan un peligro con preguntas que pueden ayudar a formularlo.

Pautas	Preguntas clave
Forman parte de la operación normal del negocio	¿Qué puede causar daño en esta instalación?
Los peligros existen, con el potencial de causar daños	¿Qué cuidados se deben tener al llevar a cabo esta operación o procedimiento?
Debe ser descrito y definido con especial cuidado tomando en cuenta el alcance	¿Cuál puede llegar a ser la magnitud del daño que se puede causar?

Tabla 6.5.1 Pautas y preguntas guía sobre los peligros.

En un equipo, las variables de proceso junto a sus posibles desviaciones pueden ser una fuente de riesgo, como se analiza con la metodología HAZOP. A partir de ello podemos imaginar escenarios de riesgo los cuales pueden ocasionar peligros. Se ha seleccionado el compresor como ejemplo ilustrativo, por ser el corazón del proceso cuyo fin es comprimir gas natural. Para este las variables más importantes son: temperatura, presión y flujo.

Los escenarios de riesgos mayores son el objeto de estudio de esta tesis. Por este motivo se indaga sobre causas y consecuencias de este tipo de eventos. La presión es un factor decisivo para la operación de los distintos equipos en la instalación, eso la convierte en el hilo conductor para el desarrollo del diagrama Bow-Tie. Fig. 6.5.1.

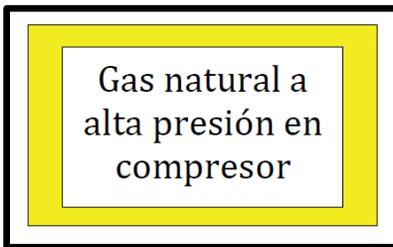


Fig. 6.5.1 Peligro para equipo de compresión.

El peligro describe un estado de operación normal, ¿Qué estados son condicionantes para el proceso llevado en la instalación de gas? Intuitivamente podemos responder que evitar fuentes de ignición. Pero antes de eso debemos pensar en la operación normal que estamos acostumbrados a ignorar en los hogares. ¿Qué lo hace normal? Los procedimientos y condiciones a las cuales nos apegamos a la hora de su manejo. Lo mismo ocurre en la estación de venta de gas: existen estados normales de operación, con ciertas condiciones, aunque son controladas son un riesgo si ocurre una falla.

Las altas presiones son el móvil que permite el flujo de gas en toda la instalación, por ello suele ser el estado considerado normal, donde el compresor proporciona la energía de presión al fluido, con esta descripción se puede enunciar lo siguiente: el “gas natural a alta presión en el compresor” puede ser un peligro si se sale de control. Cabe aclarar que se pueden analizar otros peligros en este mismo equipo, por ejemplo, altas temperaturas o altos flujos, pero debido a la gran extensión que puede tomar el análisis solo se desarrollará un solo peligro.

B) Evento Base

Una vez definido el peligro se debe elegir el evento base tomando en cuenta el alcance y el nivel de detalle. Fácilmente se puede describir como la pérdida de control o contención sobre el peligro, pero debe cumplir algunas características, y unas preguntas clave pueden ayudar a su identificación. Tabla 6.5.2.

Pautas	Preguntas clave
Generalmente describe cómo se pierde el control.	¿Cuándo es considerada una pérdida de control sobre este peligro?
Puede existir más de un evento base para un peligro específico.	¿Existen factores externos que conduzcan a la pérdida de control?
Al ser un estado de pérdida de control no se debe confundir con las consecuencias que son resultados del evento base.	¿Es una situación que puede desencadenar consecuencias indeseadas?

Tabla 6.5.2 Pautas y preguntas guía para el evento base.

El punto de partida para la selección del evento base puede ser la pregunta ¿Cuándo se considera que se ha perdido el control sobre el gas a alta presión en el equipo de compresión? Es justo en el momento cuando se pierde la contención sobre el fluido a alta presión dentro del equipo esto ocurre cuando existe una fuga.

En la Fig. 6.5.2 se muestra el peligro seleccionado anteriormente además del evento base recientemente seleccionado.

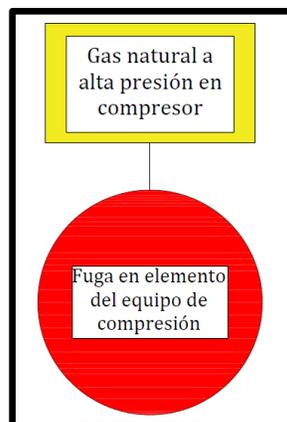


Fig. 6.5.2 Evento base para equipo de compresión.

C) Consecuencia

Las consecuencias son el principal evento que evitar ya que su ocurrencia causa pérdidas y daños con gran impacto en la vida operativa de una instalación. La selección de las consecuencias se debe basar en la inferencia sobre escenarios lógicamente probables derivados del evento base. La tabla 6.5.3 proporciona algunas pautas y preguntas guía para indagar sobre las posibles consecuencias.

Pautas	Preguntas clave
Son los eventos que se desea evitar que ocurran	¿Qué eventos podría ocasionar el evento base?
Pueden ser de baja probabilidad, pero de alto impacto	¿Cuál es la magnitud del daño que se podría causar?

Tabla 6.5.3 Pautas y recomendaciones para la selección de consecuencias.

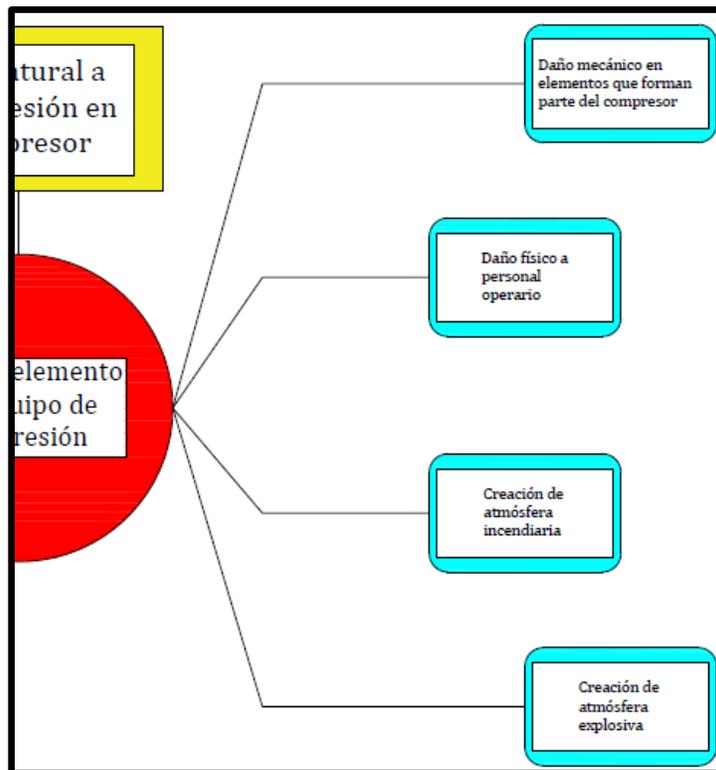


Fig. 6.5.3 Consecuencias para el equipo de compresión.

¿Qué eventos podría ocasionar el evento base? Observamos que para la selección de consecuencias podemos enfocarnos en posibles daños a las personas, instalaciones y posibles catástrofes, estos pueden terminar en pérdidas de vidas o económicas. Se han seleccionado las siguientes consecuencias: a) Daño mecánico en elemento que forme parte del compresor, b) Daño físico a personal operativo, c) Creación de atmosfera incendiaria y por último c) Creación de atmosfera explosiva. Es importante mencionar que una consecuencia no indica rápidamente la catástrofe inmediata sino más bien el evento que conduce a ella.

D) Amenaza

Ya se habló a detalle sobre las amenazas (capítulo 4), son las posibles causas, las cuales propician el evento base. Para su selección vamos a indagar sobre las causas, como en las secciones anteriores enunciar algunas pautas y preguntas clave (Tabla 6.5.4.), puede vislumbrar orígenes posibles del evento base.

Pautas	Preguntas Clave
Causa directamente el evento base	¿Qué puede causar que el evento base ocurra?
Debe ser suficiente e independiente	¿Cuáles son las causas del evento base en el pasado?

Tabla 6.5.4 Pautas para la selección de amenazas.

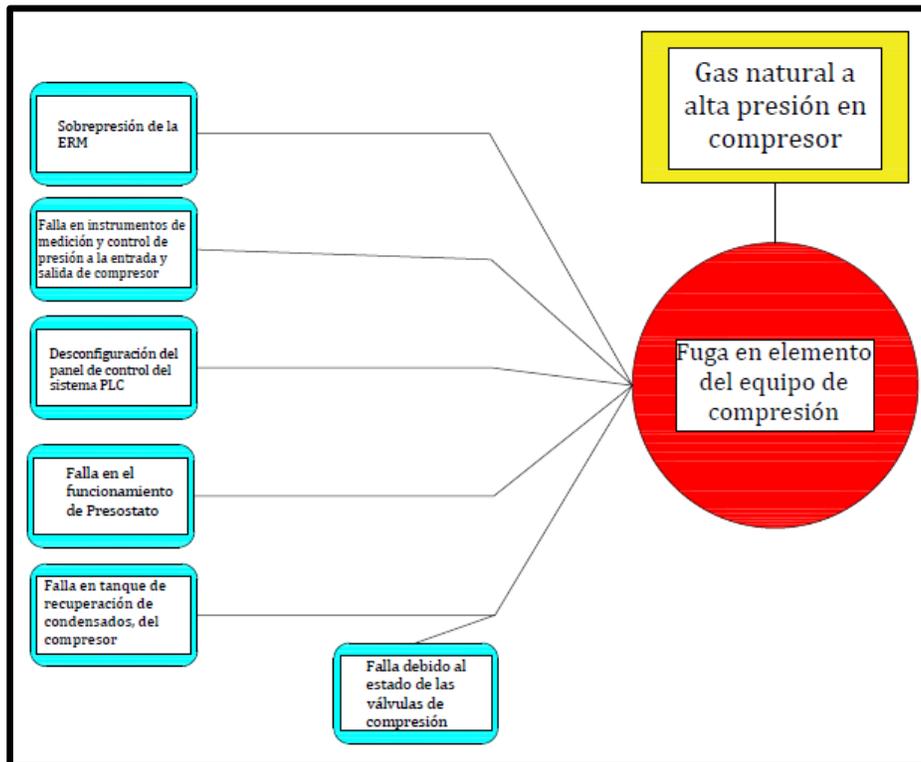


Fig.6.5.4 Amenazas para el equipo de compresión.

Para el escenario propuesto: fuga en elemento del equipo de compresión se pueden proponer distintas amenazas, pero para ello es importante conocer el proceso, así como los distintos equipos y sistemas de seguridad que operan en conjunto.

En la Fig. 6.5.4 se muestran las amenazas, cada una de ellas debe ser suficiente e independiente una de otra; en este proceso se relaciona con la medición y el control de la presión, ya que una desviación de la variable puede ocasionar sobrepresión en secciones del compresor causando con ello el evento base. A pesar de la existencia de medidas de seguridad nunca se está exento de la probabilidad de falla esto se analizará en los elementos siguientes.

Se puede originar una sobrepresión desde etapas anteriores al compresor y con ello afectar las distintas secciones del compresor, también una medición inadecuada en el presostato o falla en los instrumentos de medición podría ser la

causa de una sobrepresión que afecte el desempeño del compresor. Por último, un antecedente del evento base de alto riesgo puede ser iniciar el proceso de compresión con gas almacenado en cilindros generando de inmediato una sobrepresión en los pistones.

E) Barrera

Las barreras se pueden interpretar como las salvaguardas, estas tratan de evitar las fallas que originan al evento base (EB) o las consecuencias. Aunque es un requisito que cada una de las barreras sean independientes muchas veces no se debe ser tan estricto al aplicar esta condición. En la práctica muchas barreras dependen del suministro de energía y llegar a tener barreras totalmente independientes puede ocasionar incrementos en costos muy altos; así se debe buscar el equilibrio entre la seguridad y la inversión en protección.

Pautas	Preguntas clave
Se enfocan en evitar que las amenazas ocurran.	¿Cómo se puede evitar la ocurrencia de la amenaza que conduce al EB?
Tratan de evitar o reducir la ocurrencia del evento base.	¿Cómo prevenir que el EB conduzca a las consecuencias?
Buscan disminuir la probabilidad o el daño que pueda ocasionar las consecuencias.	¿Cómo se puede minimizar los daños que pueden causar las consecuencias?

Tabla 6.5.5 Pautas para la selección de barreras.

Las barreras se localizan según su función: prevenir, degradar o mitigar; indagar sobre cómo evitar los eventos no deseados puede ayudar a su identificación (Tabla 6.5.5).

Es común tener barreras en los procesos estas se caracterizan por ser dispositivos de activación manual o automática. Para las distintas amenazas que provocan el evento base en la estación de gas a presión se tienen barreras como: válvulas de seccionamiento, válvulas de venteo y de relevo de presión también dispositivos de alta tecnología como sensores y alarmas además de un paro de emergencia. En las barreras de mitigación encontramos equipos similares con dispositivos de detección y alarma, instalaciones físicas a prueba de explosión y equipos de protección para los trabajadores.

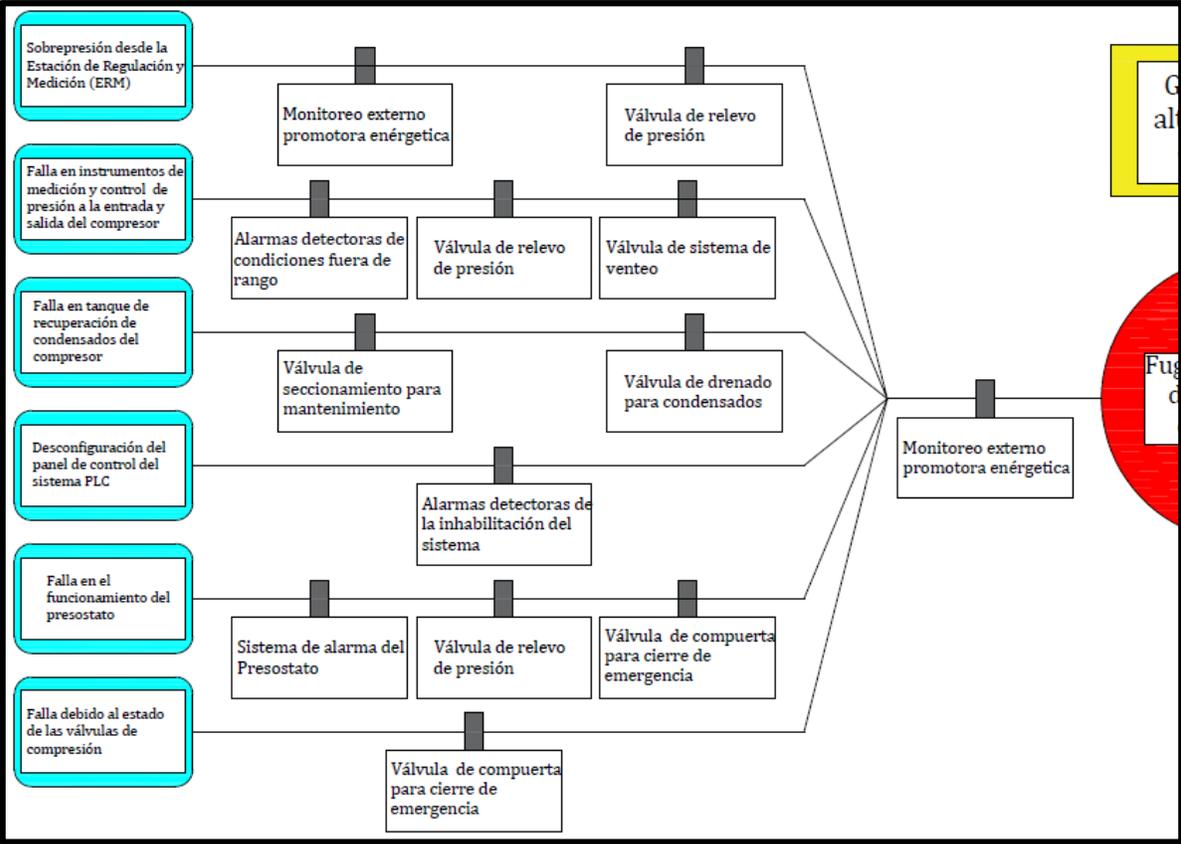


Fig. 6.5.5 Barreras de prevención para el equipo de compresión.

Para las distintas barreras se puede notar que algunas sirven como dispositivos de prevención, otros actúan de forma inmediata al detectar la desviación de la variable, el único fin es evitar eventos no deseados como se observa en la figura 6.5.5 y de forma completa en el anexo A.

F) Factor de degradación

Los factores de degradación se pueden tratar como amenazas secundarias, estas buscan evitar situaciones indeseadas las cuales afectan el desempeño de las barreras. Su selección requiere de un análisis detallado del funcionamiento de cada una de las barreras, es decir se requieren manuales y procedimientos de operación.

Las posibles fallas que pueden llegar a existir en algunas de las barreras de la instalación de gas pueden ser las siguientes: Mal diseño e instalación inadecuada de las válvulas de relevo de presión, obstrucciones que no permitan la liberación de flujo que equilibre la sobrepresión, falla en la activación mecánica de dispositivos o falla en los sensores o sistemas eléctricos que permiten la activación automática de los distintos dispositivos de seguridad.

En la figura 6.5.6 se pueden identificar algunos de los distintos factores de degradación, además de pautas de identificación en la Tabla 6.5.6. Debido a que el principal objetivo de un diagrama Bow-Tie es la comunicación visual en el anexo A se recopila el diagrama de forma completa.

Pautas	Preguntas Clave
Son acontecimientos que pueden afectar la funcionalidad de la barrera.	¿Existe un factor externo o interno que pueda afectar el desempeño de la barrera?
Suelen ser fallas técnicas de los equipos o acciones asociadas al error humano.	¿Cómo se puede asegurar la funcionalidad de las barreras?

Tabla 6.5.6 Pautas para la selección de factores de degradación.

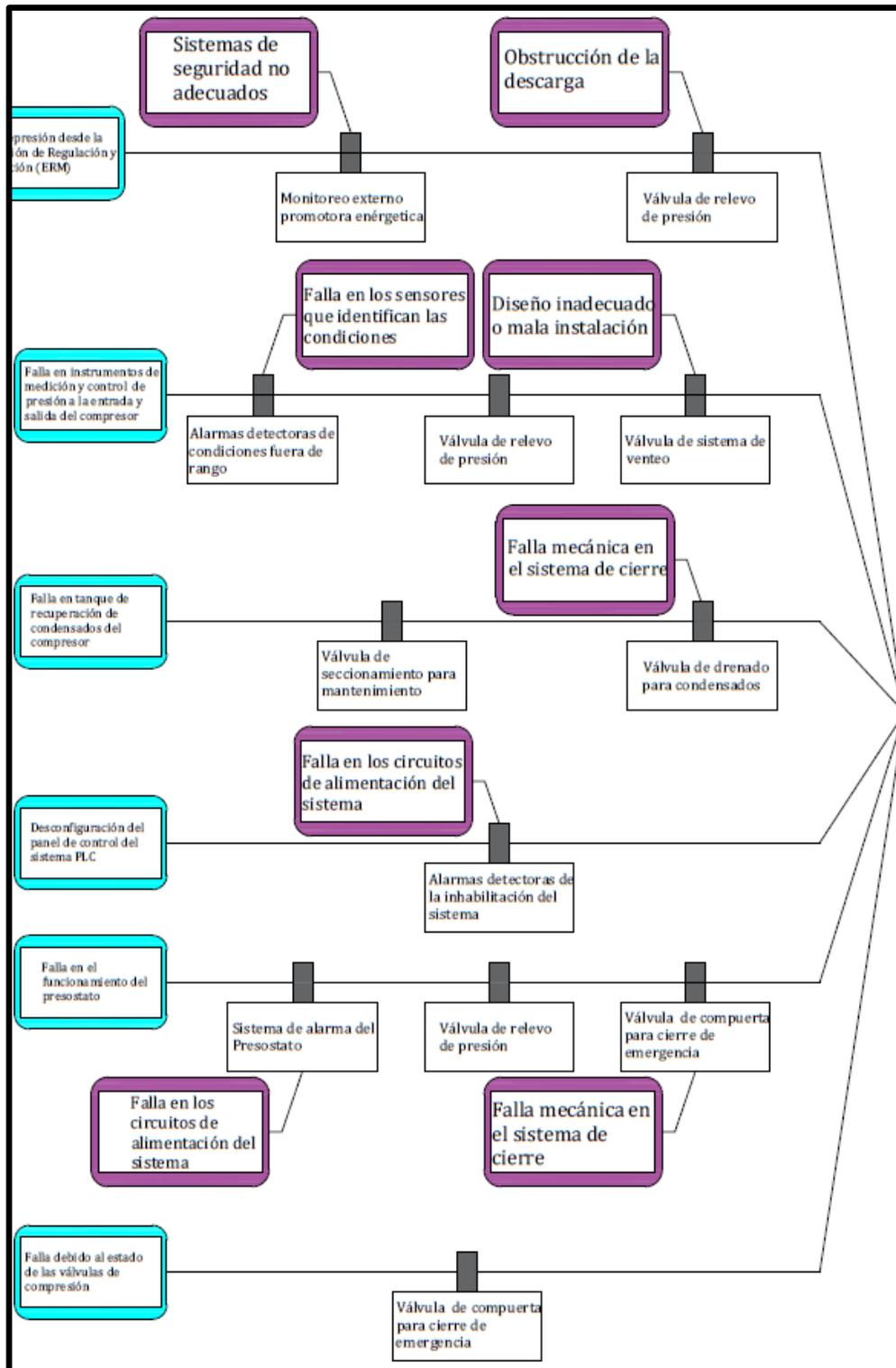


Fig. 6.5.6 Factores de degradación para el equipo de compresión.

G) Control de degradación

Suelen asociarse a cuestiones técnicas y/o administrativas que realiza el personal de mantenimiento para las distintas barreras. Por ejemplo, si contamos con extintores contra incendio como barrera para actuar cuando se forma una atmosfera incendiaria, existe la probabilidad de no poder operar el equipo debido a una obstrucción de la manija de operación o que es equipo ya utilizado anteriormente (estos serían factores de degradación), por ello un buen control de degradación sería verificación del estado de cada uno los extintores.

En el caso de las barreras, estas actúan para evitar el evento base, se analizan dos de los sistemas más importantes las válvulas de venteo y la compuerta de cierre automática en cuyo caso los posibles fallos que podrían existir serían una instalación inadecuada y una falla en el sistema automático de cierre. Para estos dos escenarios los controles de degradación podrían ser verificación de la instalación con respaldo de HAZOP e inspección del mantenimiento de la filosofía de operación de la compuerta. En la Tabla 6.5.7 se pueden seguir algunas pautas.

El proceso de selección de los elementos debe ser iterativo y en la industria se recomienda que se permitan revisiones periódicas con el fin de retroalimentar con observaciones después de un cierto periodo de uso.

Pauta	Preguntas Clave
Suelen ser medidas de verificación técnicas y/o administrativas.	¿Cómo se puede disminuir la ocurrencia del factor de degradación?
Son aquellas acciones que tratan de verificar la funcionalidad de las barreras.	¿Cómo se puede verificar la eficiencia de la barrera para cuando sea requerida?

Tabla 6.5.7 Pautas para la selección de los controles de degradación.

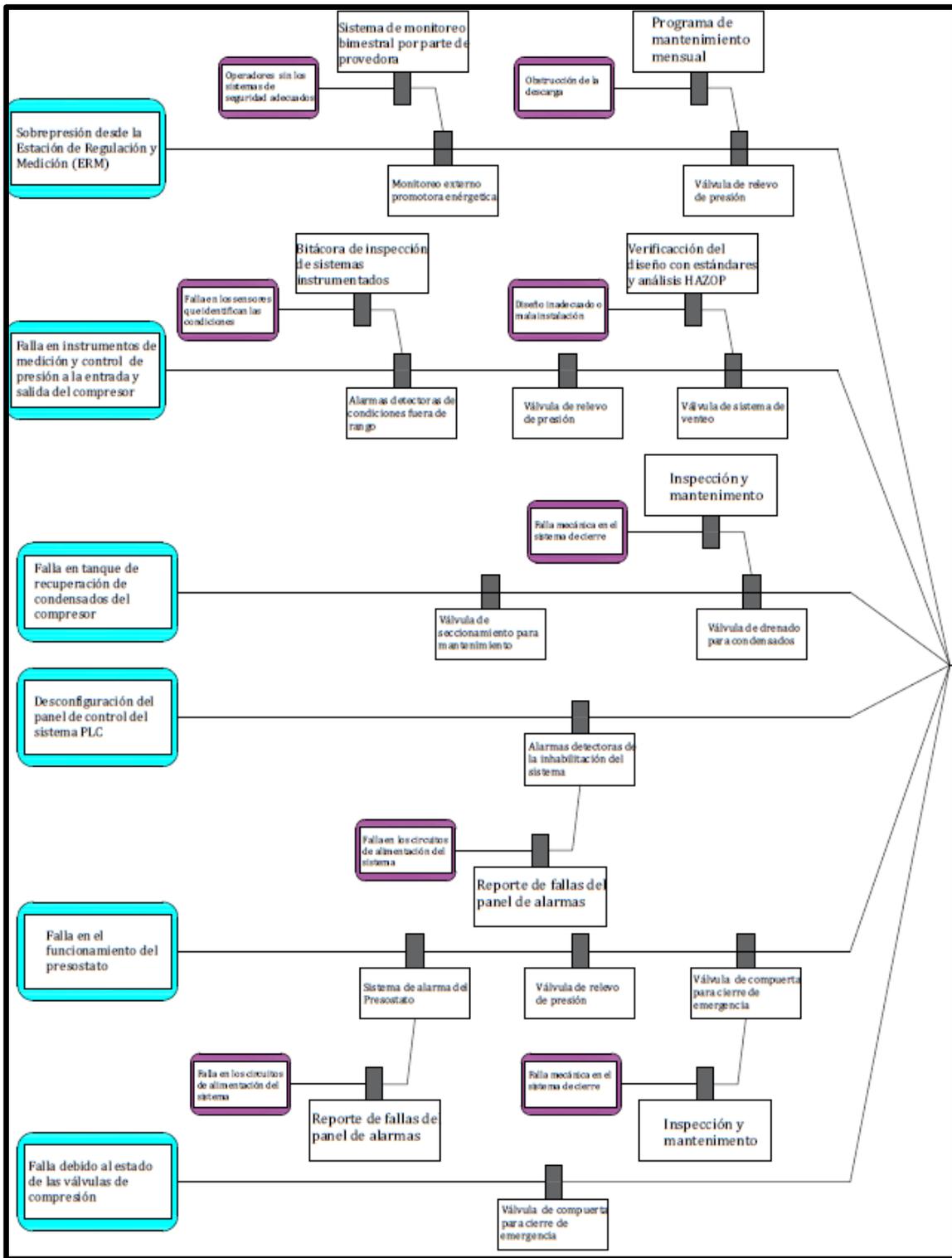


Fig. 6.5.7 Controles de degradación para el equipo de compresión.

CAPITULO VII CONCLUSIONES

Llevar a cabo un trabajo como el presente aquí permite contribuir en un tema particular un enfoque con una visión personal, esta refleja las habilidades y el conocimiento profesional adquirido. A continuación, se enuncia algunas de las ideas más significativas que se pueden condensar sobre este escrito.

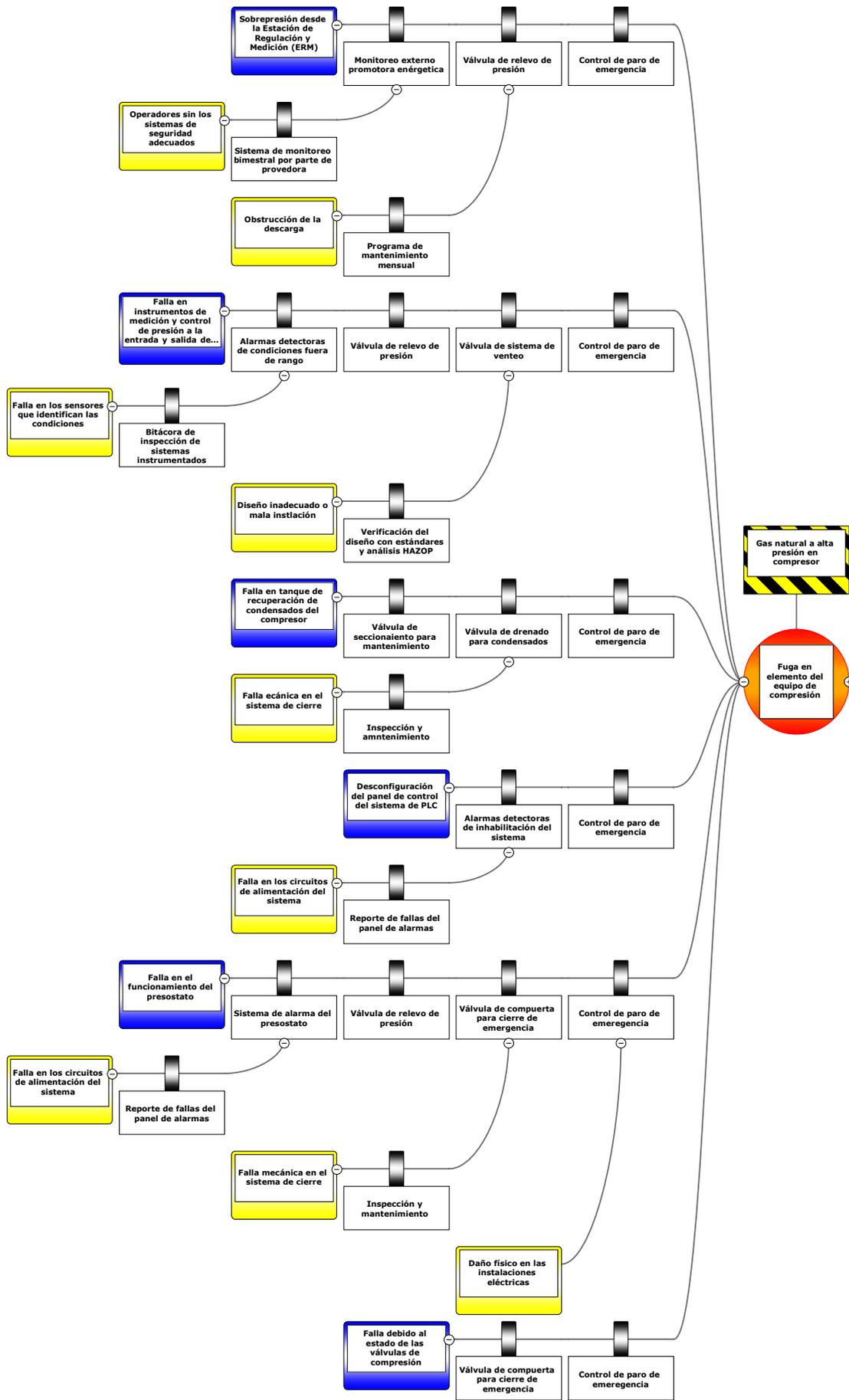
Al realizar un taller de análisis de riesgo, en especial con el Método Bow-Tie el principal producto es el característico diagrama donde tal vez por su forma de condensar la información puede pensarse que información valiosa del estudio pudo haberse perdido, pero no ocurre así porque también se elabora un informe donde se incluyen las observaciones y recomendaciones a las que se llegaron.

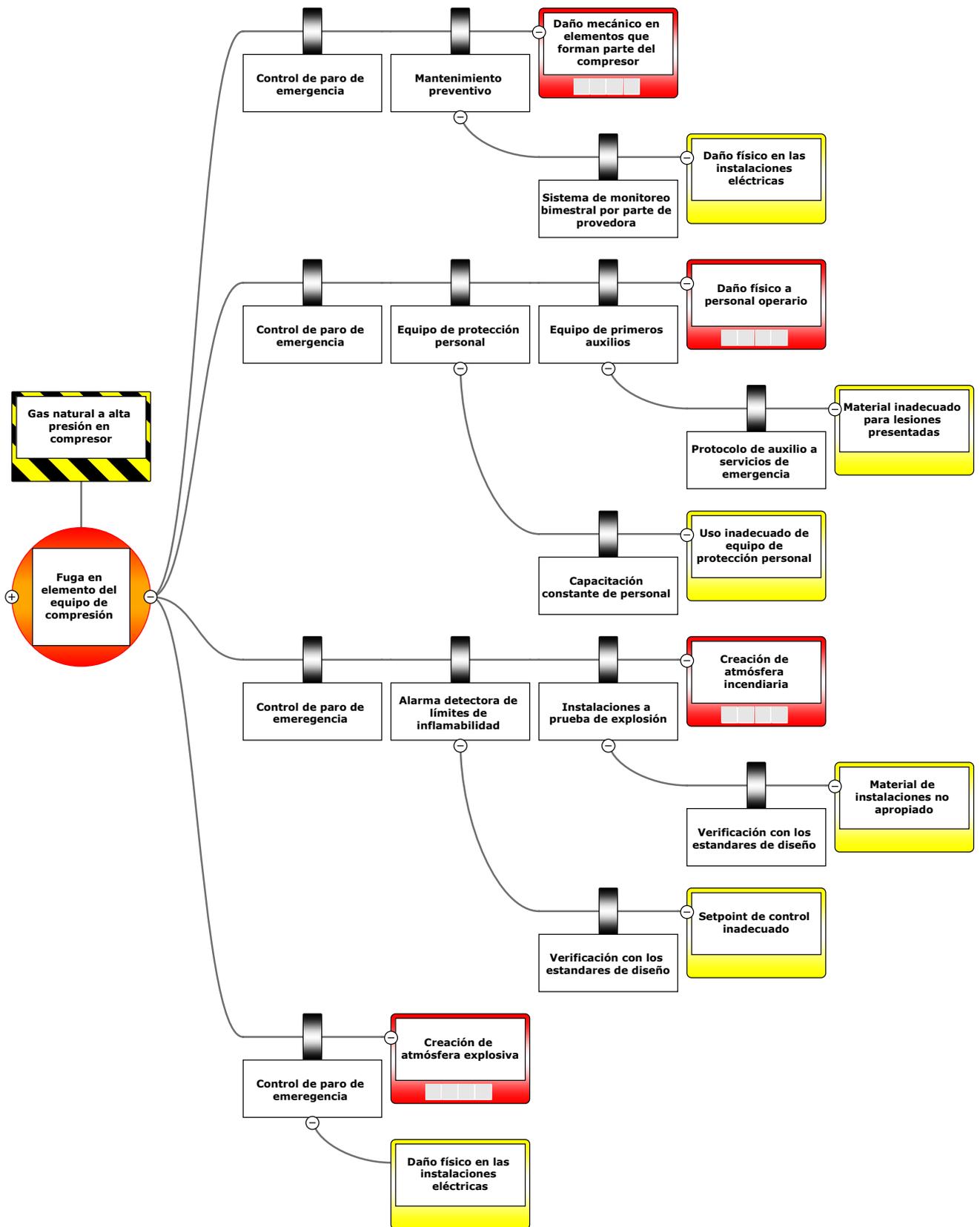
Un buen diagrama de Bow-Tie se genera regularmente en un taller bien planeado y organizado, donde se deben elegir a las personas adecuadas las cuales deben contar con experiencia y buen conocimiento del proceso. Además del compromiso a la hora de evaluar y participar en las discusiones. Con ello se pueden dar las pautas para mejorar aspectos de seguridad y protección ambiental.

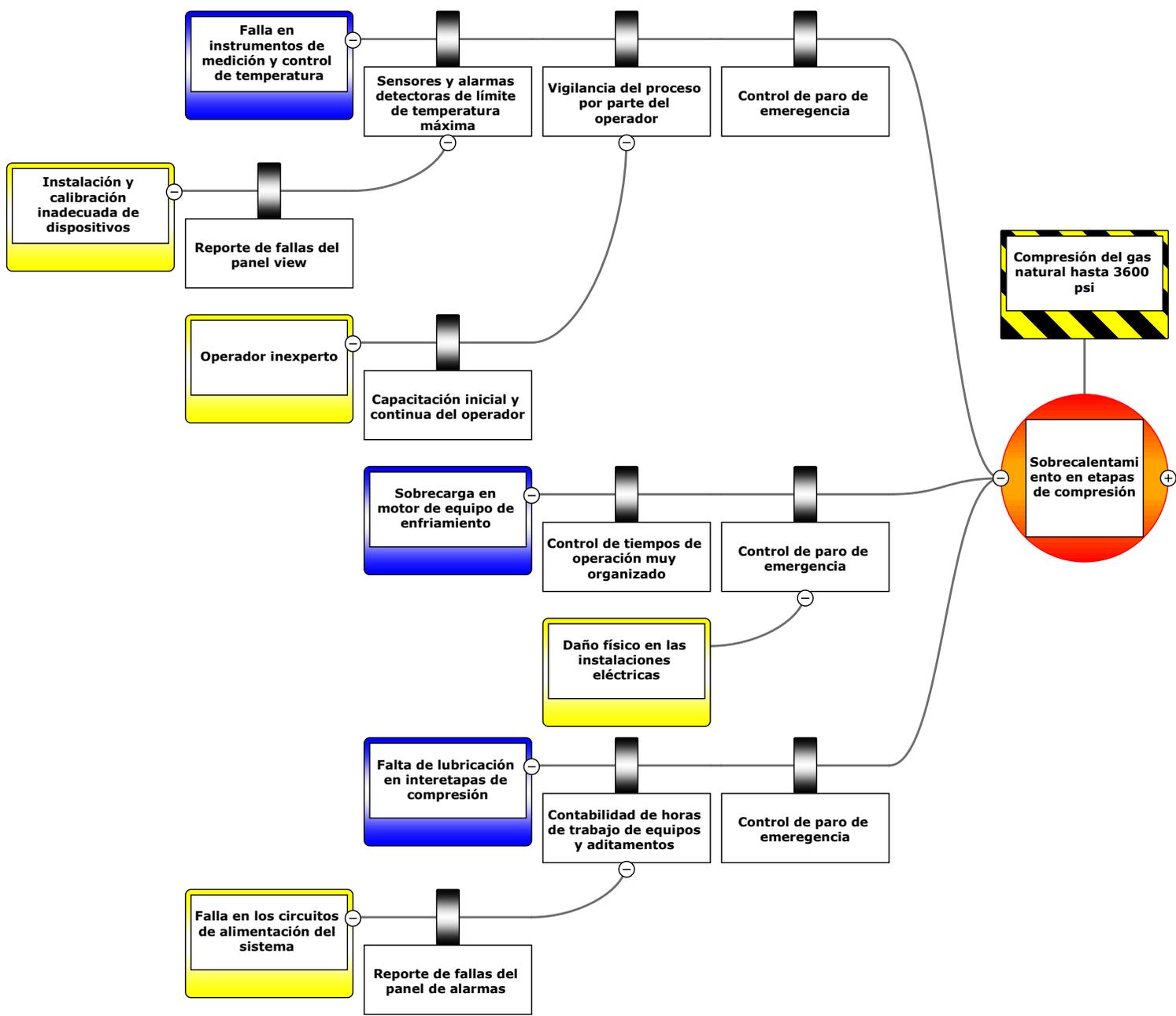
Los análisis de riesgos en proceso pueden consumir recursos y tiempo significativo para las empresas, pero si se llevan a cabo de forma adecuada es muy probable que se encuentren observaciones que pueden detonar la planeación de estrategias que incrementen el valor de la empresa con grados aceptables de inversión.

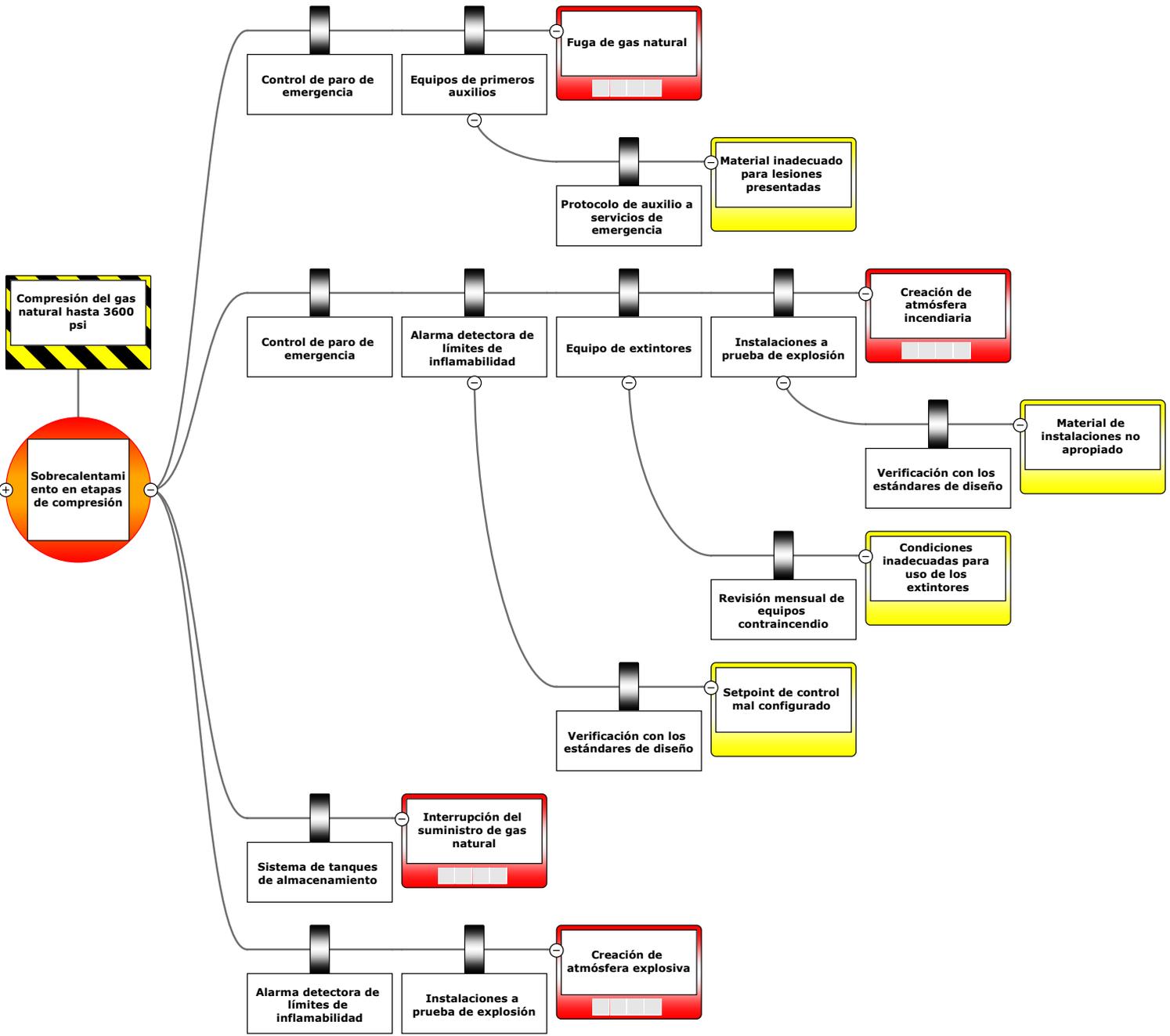
En la actualidad en el mundo tan competitivo ya no solo es necesario identificar opciones de mejora hay que transmitir las; el Bow-Tie es la herramienta idónea de comunicación porque su alcance impacta desde personal operativo hasta los gerentes o directivos.

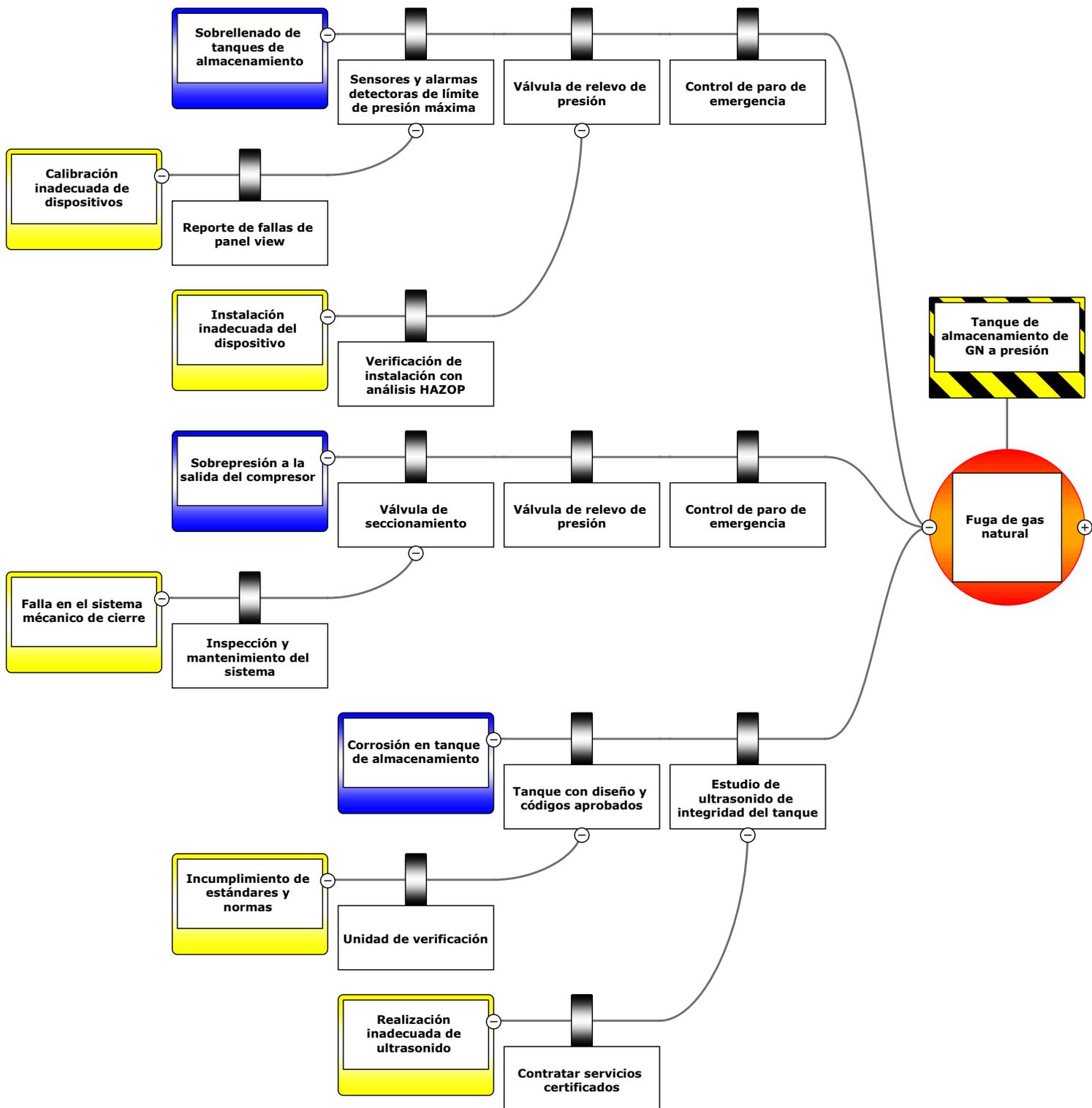
Anexo. Diagramas de Bow-Tie

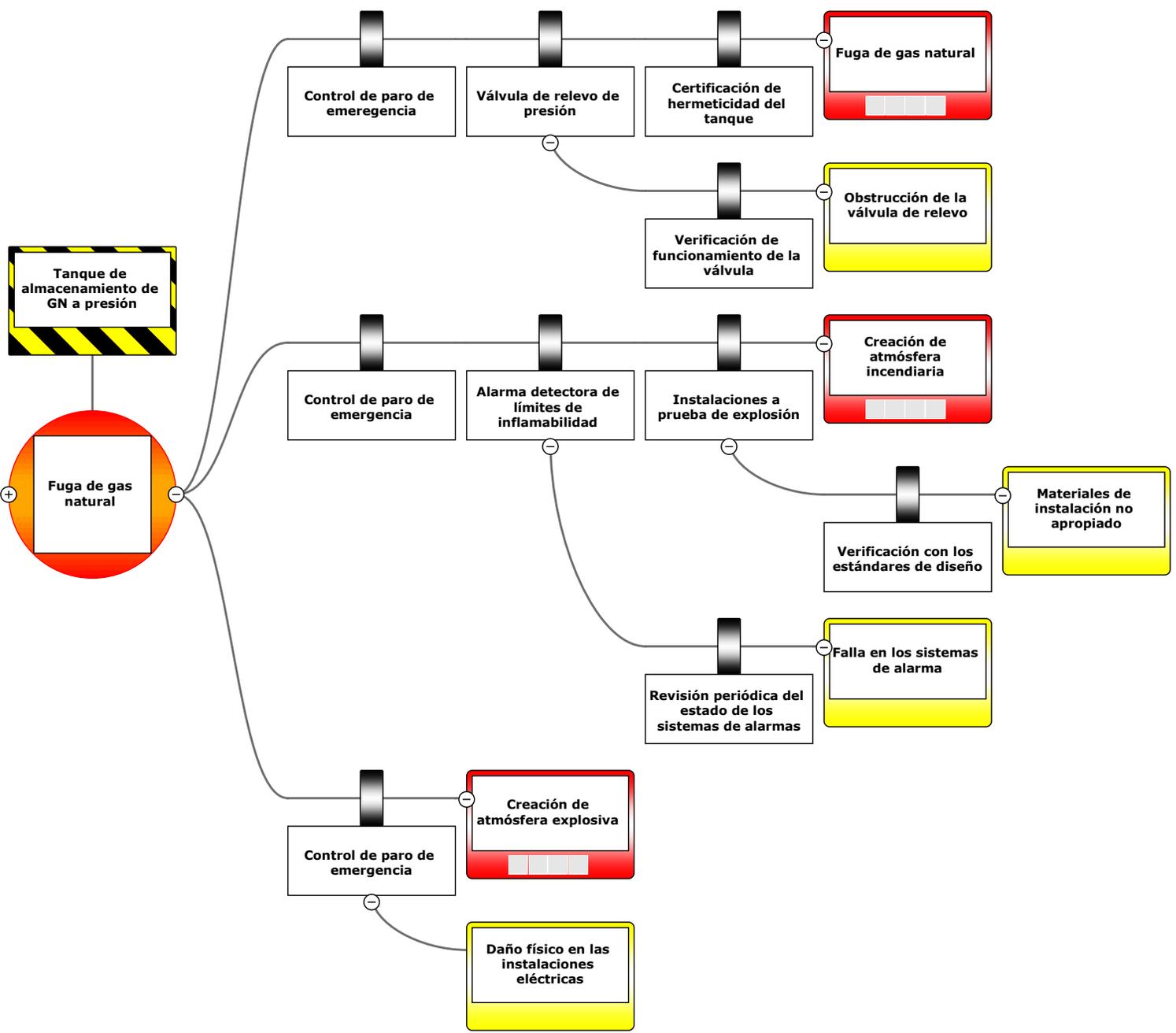


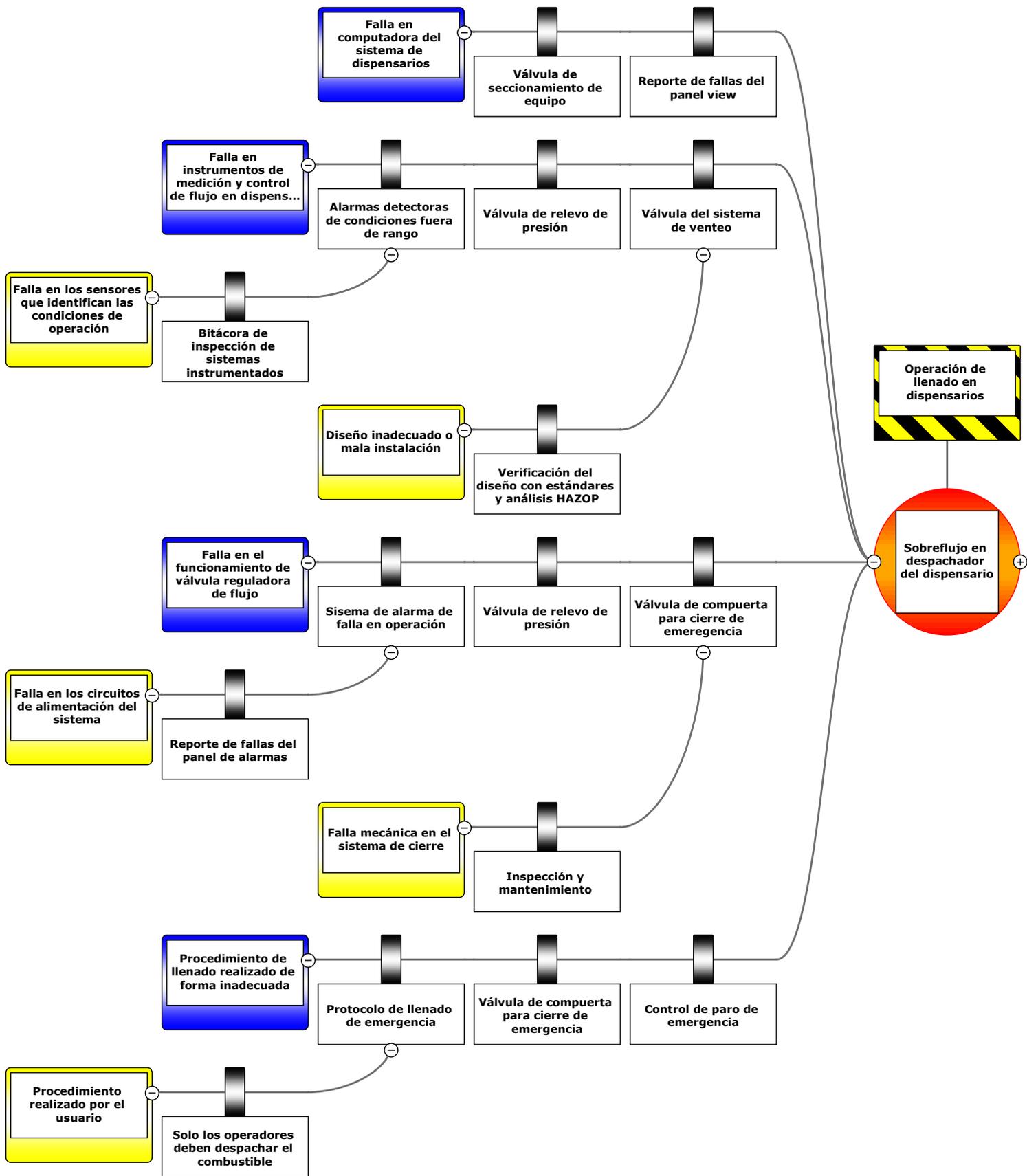


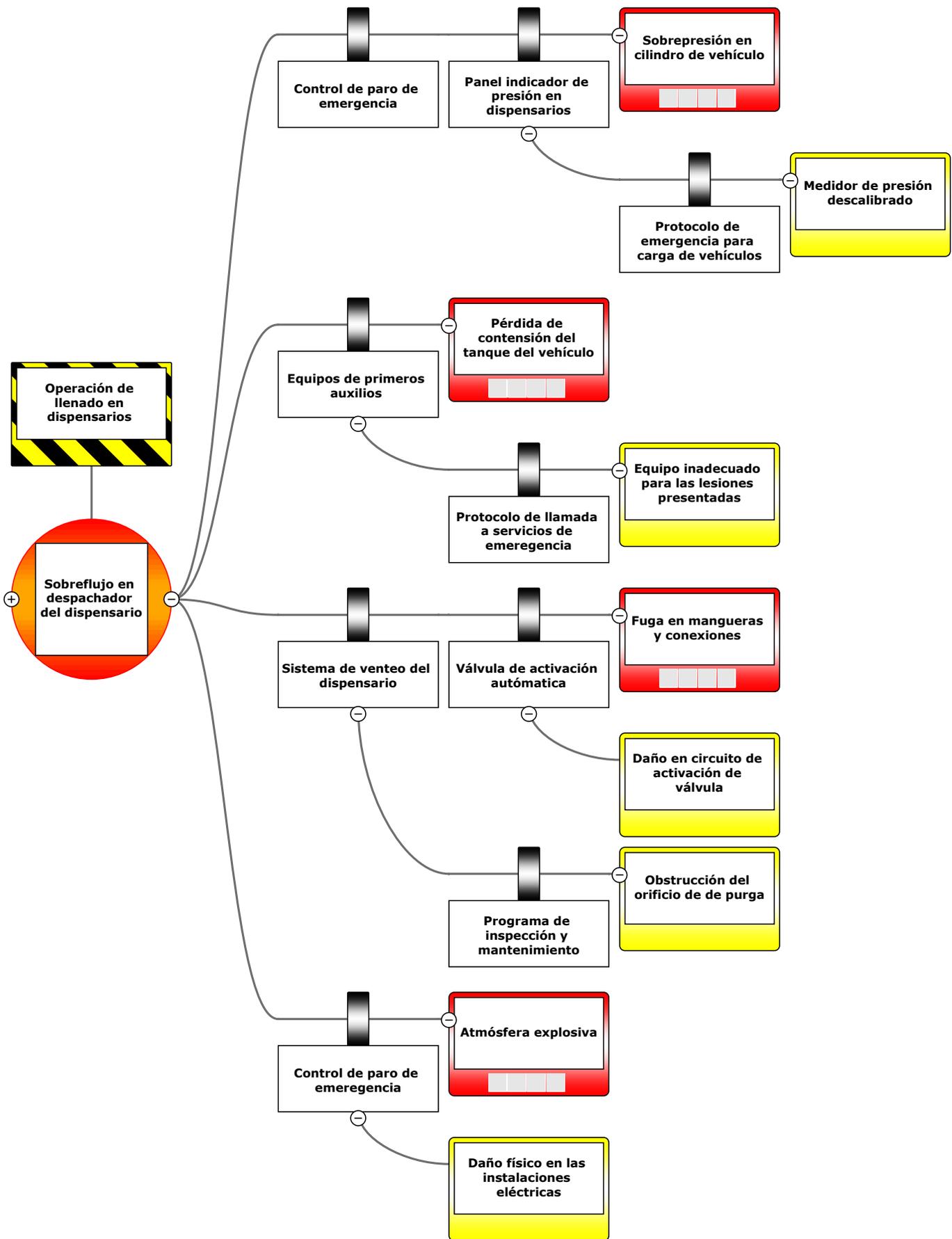












Bibliografía

- [1] A. Anaya Durand, Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos, Ciudad de México: Facultad de Química, 2015.
- [2] J. M. Storch de Gracia y T. García Martín, Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Energéticas: Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño., España: Díaz de Santos, 2008.
- [3] Center for Chemical Process Safety, Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers, New York: John Wiley & Sons, 2016.
- [4] Wolters Kluwer, «CGE Risk,» Wolters Kluwer, 27 Junio 2017. [En línea]. Available:
https://www.cgerisk.com/knowledgebase/The_history_of_bowtie#:~:text=The%20Bowtie%20method%20is%20a%20risk%20evaluation%20method,men%E2%80%99s%20bowtie.%20A%20Bowtie%20diagram%20does%20two%20things.. [Último acceso: 14 Abril 2021].
- [5] L. C. o. Whitekirk, «The Chemical Engineer,» Institution of Chemical Engineers, 2 Julio 2018. [En línea]. Available:
<https://www.thechemicalengineer.com/features/lord-cullen-piper-alpha-investigator/>. [Último acceso: 23 Mayo 2021].
- [6] R. J. Chapman, «www.pmworldjournal.net,» April 2016. [En línea]. Available:
<https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2016/04/pmwj45-Apr2016-Chapman-bow-tie-method-advisory.pdf>. [Último acceso: 23 Mayo 2021].
- [7] B. Debray y O. Salvi, «www.witpress.com,» 2005. [En línea]. Available:
[https://portal.issn.org/api/search?search\[\]=MUST=allissnbis=%221743-3509%22&search_id=13957594#](https://portal.issn.org/api/search?search[]=MUST=allissnbis=%221743-3509%22&search_id=13957594#). [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [8] E. García Mozos, «app.mapfre.com,» [En línea]. Available:
<https://app.mapfre.com/ccm/content/documentos/mapfrere/fichero/en/trebol-en-num5-2.pdf>. [Último acceso: 23 Mayo 2021].
- [9] M. Campoy, R. Cuesta y M. Barreiro, «www.revistanuclear.es,» 11 03 2020. [En línea]. Available: <https://www.revistanuclear.es/en/safety/concepto-de-la-defensa-en-profundidad-y-ejemplo-especifico-de-aplicacion-en-las-centrales->

nucleares-espanolas/. [Último acceso: 24 Mayo 2021].

- [10] Center for Chemical Process Safety, Bow Ties in Risk Management: A concept book for process safety, New York: John Wiley & Sons, 2018.
- [11] C. Ericson II, Hazard Analysis Techniques for System Safety, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [12] S. Andonov, Bowtie Methodology: A guide for practitioner, Florida: CRC Press, 2018.
- [13] D. S. Nielsen, «orbit.dtu.dk,» 1971. [En línea]. Available: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/the-causeconsequence-diagram-method-as-a-basis-for-quantitative-a>. [Último acceso: 25 Mayo 2021].
- [14] CGE Risk, «www.cgerisk.com,» 27 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.cgerisk.com/products/bowtiexp/>. [Último acceso: 5 Julio 2021].
- [15] Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [16] Project Management Institute, Guía de fundamentos para la dirección de proyectos, Newtown Square: PMI, 2013.
- [17] Secretaría Central de ISO, «auto-q-consulting.com.mx,» Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://auto-q-consulting.com.mx/Muestra24.IATF.2020/Norma.ISO.31000.2018.Espanol.pdf>. [Último acceso: 24 07 2021].
- [18] M. E. Orduña Alvarez, El análisis de riesgos y sus metodologías de acuerdo a la MOM-028-stps-2012, Ciudad de México: Tesis de Licenciatura, 2017.
- [19] Secretaría de Trabajo y Previsión Social , «Autogestión en Seguridad y Salud en el Trabajo,» 2012. [En línea]. Available: <http://asinom.stps.gob.mx:8145/Centro/CentroMarcoNormativo.aspx>. [Último acceso: 12 07 2021].

