

DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO DE AFECTACIÓN EN ESTACIONES DE SEPARACIÓN Y REGULACIÓN DE GAS

Luciano Narcisi, narcisi@giemdp.com.ar

Esteban Rubertis rubertis@giemdp.com.ar

Bernardo Elosegui, elosegui@giemdp.com.ar

GIE S.A.

1 Introducción

Durante años se ha reconocido que la seguridad de las personas y sus propiedades es una de las metas primordiales de las instalaciones industriales donde existe la posibilidad de que un accidente cause explosiones, fuego o derrames de sustancias tóxicas. En el presente trabajo técnico, se realiza un estudio relacionado con la seguridad en Estaciones de Separación y Medición de hidrocarburos gaseosos, el mismo se basa en los lineamientos propuestos por API RP 580 [1] y API BRD 581 (Base Resource Document) [2].

La palabra “riesgo” puede ser definida de varias formas. Un tratamiento riguroso del riesgo requiere una definición precisa que permita su cuantificación. Una definición que cumple estos requisitos y que es utilizada por la mayoría de las bibliografías es la basada en el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables:

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

El Análisis de Riesgo es el proceso de identificación y análisis cualitativo o cuantitativo de los riesgos asociados a un sistema. Esta metodología permite comparar mediante índices el riesgo entre distintos equipos o instalaciones y es útil para priorizar las medidas de mantenimiento e integridad necesarias para disminuir el riesgo.

El presente Análisis de Riesgo de los equipos de las estaciones de separación y medición de hidrocarburos gaseosos fue realizado utilizando la metodología del Nivel 3 establecida en el documento base API 581. Este Análisis de Riesgo permitirá cuantificar y evaluar los riesgos que genera la operación de las estaciones tanto para personal propio, contratistas y terceros como para la integridad estructural de la misma.

2 Análisis previo de riesgo

En forma previa a este estudio cuantitativo de riesgo, se ejecutó entre enero y junio de 2008, un Análisis de Inspección Basada en Riesgo (RBI) Niveles I y II de acuerdo con API BRD 581, de los equipos pertenecientes a las estaciones de medición y regulación.

En primera instancia se ejecutó un **Análisis de Riesgo Cualitativo** para los 486 equipos de las 32 estaciones de medición y regulación. De esta manera, se identificaron los equipos críticos tal cual se observa en la Figura 2.1, siendo estos el 10% de los evaluados (Figura 2.2), a los cuales se les realizó un **Análisis de Riesgo Semi-Cuantitativo** de mayor complejidad.

CATEGORIA PROBABILIDAD	CATEGORIA CONSECUENCIA				
	A	B	C	D	E
	0	0	0	0	0
	0	0	2	0	0
	0	6	53	34	2
	0	24	165	115	5
	0	5	50	21	4

Figura 2.1- Matriz de riesgo cualitativa

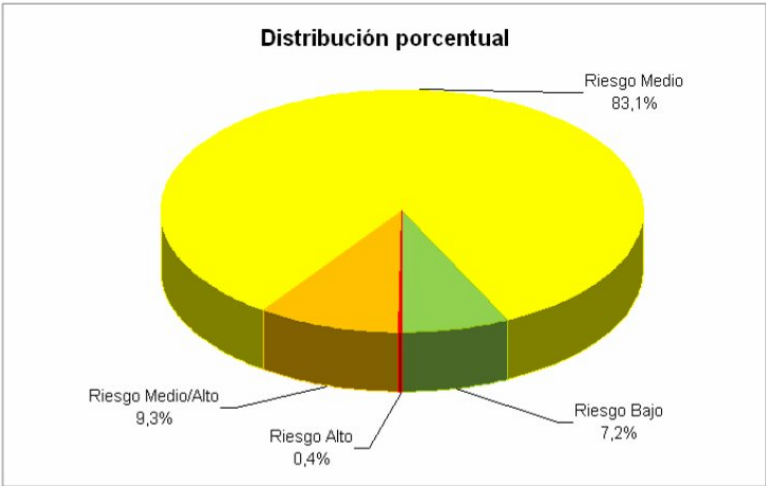


Figura 2.2 – Resultados de Análisis de Riesgo Cualitativo, distribución porcentual

El análisis de probabilidad efectuado reflejó que los valores de probabilidad de falla, al momento del análisis, se encontraban dentro de los límites aceptables por API 581.

En el caso de las Consecuencias, se calcularon las áreas de daño ante una falla para cada equipo crítico; se identificaron 7 Estaciones en las cuales las áreas de daño excederían los límites de propiedad y, en caso de un evento no deseado, podrían afectar las áreas linderas. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo del resultado obtenido a través del análisis de consecuencia semicuantitativo según API BRD 581.

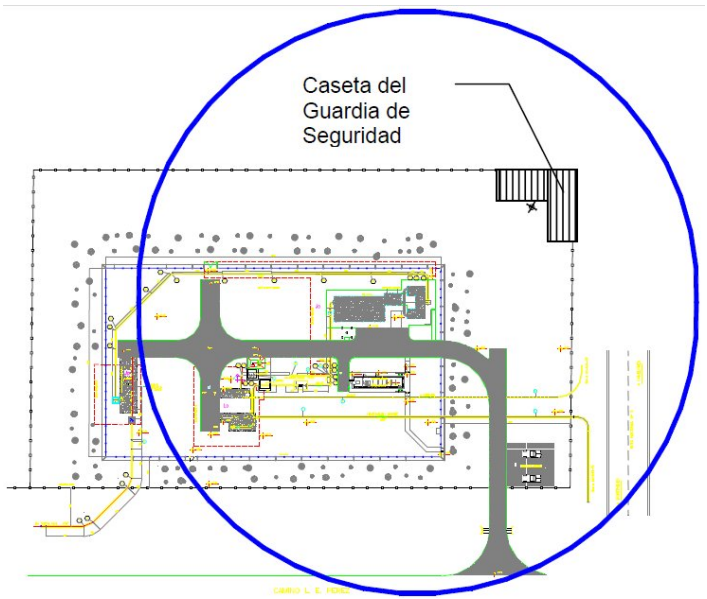


Figura 2.3 – Resultado de análisis semicuantitativo de consecuencia, afectación a personas

Debido a que el método Semi-Cuantitativo empleado no considera la dirección del viento predominante, el efecto atenuante de los muros que rodean las instalaciones y tampoco tiene en cuenta el “efecto dominó”, ya que la falla de un equipo puede disparar fallas sobre otros equipos, se recomendó la ejecución de un Análisis de Riesgo Cuantitativo para la evaluación de estos casos particulares.

3 Evaluación cuantitativa de consecuencias

3.1 Determinación de Eventos y Efectos

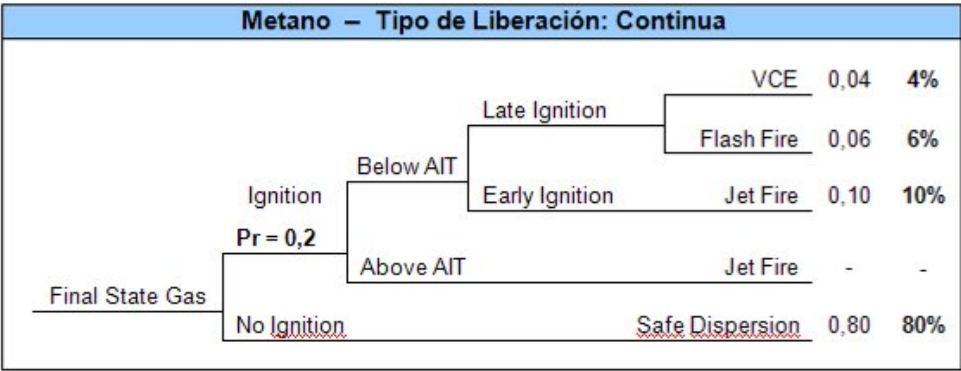
Como paso previo a la cuantificación de las consecuencias, resulta necesario determinar los tipos de eventos y efectos que ante una falla del equipo puedan ocasionar los fluidos procesados.

El principal riesgo asociado en el transporte de gas es la posibilidad de fugas o roturas debido a la inflamabilidad de los productos transportados. Dada la inflamabilidad y la potencialidad de explosión del gas natural, las explosiones con nubes de fuego y vapor representan el principal riesgo en la operación de las estaciones.

La publicación API BRD 581 provee una rápida identificación mediante la utilización del denominado Arbol de Eventos, el cual permite determinar las probabilidades de los eventos inflamables (flash fire, jet fire, fireball, etc) y no inflamables (dispersión segura). Cada uno de los eventos generará efectos de diversos tipos que, dependiendo de la naturaleza del fluido proceso y del evento, podrá afectar personas y/o equipos de diversas maneras:

- Ondas de Sobrepresión.
- Radiación Térmica.
- Distribución de concentraciones en la atmósfera.

Para el caso del Gas Natural (Metano, C_1), procesado por debajo de su Temperatura de Autoignición se presentan en la Figura 3.1 los árboles de eventos correspondientes a una liberación continua y una instantánea. Se observa que, ante una liberación de fluid, existe un 80% de probabilidad de dispersión segura, seguido de un 10% de probabilidad de dardo de fuego (Jet Fire) para una liberación continua, y un 15% de probabilidad de llamarada (Flash Fire) en caso de una liberación instantánea.



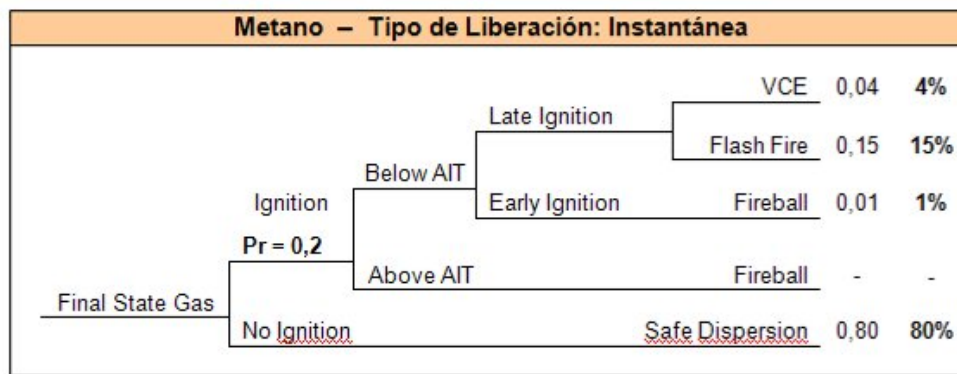


Figura 3.1- Árboles de Eventos para liberación de metano

Donde:

- VCE: Explosión de una nube de vapor (Vapor Cloud Explosion).
- Fireball: Bola de Fuego.
- Flash Fire: Lllamarada.
- Jet Fire: Dardo de Fuego.

3.2 Cuantificación de Efectos

Para calcular los efectos de los eventos descriptos anteriormente (ondas de sobrepresión, radiación térmica, distribución de concentraciones en la atmósfera), se utilizan modelos matemáticos clásicos provenientes del estudio de una diversidad de accidentes históricos. Debe tenerse en cuenta que, en todos los casos, se realizan cálculos o estimaciones aproximados.

En la Tabla 3.1 se definen los modelos aplicables correspondientes a cada efecto.

Efecto	Tipo de Evento	Tipo de Liberación	Modelo
Fuga	Dispersión Segura	Continua	<i>No Aplica</i>
Radiación Térmica	Jet Fire	Continua	<i>Jet Fire</i>
Radiación Térmica	VCE	Continua e Instantánea	<i>Flash Fire</i>
	Flash Fire	Continua e Instantánea	
Radiación Térmica	Fireball	Instantánea	<i>Fireball</i>
Ondas de Sobrepresión	VCE	Instantánea	<i>TNT Equivalente</i>
	Fireball	Instantánea	
	Dispersión Segura	Instantánea	

Tabla 3.1 – Modelos aplicables para la cuantificación de efectos

Los diferentes eventos se modelaron utilizando las ecuaciones para el cálculo de Radiación Térmica, Impulsos y Sobrepresión en función de la distancia desde el foco del evento.

3.3 Evaluación de consecuencias

Una vez que sean conocidos los valores aproximados de los efectos, se establecen cuáles serán las consecuencias cuando éstos incidan en personas, en bienes o en el entorno. De esta manera, se estima cuál será el número de muertos y de heridos, cuál será la destrucción provocada en edificios y equipos, y cuál será el impacto sobre el entorno cuando un accidente determinado se produzca en un lugar determinado. Esto se suele realizar mediante los denominados modelos de vulnerabilidad, que relacionan efectos y consecuencias.

Para evaluar la respuesta del cuerpo humano ante la recepción de una determinada cantidad de energía radiante se pueden utilizar los valores descriptos por el HSE del Reino Unido [4] cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.2.

Intensidad de Radiación [Kw/m²]	Efecto Típico sobre los Humanos
0,8 - 1,2	Radiación Solar.
2,1	Mínimo para producir molestias y dolor luego de 60 segundos de exposición.
4,0	0 % de mortalidad.
4,7	Causa dolor en 15-20 segundos de exposición. Heridas luego de 30 segundos de exposición.
9,5	Causa dolor en 8 segundos de exposición. Quemaduras de segundo grado luego de 20 segundos de exposición.
15,8	1% de mortalidad, luego de una exposición de 30 segundos.
25,3	50% de mortalidad, luego de una exposición de 30 segundos.
30,0	Causa quemaduras de tercer grado luego de 10 segundos de exposición.
37,8	100% de mortalidad, luego de una exposición de 30 segundos.

Tabla 3.2 - Efectos de la Radiación Térmica en Humanos.

Los efectos típicos de la radiación térmica sobre las estructuras se presentan en la Tabla 3.3, los cuales se encuentran detallados en el CPR 16E, del documento TNO [6].

Intensidad de Radiación [Kw/m²]	Efecto Típico sobre las Estructuras
4,0	Sin daño.
12,5	Causa la ignición de elementos combustibles, tales como madera, cartones, plásticos, cables eléctricos.
25,0	Posible afectación de estructuras metálicas.
37,5	Daños en equipos de proceso y colapso de estructuras.

Tabla 3.3 - Efectos de la Radiación Térmica en Estructuras y Equipos.

Para el caso de Ondas de Sobrepresión, las Figura 3.2 y Figura 3.3 muestran las gráficas utilizadas para la determinación de las consecuencias de daño a personas y estructuras mediante la utilización de curvas de iso-riesgo en función de los valores de Sobrepresión (Pa) e Impulso (Pa.seg).

Las funciones PROBIT de daño a las personas fueron desarrolladas por Hirsch (1968 – daño al tímpano), Baker (1983 – muerte por hemorragia pulmonar y muerte por impacto con el cráneo) y Contini (1993 – muerte por impacto con el cuerpo) [7].

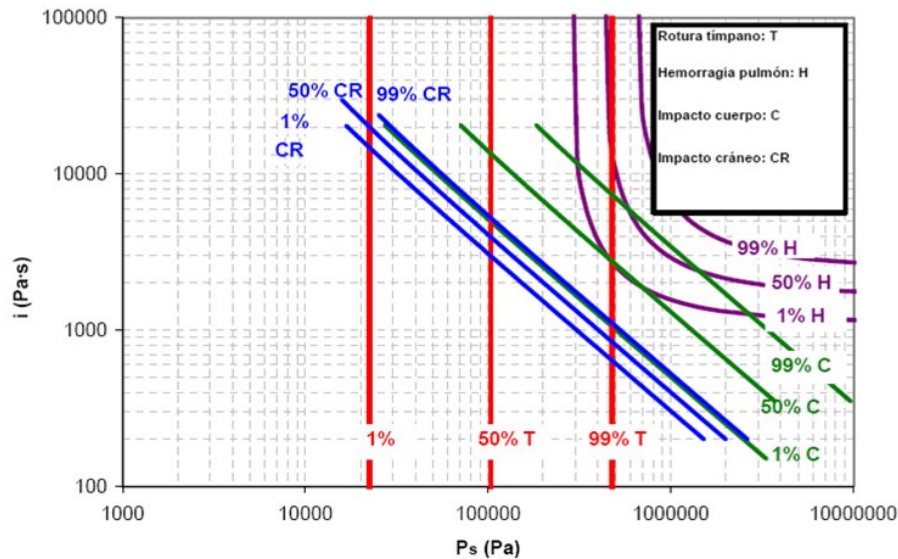


Figura 3.2 - Efectos de la Onda de Sobrepresión en humanos.

Nota: Las curvas mostradas en la gráfica corresponden a porcentajes (o probabilidades) de lesiones por rotura de tímpanos y de muerte por hemorragia pulmonar, muerte por impacto con el cuerpo y muerte por impacto con el cráneo.

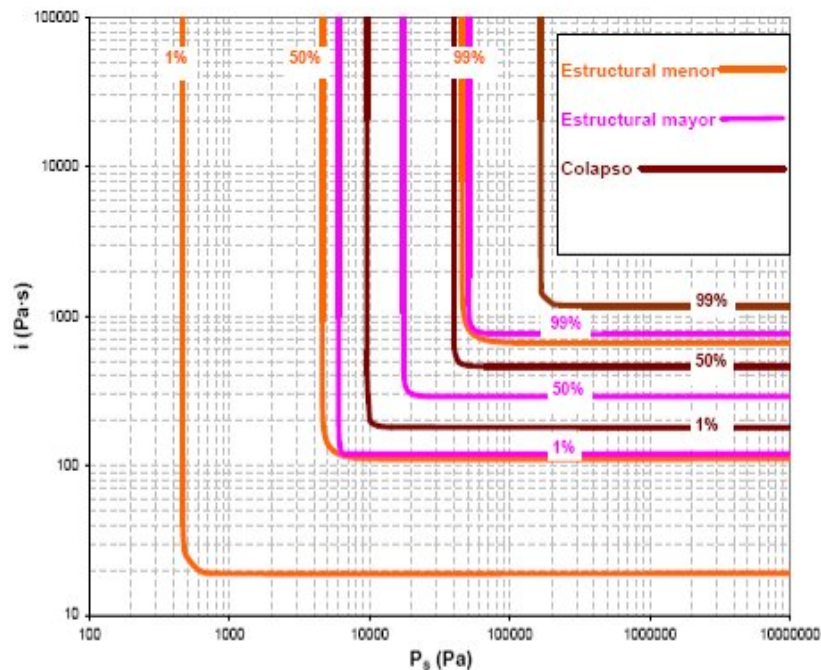


Figura 3.3 – Efectos de Onda de Sobrepresión en estructuras.

- Estructural Menor: rotura de ventanas, desplazamiento de puertas y marcos, daños a tejados.
- Estructural Mayor: además de efectos anteriores, fractura y/o destrucción de algunas paredes.
- Colapso: demolición parcial o total del edificio.

Las funciones PROBIT de daño a las estructuras se encuentran incorporadas en el marco del documento TNO, “*Methods for the determination of possible damage - The green book*” [6.7].

3.4 Efecto de los muros

Las consecuencias de Radiación Térmica y Ondas de Sobrepresión presentados en forma previa corresponden a modelos “a campo abierto”, es decir sin presencia de estructuras o equipos que interfieran con la intensidad de radiación ni con la onda de sobrepresión. En este sentido, la presencia de los muros perimetrales en las estaciones, actúan como un factor de interferencia, modificando los valores y las consecuencias de diversa manera.

En principio, para el caso de aquellos eventos con fuego, el muro actúa como una barrera mecánica siempre y cuando no se supere el valor de colapso por radiación térmica de $37,5 \text{ KW/m}^2$. En el caso de las ondas de sobrepresión, el muro tiene un efecto múltiple sobre el valor de la sobrepresión [8]:

a.- el valor de la onda reflejada se duplica.

b.- el valor de la onda difractada (aguas abajo del muro) se reduce en un valor igual a 0,7 veces la presión correspondiente “a campo abierto”.

3.5 Efecto del viento / Efecto dominó

En el estudio precedente, los modelos empleados tienen en cuenta el viento predominante en cada una de las estaciones. Por otra parte, se analiza en este informe, el considerado efecto dominó (o encadenamiento de eventos), tal que la falla de un equipo pueda disparar fallas sobre otros equipamientos.

4 Evaluación cuantitativa de probabilidades

Una vez identificados los eventos y calculados sus efectos a causa de la falla de los equipos de las estaciones, se estiman las frecuencias o probabilidades de que estas ocurran. La probabilidad es un número que mide el grado de certeza que se tiene de que ese evento va a ocurrir. Para el caso de estudio, el cálculo de la probabilidad se basa en datos históricos de plantas similares. Se utilizarán para este estudio las frecuencias de falla genéricas proporcionadas por la publicación API 581, la cual se encuentra validada internacionalmente por las industrias del gas, petróleo y petroquímica.

4.1 Frecuencias Genéricas de Fallas de API 581

El documento API 581, se fundamenta en bases de datos de experiencias de pérdidas respecto a frecuencias de falla categorizadas por tipos de equipamiento y procesos específicos que posee la industria petroquímica. Como resultado, el procedimiento API 581 entrega una **Frecuencia de Falla Genérica (FFG)** por cada tipo de equipamiento y diámetro de cañería, y por cada modo de falla específico: pinhole (1/4”), agujeros (1” y 4”) ó rotura. Los valores proporcionados provienen de una gran cantidad de fuentes y siguen una distribución normal logarítmica. Los valores medios son los que se entregan en la Tabla 4.1.

Las frecuencias de falla son valores medidos en forma anual. Por ejemplo, si se toma el valor de rotura ó reventón de Recipientes a Presión, es decir 6×10^{-6} /año, esto significa que 6 de cada 1.000.000 de recipientes en el año fallarán provocando la rotura de los mismos.

Table 8-1—Suggested Generic Equipment Failure Frequencies

Equipment Type	Data Source (References)	Leak Frequency (per year for four hole sizes)			
		1/4 in.	1 in.	4 in.	Rupture
Filter	1	9×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-5}
Fin/Fan Coolers	3	2×10^{-3}	3×10^{-4}	5×10^{-8}	2×10^{-8}
Heat Exchanger, Shell	1	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
Heat Exchanger, Tube Side	1	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
Piping, 0.75 in. diameter, per ft	3	1×10^{-5}			3×10^{-7}
Piping, 1 in. diameter, per ft	3	5×10^{-6}			5×10^{-7}
Piping, 2 in. diameter, per ft	3	3×10^{-6}			6×10^{-7}
Piping, 4 in. diameter, per ft	3	9×10^{-7}	6×10^{-7}		7×10^{-8}
Piping, 6 in. diameter, per ft	3	4×10^{-7}	4×10^{-7}		8×10^{-8}
Piping, 8 in. diameter, per ft	3	3×10^{-7}	3×10^{-7}	8×10^{-8}	2×10^{-8}
Piping, 10 in. diameter, per ft	3	2×10^{-7}	3×10^{-7}	8×10^{-8}	2×10^{-8}
Piping, 12 in. diameter, per ft	3	1×10^{-7}	3×10^{-7}	3×10^{-8}	2×10^{-8}
Piping, 16 in. diameter, per ft	3	1×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-8}	2×10^{-8}
Piping, > 16 in. diameter, per ft	3	6×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-8}	1×10^{-8}
Pressure Vessels	2	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}

Tabla 4.1 - Valores medios de Frecuencias de Falla (API 581).

4.2 Cálculo de Probabilidad de Falla

Para el cálculo de las Probabilidades de Falla de los equipos, se utilizan los lineamientos establecidos en la Sección 8 de API 581 (2004), la cual define que la **Probabilidad de Falla (PF)** de un equipamiento surge como resultado de la multiplicación de la Frecuencia de Falla Genérica (FFG), el Factor de Modificación del Equipamiento (FME) y el Factor de Evaluación de los Sistemas de Gestión (FESG).

$$PF = FFG \times FME \times FESG \quad (\text{Ecuación 1})$$

La metodología delineada por API 581 se fundamenta en la modificación de la **Frecuencia de Falla Genérica (FFG)** para cada tipo de equipamiento por factores particulares que reflejan diferencias identificables entre el ítem “genérico” y el ítem del equipamiento en estudio, al considerar la condición específica del equipamiento y el sistema de gestión de la compañía.

El **Factor de Modificación del Equipamiento (FME)** refleja las condiciones de operación específicas de cada ítem. Dentro de este factor se calcula un término denominado “Modulo Técnico”, el cual es un factor que relaciona el tipo de degradación potencial en servicio con el tipo de inspección o monitoreo realizado. El

El **Factor de Evaluación del Sistema de Gestión (FSEG)** se basa en la evaluación de las prácticas de gestión de las instalaciones que afectan la integridad mecánica del equipamiento. El factor se obtiene a través de la resolución de un cuestionario de 101 preguntas “multiple choice”, de acuerdo con su actual programa de gestión. Este sistema provee un registro cuantitativo que permite detectar cuales son las fortalezas y debilidades de los sistemas de gestión actuales.

5 Evaluación de Riesgo Individual y Riesgo Social

5.1 Riesgo Individual

El Riesgo Individual expresa la probabilidad de muerte por año de un individuo al ser expuesto a un peligro. Este riesgo depende de la ubicación del individuo en referencia con las zonas afectadas por el incidente. Para calcular el Riesgo Individual se utiliza la curva de Intensidad de Radiación versus Distancia, considerando las probabilidades de falla, de ignición y de muerte, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo Individual anual} = PF \times Pr_{\text{ign}} \times P_{\text{muerte}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

PF: Probabilidad de Falla del equipamiento

Pr ign: Probabilidad de ignición (para el caso del metano $Pr_{\text{ign}} = 0,2$).

Pr muerte: Probabilidad de muerte (se selecciona la mayor probabilidad de muerte entre los efectos ocasionados por Ondas de Sobrepresión y Radiación Térmica).

5.2 Riesgo Social

El cumplimiento de los criterios de Riesgo Individual es una condición necesaria pero no suficiente ya que el análisis debe completarse con el llamado Riesgo Social o la cantidad de personas que pueden perjudicarse con un solo incidente. Esto se realiza normalmente mediante el análisis de las curvas F-N. Las curvas F-N son la representación grafica de la información acerca de la frecuencia de potenciales accidentes fatales en un sistema en función del número de fatalidades que podría causar.

Para el desarrollo del Riesgo Social, resulta necesario conocer la probabilidad de que un individuo se encuentre en la estación en el momento en que ocurre el incidente. Para poder determinar dicha probabilidad, se consultó acerca de tiempos promedio de permanencia dentro de las estaciones por perfil de puesto. La Tabla 5.1 presenta algunos de los datos suministrados y empleados para determinar el Riesgo Social.

Tarea	Descripción	Frecuencia	Tiempo de permanencia	Cantidad de personas
10	Visita de Seguridad estaciones operativas	15 días	30 minutos	1
20	Verificación funcional estaciones criticas	6 meses	5 horas	2
30	Mantenimiento de trampas Scrapper	1 año	5 horas	2
40	Mantenimiento de predios	15-30 días	3 horas	2
50	Control de Odorización	21 días	1 hora	1
60	Control de cromatógrafo	1 mes	3 horas	1
70	Retiro de muestras de gas	6 meses	1 hora	1

Tabla 5.1 - Tiempos de Permanencia en estaciones.

Por último, para calcular el Riesgo Social se ingresan los datos de densidad poblacional en los alrededores de las estaciones (fuera del predio) teniendo en cuenta de esta manera el número de personas en riesgo.

5.3 Evaluación ALARP según los criterios de la empresa operadora

Para la evaluación del Riesgo Individual y Social se utilizan los criterios de ALARP [11,13] y de la empresa operadora contratante, en los cuales se consideran:

- **intolerables** a los valores de riesgo que superen 1×10^{-4} (ALARP) y 1×10^{-3} (empresa operadora).
- **tolerables** entre los valores de riesgo antedichos y 1×10^{-6} ,
- **insignificante** a valores de riesgo inferiores a 1×10^{-6} .

Para el caso del Riesgo Social, se plantean curvas con decrementos en los valores límites de riesgo en dos ordenes de magnitud (F) por cada incremento en un orden de magnitud de la cantidad de fatalidades (N).

En último lugar, se compararán el riesgo introducido por la operación de las estaciones con otros riesgos que asumen los individuos en su actividad diaria normal.

6 Resultados del análisis

6.1 Análisis de los efectos de radiación térmica y ondas de sobrepresión

Los análisis efectuados sobre las estaciones de medición y regulación permitieron verificar dos escenarios donde los efectos de Radiación Térmica y Ondas de Sobrepresión cambian radicalmente, lo cual es debido a la presencia del muro perimetral. En este contexto, estos escenarios se mencionarán como “dentro del muro” y “fuera del muro”. Finalmente, a lo largo de la discusión de resultados se evaluarán los 3 hitos mencionados en el párrafo 3.4: en el equipo, adyacente al muro (lado interno) y fuera del muro (a una distancia de 3 metros).

Ondas de sobrepresión

Se realizó un modelado de sobrepresión según los eventos definidos en el párrafo 3.1. El resultado de dicho análisis se observa en la Figura 6.1. En la misma pueden apreciarse los 3 hitos mencionados anteriormente y la evolución de la onda de sobrepresión sin la presencia del muro perimetral, en el caso más crítico resultante del análisis de las 7 estaciones de medición y regulación.

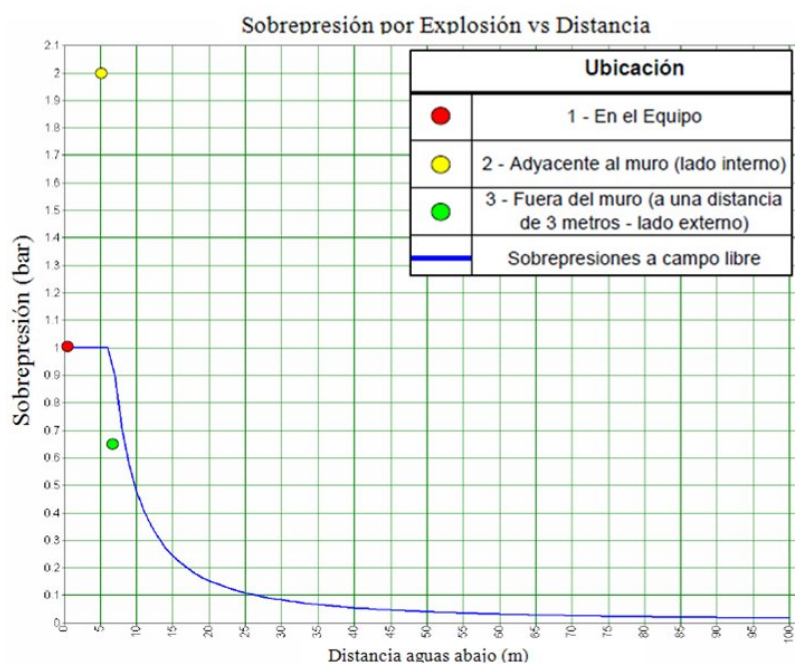


Figura 6.1 – Onda de sobrepresión resultante

De esta forma, es posible definir los posibles efectos sobre personas y equipos para cada ubicación en función del valor de sobrepresión e impulso correspondiente (Tabla 6.1), según lo visto en el párrafo 3.2 del presente informe.

Ubicación	Onda de sobrepresión (Pa)		Impulso (Pa.seg)		Efecto (con muro) sobre	
	Con muro	Sin muro	Con muro	Sin Muro	Personas	Estructuras
Adyacente al equipo	100.000	100.000	1644.7	1644.7	50% rotura de tímpano	70% colapso
Adyacente al muro (lado interno)	200.000	100.000	160.3	80.3	70% rotura de tímpano	1% colapso
Fuera del muro (a una distancia de 3m)	65.000	93.000	88.2	126	Sin efecto	1% colapso

Tabla 6.1 – Resultado de análisis de sobrepresión

Se observa que el caso más crítico para las personas se presenta en una ubicación adyacente al muro perimetral (lado interno). Para este caso, la probabilidad de muerte es baja, pero existe un 70% de probabilidad de rotura de tímpano. Como se mencionó anteriormente, el efecto del muro duplica el pico de sobrepresión en dicho punto. Por otro lado, se observa que fuera del mismo, el efecto es nulo.

En ningún caso las ondas de sobrepresión ocasionan daños y muerte por hemorragia pulmonar, o muerte por impacto con el cráneo o con el cuerpo.

Los resultados de los efectos de las ondas de sobrepresión sobre los muros perimetrales, indican que en el caso de mayor criticidad, se generaría la fractura y/o daños parciales del muro (del orden del 25%) ubicado en las cercanías de los filtros.

Por otro lado, se observa que para los equipos adyacentes, existe un 70% de probabilidad de colapso, por lo que existen altas probabilidades de desencadenarse un efecto dominó o encadenamiento de eventos.

Radiación térmica

Para el análisis de efectos de radiación térmica, se modelaron los distintos eventos en caso de una fuga con ignición: dardo de fuego (jet fire), llamarada (flash fire) y bola de fuego (fire ball). El modelo de bola de fuego presentó el nivel más crítico. La Figura 6.2 muestra el nivel de radiación en función de la posición respecto del punto de ignición. Utilizando dicha figura y los valores definidos en la Tabla 3.2, es posible definir diversos radios de afectación, en los cuales se define la probabilidad de mortalidad en función de la posición de la persona (Figura 6.3).

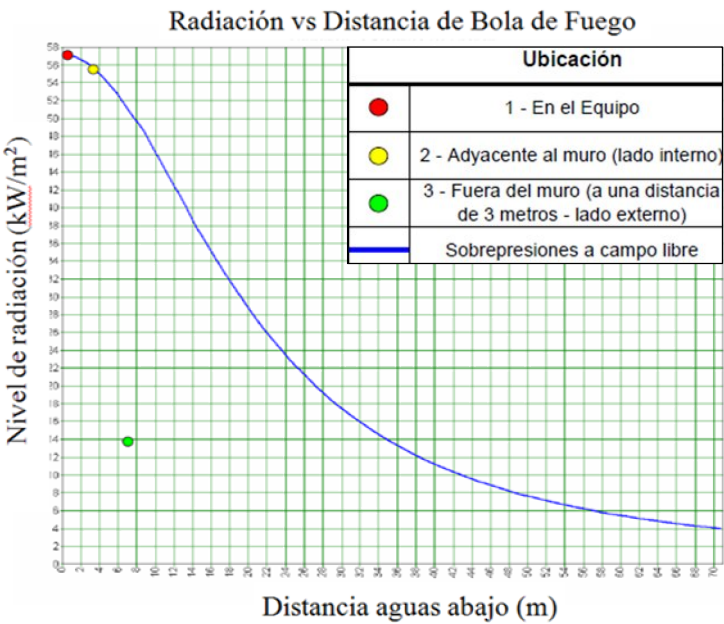


Figura 6.2 – Gráfico de Radiación vs Distancia

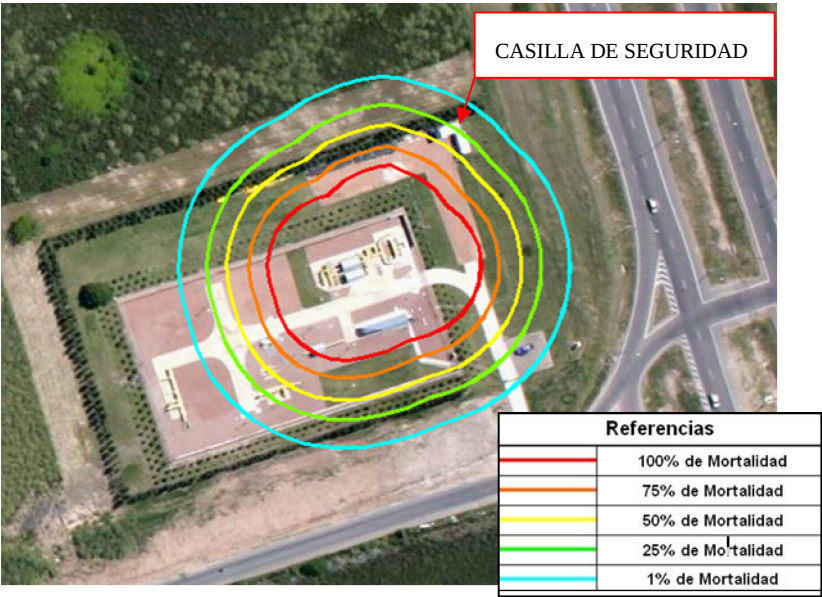


Figura 6.3 – Áreas de afectación por radiación

En función de los niveles de radiación térmica de mayor criticidad, se concluye que en caso de un evento de bola de fuego, se producirá la ignición de elementos combustibles, daños en equipos de proceso y posible colapso de estructuras, dentro de los límites del muro perimetral.

En la Figura 6.3 se observa que parte de la radiación afecta la casilla de seguridad ubicada dentro del predio, en la cual se considera que la misma se encuentra continuamente ocupada por personal. Como se mencionó anteriormente, el muro perimetral reduce los niveles de radiación en caso de un evento con ignición. Debido a esto, se presenta la alternativa de instalación de un muro en “L” que permita reducir el riesgo en las zonas adyacentes a la casilla en cuestión. La Figura 6.4 muestra la nueva distribución de niveles de radiación en caso implementar la acción recomendada.

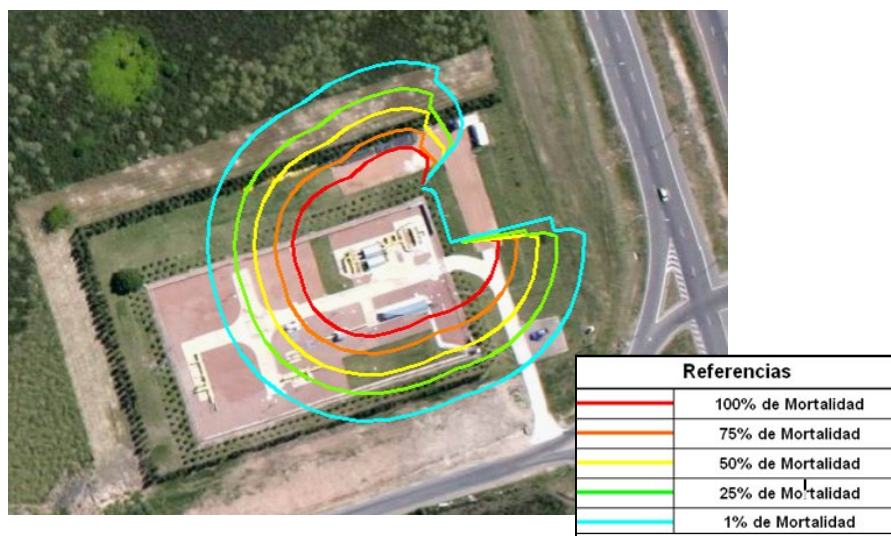


Figura 6.4 – Atenuación de radiación por muro perimetral

Como conclusiones generales, se evidencia que los daños más significativos, tanto en personas como en equipos y estructuras, son debidos a los efectos de la Radiación Térmica, en particular en el caso de un evento tipo Fireball. La implementación de un muro en “L” puede considerarse como una alternativa relativamente económica para reducir notablemente el nivel de riesgo en la casilla de seguridad.

6.2 Análisis de probabilidad de falla

De acuerdo a lo descrito en el párrafo 4 del presente informe técnico, se realizó la evaluación de los diversos factores que afectan la probabilidad de falla genérica de cada equipo analizado. A continuación se describen los diferentes resultados.

Factor de modificación del Equipamiento (FME)

A continuación se presentan los valores obtenidos en el cálculo de los Factores de Modificación del Equipamiento (FME):

- Filtros: entre 1.0 y 1.3
- Cañerías de Alta Presión: 6.6

- Cañerías de Baja Presión: entre 2.6 y 4.6

Como resumen general, estos resultados indican que debido a este factor, la frecuencia de falla genérica no se incrementará en ningún caso en un orden de magnitud.

Factor de Evaluación de Sistema de Gestión (FSEG)

Se realizó la evaluación de los 13 ítems enumerados en la tabla de la Figura 6.5. El resultado final indica que el sistema de gestión utilizado por la empresa operadora supera el nivel promedio de la industria. Aun así, en la figura se observa una oportunidad de mejora en el sistema de Revisión de Seguridad previo al Arranque (ítem 9). Finalmente, el factor FSEG tiene un valor de 0.169, por lo que reduce 6 veces la frecuencia de falla genérica.

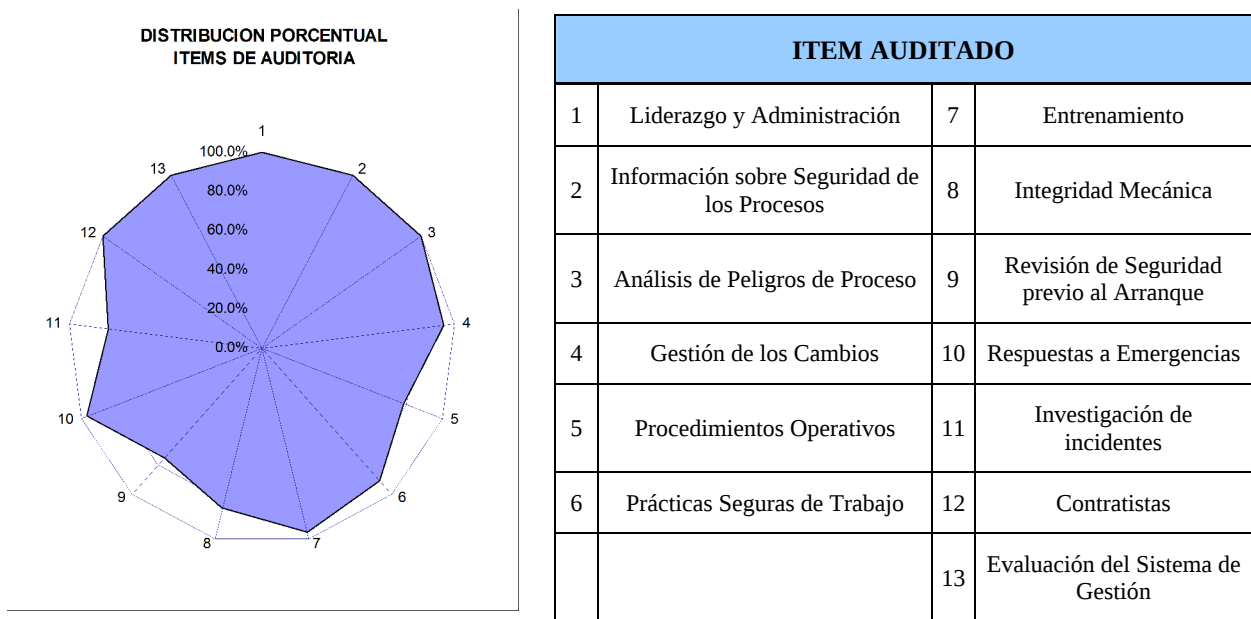


Figura 6.5 – Factor de Evaluación de Sistema de Gestión

Probabilidad de Falla Final

El estudio de las Probabilidades de Falla de los equipamientos, calculadas mediante la **Ecuación 1** de acuerdo con los lineamientos de API 581, permite concluir que el evento con mayor probabilidad es la liberación continua con dispersión segura (fuga) producido por la rotura de un filtro (1.6×10^{-4}).

Si bien los efectos más significativos ocurren en el caso de una liberación instantánea asociada con efectos térmicos, como un producto de la combinación de la explosión del equipo y la ignición del fluido procesado, estos casos presentan las probabilidades más bajas de ocurrencia respecto de los demás eventos.

6.3 Análisis de Riesgo Individual y Riesgo Social

Una vez definidas las áreas críticas de afectación (Figura 6.3) y la probabilidad de falla para cada equipo, es posible definir la probabilidad de mortalidad que posee una persona situada a una distancia determinada de la estación de medición y regulación, según la

$$\text{Riesgo Individual anual} = \text{PF} \times \text{Pr}_{\text{ign}} \times \text{P}_{\text{muerte}}$$

(Ecuación 2) Por otro lado, utilizando los datos de la Tabla 5.1 para definir la probabilidad de presencia de una persona en el punto analizado, es posible determinar el riesgo social de mortalidad.

Las Figura 6.6 y Figura 6.7 muestran el resultado del análisis de riesgo individual y social para los dos casos más críticos de las 7 estaciones estudiadas. En ambos casos se observa claramente que los niveles de riesgo se encuentran por debajo del criterio de aceptación adoptado por la empresa operadora.

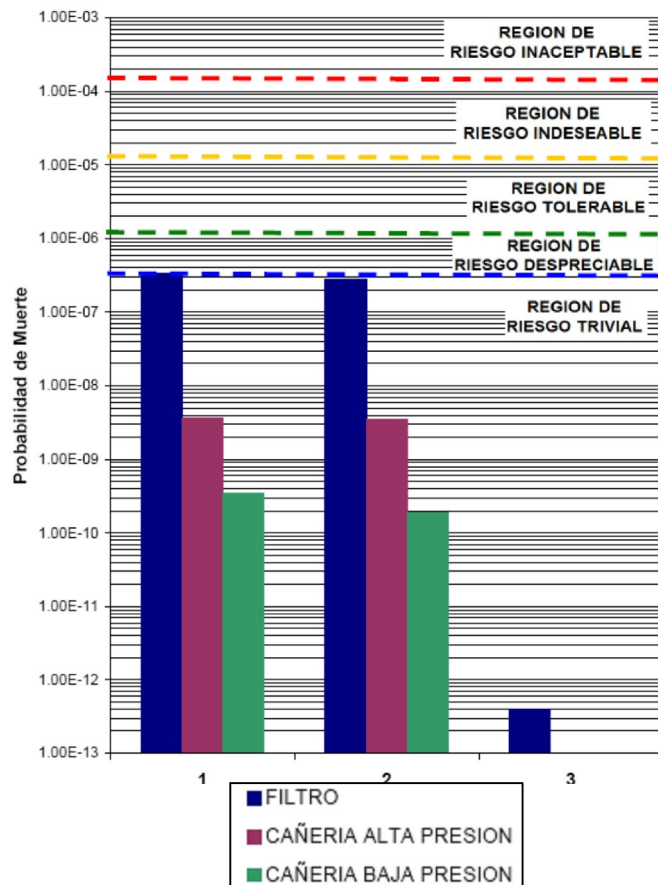


Figura 6.6 – Gráfico de Riesgo Individual

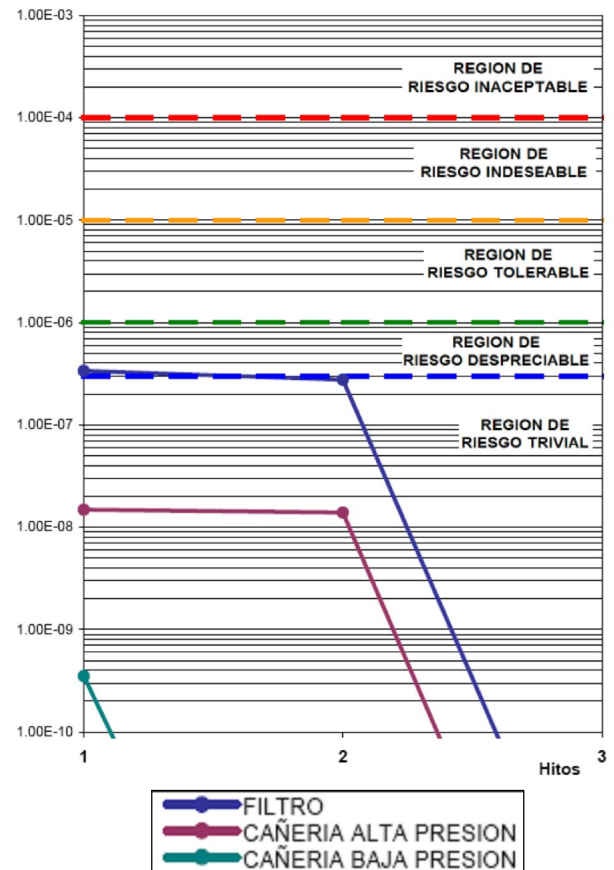


Figura 6.7 – Gráfico de Riesgo Social

Hito 1 : al lado del equipo **Hito 2:** adyacente al muro (lado interno) **Hito 3:** a 3 metros del muro

Para el caso del riesgo social, solo se tiene en cuenta la probabilidad de presencia de personal de la empresa operadora, ya que los resultados de análisis de consecuencia demostraron que las áreas de afectación de los eventos analizados se encuentran dentro del perímetro del predio.

El riesgo individual introducido por la operación de las estaciones puede compararse con otros riesgos que asumen los individuos en su actividad diaria normal. La Tabla 6.2 presenta una estimación del valor de algunos riesgos (mortalidad) asociados a la vida ordinaria (datos correspondientes a Gran Bretaña y a Estados Unidos) [11] y la comparación con los valores de riesgo de muerte por liberación instantánea de los equipamientos de las estaciones.

Actividad o evento	Frecuencia anual	1 evento en	Criterio de Riesgo ALARP/BG
Caída de Meteoritos	6×10^{-11}	17.000 millones	Riesgo Trivial
Persona ubicada al lado de Cañerías de Baja Presión	$3,52 \times 10^{-10}$	2.800 millones	
Persona ubicada al lado de Cañerías de Alta Presión	$3,7 \times 10^{-9}$	270 millones	
Explosiones de Recipientes a Presión	5×10^{-8}	20 millones	
Viajar en avión	1×10^{-7}	10 millones	
Persona ubicada al lado del Filtro	$3,37 \times 10^{-7}$	2,9 millones	Riesgo Despreciable
Atropello por automóvil	5×10^{-5}	20.000	
Viajar en automóvil	$1,7 \times 10^{-4}$	5.900	Riesgo Intolerable
Viajar en motocicleta	1×10^{-3}	1.000	
Cáncer (menor 60 años)	$1,96 \times 10^{-3}$	510	
Fumar (20 cigarrillos por día)	5×10^{-3}	200	

Tabla 6.2 – Comparación de riesgo anual entre distintas actividades / eventos

Se observa que el riesgo anual de muerte que introduce la existencia de la operación de las estaciones a individuos en sus cercanías es mucho menor que actividades normales en la vida de los individuos, como transportarse en moto o en automóvil.

7 Conclusiones

Se realizó el estudio de análisis de riesgo cuantitativo de acuerdo con los lineamientos del Documento Base API BRD 581 (RBI, Risk Based Inspection), de 7 Estaciones de Medición y regulación, en las cuales el área de una eventual falla podría afectar las instalaciones aledañas al predio.

El análisis cuantitativo de riesgo es una técnica que permite cuantificar y evaluar el riesgo en plantas de proceso industriales. La misma se basa en datos históricos de instalaciones similares que se modifican por factores particulares que reflejan diferencias identificables entre el ítem “genérico” y el ítem del equipamiento en estudio.

Durante todo el proceso de análisis, la técnica permite identificar los puntos de mejora para poder reducir el riesgo de operación de la planta. Para el caso analizado, se identificaron posibles mejoras tanto para reducir la consecuencia como la probabilidad de falla de los equipos analizados. Se considera que la implementación de un muro en “L” puede considerarse como una alternativa relativamente económica para reducir el nivel de riesgo en la casilla de seguridad. Por otro lado, se observó una posibilidad de mejora en el aspecto de seguridad.

Se determinó, mediante los lineamientos de API 581 y la utilización de los modelos clásicos de eventos inflamables, que los efectos de un eventual incidente quedan circunscriptos dentro de los límites físicos de

las estaciones. Debido a esto, un eventual incidente no afectaría a las poblaciones aledañas a las estaciones de medición.

Los valores de Riesgo Individual y Riesgo Social se encuentran en el rango de valores aceptables según los criterios ALARP y de la empresa operadora. Ningún equipo de las estaciones supera el límite de riesgo individual intolerable (1×10^{-4}).

8 Referencias

- [1] API RP 580. "Risk Based Inspection". American Petroleum Institute. 2000.
- [2] API BRD 581. "Risk Based Inspection (Base Resource Document)". American Petroleum Institute. 2000.
- [3] BG Standard Safety Case Standard BGA-HSSE-SAF-ST-1526. British Gas. 2007.
- [4] S. Hockey, P.Rew. "Review of Human Response to Thermal Radiation". Health and Safety Executive, HSE Research Contract N° 97/1996, UK. 1997.
- [5] I.Hymes. "The Physiological and Pathological effects of Thermal Radiation". Systems Reliability Directorate, Report SRD, R 275, Warrington, UK. 1983.
- [6] Methods for the determination of possible damage to people and objects from releases of hazardous materials. CPR 16E. The Green Book, TNO. 1992.
- [7] F. Diaz Alonso. "Análisis de Consecuencias y Zonas de Planificación para Explosiones Industriales Accidentales". Universidad de Murcia, España. 2006.
- [8] D.Bjerketvedt, J.Bakke, K.van Wingerden. "Gas Explosion Handbook". Journal of Hazardous Materials 52 (1997) page 1 - 150. Elsevier Science B.V.
- [9] IGE/TD/1 "Recommendations on Transmission and Distribution Practice". The Institution of Gas Engineers, United Kingdom.
- [10] J.Casal, H.Montiel, E.Planas, J.Vílchez. "Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales". Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. 1999.
- [11] www.ops.dot.gov
- [12] E.Golub, J.Greenfeld, R.Dresnack, F.Griffis, L.Pignataro. "Pipeline Accident Effects for Natural Gas Transmission Pipelines". New Jersey Institute of Technology, prepared for U.S. Department of Transportation (DOT). 1996.
- [13] DIN IEC 61508. "Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems". Deutsches Institut für Normung. 2005.