

SEGURIDAD FUNCIONAL EN DUCTOS

Juan Czarnowski, jczarnowski@gmail.com
Oscar Bollmann, obollmann@gmail.com

1 Sinopsis

La operación de transporte por ductos está sujeta a riesgos que pueden causar importantes perjuicios ambientales, a los seres humanos, a las instalaciones y en la imagen de las empresas operadoras; pudiendo desencadenar procesos judiciales que restrinjan o impidan la operación y además, obligar la reparación y remediación de los daños causando graves pérdidas económicas.

Esta propuesta formula un marco metodológico que contribuye a reducir los riesgos implícitos en la operación de transporte por ductos, mediante la aplicación de las normas de Seguridad Funcional.

La base normativa de la Seguridad Funcional ha sido ampliamente desarrollada para la industria de procesos pero su aplicación en ductos aún presenta dificultades, debido a la complejidad de transportar fluidos por los mismos.

Dentro de la SF, los resultados de la evaluación de riesgos, da las bases para decidir las inversiones en las estrategias de protección, en las de mitigaciones y/o controles de derrames de fluidos peligrosos.

En la mayoría de los sistemas de transporte por ductos en Latinoamérica, el diseño de las protecciones por sobrepresión y de las estrategias de control de derrames, no cuenta con un marco metodológico que tenga en cuenta el análisis de los riesgos (frecuencia de ocurrencia por severidad de las consecuencias).

El enfoque propuesto se basa en la aplicación las normas IEC 61511 [11][12][13] e IEC 61508 [8]. También se funda en la modelación hidrodinámica de las estrategias de protección por sobrepresiones y control de derrames, y, en la interacción sinérgica de especialistas y equipos responsables de la operación. Los cuales podrán identificar los peligros y evaluar los riesgos; proponer estrategias de protección y seleccionar aquellas que permitan reducirlos, hasta alcanzar el nivel aceptado, definido en la matriz de riesgo de la compañía.

El análisis de riesgos conlleva implícitamente la evaluación técnico – económica para decidir cuál es la solución más conveniente que permita alcanzar la condición segura de la operación de transporte por ductos.

Esta propuesta es el resultado de la experiencia de nuestra participación en proyectos orientados al diseño de los sistemas de seguridad y control de derrames en importantes sistemas de transportes por ductos de Latinoamérica, incluyendo México, Colombia, Ecuador, Chile y Argentina.

2 Introducción

La experiencia nos muestra que la mayoría de los procesos de desarrollo de ingeniería o re – ingeniería del proceso de transporte por ductos, adolece de un adecuado tratamiento de la seguridad en el proceso de diseño y toma de decisiones.

Los aspectos relativos a la seguridad se suelen incluir, usualmente, como tareas complementarias en las fases finales de los proyectos, tales como los análisis HAZOP (Hazard and Operability Studio), What If (¿Qué pasa si?), HAZID (Hazard Identification studio), etc., sin incorporar el adecuado tratamiento de la hidrodinámica o de las fluctuaciones transitorias asociadas a eventos que originan riesgos en un ducto, tales como los bloqueos de líneas, paro de bombas y roturas de ductos.

Las técnicas de análisis de riesgos como HAZOP, What If, HAZID, basan la identificación del peligro y la ponderación del riesgo en una interpretación cualitativa a través de preguntas o palabras claves, sin incorporar la compleja dinámica de los ductos ante los eventos transitorios.

En particular, la técnica del HAZOP requiere la identificación de nodos en los que debe o no cumplir con una consigna.

En un ducto, el “nodo” no tiene una localización definida a priori, ya que por ejemplo, el sobrepaso de la presión sobre la MAOP (máxima presión admisible) puede ocurrir en diferentes puntos en el ducto, que dependerán de la configuración del mismo, la altimetría y el evento que origina el bloqueo (cierre imprevisto de una válvula de bloqueo). En consecuencia, la identificación de un peligro de rotura (por ejemplo por sobrepaso de presión) y la propuesta de salvaguardas, pueden no ser correctas sin la previa identificación del punto (o nodo) en el que se debe verificar la consigna. La identificación de este punto requiere de un análisis hidrodinámico previo para el caso, por ejemplo, de un bloqueo de línea.

La modelación hidrodinámica es una componente indispensable en el proceso del análisis de riesgos y en el diseño seguro de los ductos.

La metodología propuesta toma como base el marco normativo de la Seguridad Funcional que se describe más adelante.

Esta metodología es una importante herramienta que permite ordenar el análisis y, en consecuencia, realizar una adecuada toma de decisiones con relación a las inversiones que requiere un sistema de transporte por ductos para operar en forma segura y dar cumplimiento a las normas vigentes, tales como las ASME B31.4 y ASME B31.8, incorporando en la ecuación costo – beneficio, los costos potenciales asociados a los riesgos que se buscan evitar (roturas, derrames, daños a las personas, al ambiente, a la imagen de la empresa, acciones legales, etc.).

3 Desarrollo

3.1 Hidrodinámica de los Eventos de los Riesgos en Ductos

El transporte por ductos a presión es un fenómeno esencialmente transitorio, en el que la presión y el caudal varían continuamente en el tiempo. La incorporación de software de modelación hidrodinámica permite hoy estimar la evolución de las variables intervinientes con un buen ajuste a la realidad ante cambios o eventos significativos de la operación. Estos eventos pueden incluir tanto a los incrementos de presión por bloqueos de línea como a la descarga de fluidos en roturas del ducto.

Varios de estos software permiten incorporar a los dispositivos de alivio de sobrepresiones, tales como válvulas de alivio, lazos de control de bombas y válvulas reguladoras, switch de paros por alta presión de bombas, y también a las estrategias remotas basadas en el SCADA incluyendo a los algoritmos de detección de cambios críticos. Esta herramienta es la que permite responder adecuadamente a las preguntas que surgen en los análisis de riesgo y, en consecuencia, su uso pasa a ser una tarea determinante en el proceso de diseño de un sistema de transporte seguro.

A continuación se describen brevemente dos casos que usualmente forman parte del proceso de Seguridad Funcional de ductos.

3.1.1 Sobrepresiones

El incremento de las presiones en un ducto es una de las causas que puede dar lugar a su rotura o a la de las instalaciones complementarias. Los incrementos de presión pueden ocurrir por bloqueos de líneas originados por, por ejemplo, cierres imprevistos de válvulas de bloqueo y de control.

En el marco del análisis de riesgo, se modelan las respuestas de las capas de protección de un sistema y/o de aquellas factibles de implementar para verificar su capacidad para controlar a las sobrepresiones (validar la protección). Las capas de protección deben ser independientes (IPL: Independent Protection Layers) para que en el desarrollo del análisis de riesgo se puedan multiplicar las probabilidades de falla ante la demanda (PFD: Probability of Failure on Demand) de cada capa de protección y así determinar la reducción del riesgo factible de alcanzar [16][17].

A modo de un listado indicativo, entre las capas de protección que se evalúan, se incluye a:

- BPCS (Basic Process Control System): se refiere a la respuesta dinámica de los equipos de bombeo, válvulas de recirculación y/o de regulación con control automático (PID). Se verifica la capacidad de acotar las sobrepresiones de los dispositivos controlados y los set de calibración.
- PSV (Pressure Safety Valves): corresponde a los alivios mecánicos (válvulas de alivio, discos de ruptura, etc.) que alivian por descarga de fluido. En el análisis se verifican y/o definen tipos de válvulas, dimensiones, set de calibración, líneas y recepción de las descargas.
- HPSD (High Pressure Shut Down): Alarmas y Paros por Alta Presión en las descargas de las bombas. Incluye la revisión y adecuación de los sistemas de alarmas y disparos por alta / baja (protección instrumentada) en las estaciones de bombeo.
- SIF / SIS (Safety Instrumented Function) / (Safety Instrumented System): se incluye a posibles Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) que pudieran requerirse para reducir el riesgo de sobrepresiones. Estas funciones incluyen a los sensores, lógicas o algoritmos de alarma, comunicación e intervenciones automáticas / remotas en el sistema. Las SIF tendrán un Nivel de Integridad de la Seguridad SIL (Safety Integrated Level) que resulta de la aplicación de técnicas de determinación del SIL objetivo y su correspondiente FRR (Factor de Reducción de Riesgo) como es el LOPA (Layer of Protection Análisis) como se detalla más adelante.

Los resultados del análisis hidrodinámico se pueden visualizar a través de curvas de envolventes de presiones a lo largo del ducto afectado y de la evolución de las presiones en puntos de interés.

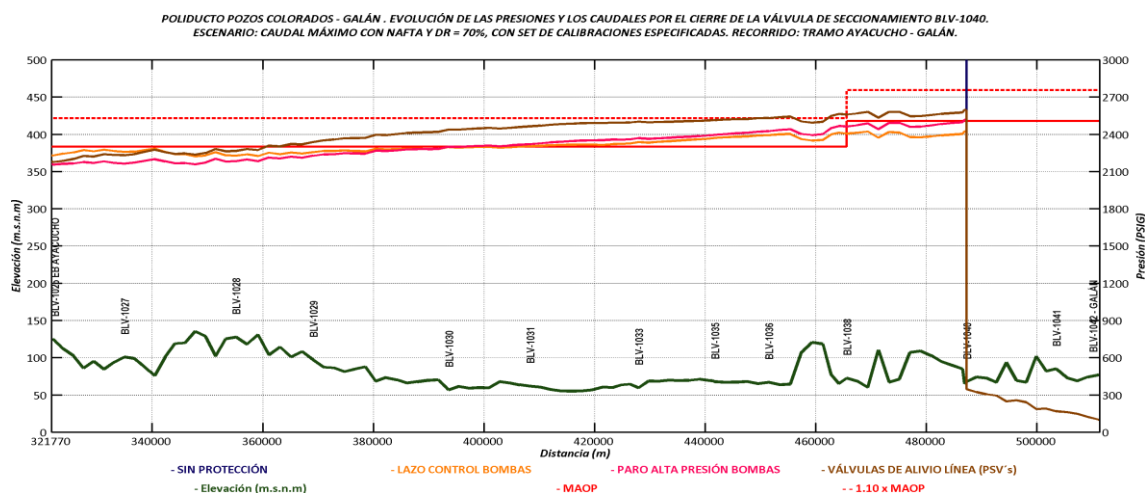


Figura 1. Perfil de presiones máximas (Envolvente) por un bloqueo de línea (BLV – 1040)

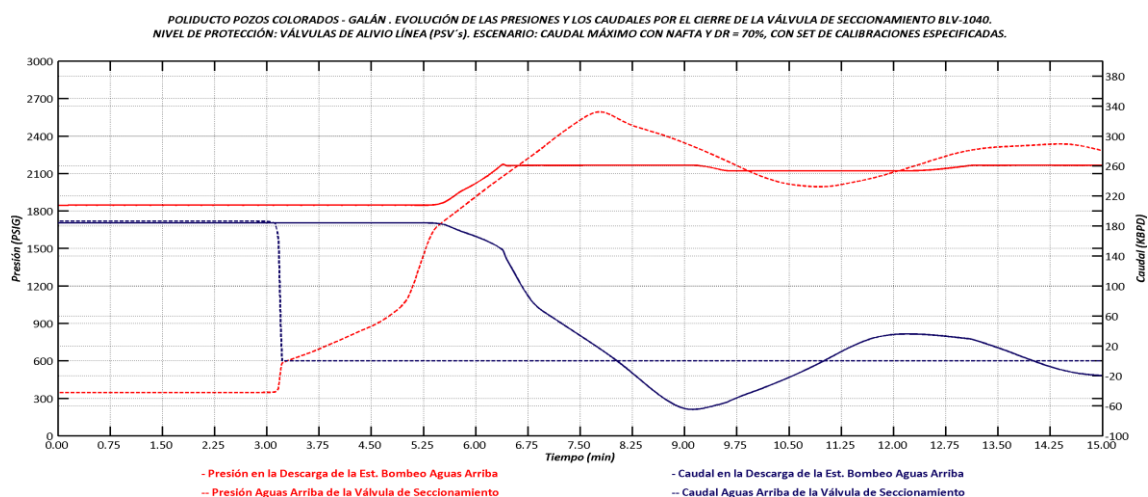


Figura 2. Evolución de caudales y presiones en puntos de interés por un bloqueo de línea (BLV – 1040)

El caso mostrado corresponde a un tramo de un poliducto de ECOPETROL (Colombia) de 250 km de longitud. Las curvas envolventes permiten verificar en que puntos se supera o no la tolerancia admisible indicada (Línea rojas continuas y punteadas).

El punto de verificación del sobrepaso puede variar de acuerdo a la localización del bloqueo de línea, del perfil altimétrico, del perfil de la MAOP del ductos y de la capa de protección que se evalúa. Solo será válida aquella protección que asegura que el sobrepaso es inferior a la tolerancia a lo largo de todo el ducto. En este caso, la válvula de alivio en by – pass a la válvula de bloqueo no será una protección válida, tal como se puede ver en el siguiente cuadro:

CUADRO III.3: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE LOS CIERRES DE LAS VS ENTRE AYACUCHO Y GALÁN CON LOS SETS ESPECIFICADOS.

VÁLVULA QUE CIERRA	PROTECCIÓN EVALUADA		PRESIONES MÁXIMAS EN EL PUNTO CRÍTICO DEL DUCTO				
	ID NIVEL	NOMBRE	PROGRESIVA DEL PUNTO CRÍTICO DE COMPARACIÓN CON LA PRESIÓN DE DISEÑO (m)	PRESIÓN ALCANZADA EN EL PUNTO CRÍTICO (Psig)	PRESIÓN DE REFERENCIA (MAOP) (Psig)	% DE SOBREPASO	CONDICIÓN DE SOBREPASO DE LA TOLERANCIA ADMITIDA DEL 10% DE LA PRESIÓN DE DISEÑO.
BLV-1040	1	SIN PROTECCIÓN	393590	4166.4	2299.9	81.2%	Se supera el 10% de la PMPO
	2	LAZO CONTROL BOMBAS	464160	2413.2	2299.9	4.9%	No se supera 10% de la PMPO
	3	PARO ALTA PRESIÓN BOMBAS	464160	2472.5	2299.9	7.5%	No se supera 10% de la PMPO
	4	VÁLVULAS DE ALIVIO LÍNEA (PSV's)	464160	2563.5	2299.9	11.5%	Se supera el 10% de la PMPO

Figura 3. Cuadro resumen de validación de las capas protección evaluada (BLV – 1040).

La cantidad de protecciones requeridas para alcanzar la condición segura de operación (riesgo inferior al indicado en la Matriz de Riesgo del Operador del Ducto) resultará del análisis HAZOP – LOPA que se incluye en la presente propuesta, a partir de las IPL validadas a través del análisis hidrodinámico.

3.1.2 Rotura de Ductos

El principal riesgo asociado al transporte de fluidos peligrosos por ductos a presión es su rotura y el consecuente derrame que podrá dar lugar a impactos negativos desde el punto de vista ambiental, de la imagen de la compañía operadora, de los costos de reparación y remediación y de las acciones legales que pudieran originarse.

La modelación hidrodinámica permite evaluar los volúmenes de derrames y definir la mejor combinación de dispositivos, cantidad y distribución de las válvulas de bloqueo y estrategias basadas en el SCADA para acotar los derrames a un volumen (mitigación de la consecuencia) y probabilidad de ocurrencia que resulten aceptables para el proyecto, particularmente en las áreas o tramos críticos (Áreas de Altas Consecuencias – ACC o HCA – High Consequence Areas).

El volumen máximo de derrame a controlar, y la reducción de su probabilidad de ocurrencia, dependerá de:

- La configuración de las válvulas de bloqueo y retención a lo largo del ducto.
- La capacidad de detectar rotura mediante sistemas de detección de fugas o de alarmas de roturas basadas en el monitoreo de cambios de variables de proceso en PLC locales o en los centros de control.
- El diseño de las estrategias de intervención a partir de la detección de una rotura, que incluya cierre de válvulas de bloqueo, paros o reducciones del bombeo (reducción de la velocidad de bombas), cierre o apertura de válvulas de regulación, etc.
- Medidas preventivas y de contención de derrames en tramos críticos con alto potencial de impactos negativos (HCA o ACC). Estas medidas podrían incluir encauzamiento de los derrames hacia áreas seguras, sistemas de detección de derrames externos a los ductos, formulación de planes de contingencia, etc. (medidas de mitigación).

La estrategia más conveniente para controlar los derrames será aquella que permitan reducir a un mínimo el volumen de derrame, dentro de los costos razonables para cada sistema.

Análogamente a lo propuesto para el control de las sobrepresiones, se propone identificar las capas de protección o control de los derrames (IPL). Estas pueden incluir al monitoreo de las variables del proceso, a los sistemas de detección y localización de fugas (LDS – Leak Detection Systems) y a Sistemas de Detección de Roturas.

Mediante la modelación hidrodinámica se estiman los volúmenes de derrames para roturas localizadas en los puntos críticos (áreas ACC o HCA), con diámetros específicos, escenarios de operación probables, configuración de válvulas de seccionamiento o bloqueo determinadas y para las estrategias de intervención que se estimen factibles de implementar [15][18].

La cantidad de capas de protección y/o la configuración de las válvulas de bloqueo será la que resulte del análisis de riesgo en el marco de la metodología propuesta. Los parámetros relevantes que definen la configuración y la estrategia más conveniente son el volumen máximo de derrame aceptable en una área de alta consecuencia y la probabilidad de que el sistema propuesto pueda controlarlo (probabilidad de falla del sistema).

En los gráficos siguientes se muestran los resultados relevantes de la modelación hidrodinámica de la rotura identificada como 05 – 1 (rotura 1 del tramo 5) efectuada en el poliducto de 16" de San Fernando Apiay – Monterrey (Ecopetrol, Colombia). En el primer gráfico se indican los casos (estrategias) evaluadas. El término SSA se refiere al Sistema de Seccionamiento Automático propuesto, cuya activación se basa en el la declaración de alarmas de cambios de las presiones y caudales típicos de una rotura.

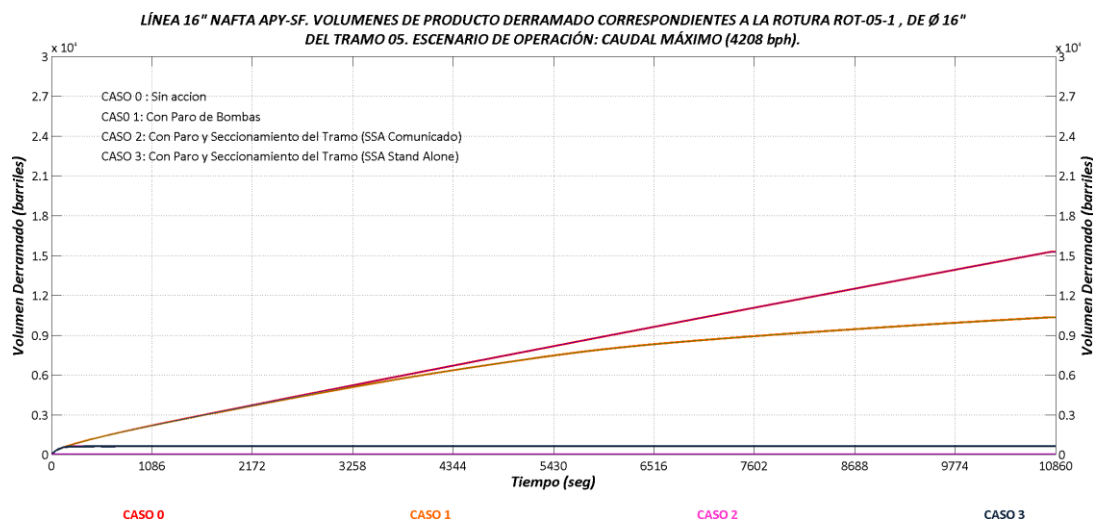


Figura 4. Evolución de los volúmenes de derrame para la Rotura 05 – 1, entre las válvulas ESDV1005 y ESDV1006.

CUADRO N° III - 3: VOLÚMENES DERRAMADOS PARA ROTURAS DE DIÁMETRO EQUIVALENTE 16" EN EL NAFTADUCTO DE 16" (CAUDAL MÁXIMO).

IDENTIFICACIÓN DE LAS FUGAS, NIVEL DE INTERVENCIÓN Y VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO					ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN DEL SSA			VOLÚMENES DERRAMADOS A TRAVÉS DE LAS ROTURAS				
FUGA	DIÁMETRO EQUIVALENTE DE ROTURA (pulgadas)	NIVEL DE INTERVENCIÓN DEL SSA	VÁLVULAS QUE INTERVIENEN EN EL SSA		DETECCIÓN DE BOMBAS	SECCIONAMIENTO (SSA COMUNICADO)	SECCIONAMIENTO (SSA Stand Alone)	VOLÚMEN DERRAMADO EN 1 h (bls)	VOLÚMEN DERRAMADO EN 2 h (bls)	VOLÚMEN DERRAMADO EN 3 h (bls)	% DE REDUCCIÓN DE DERRAME EN 3 HS	% DE REDUCCIÓN DE DERRAME RELATIVO AL NIVEL ANTERIOR
			AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO								
ROT_16_NAP_05_1	16	0	ESDV8005	ESDV8006	NO	NO	NO	5 417	9 944	14 470	---	---
		1			SI	NO	NO	5 215	8 010	9 590	33.7%	---
		2			SI	SI	NO	2 432	2 432	2 432	83.2%	74.6%
		3			SI	NO	SI	2 405	2 405	2 405	83.4%	1.1%

Figura 5. Resumen del volumen derramado para 1 hr., 2 hs. y 3 hs. en la Rotura 05 – 1.

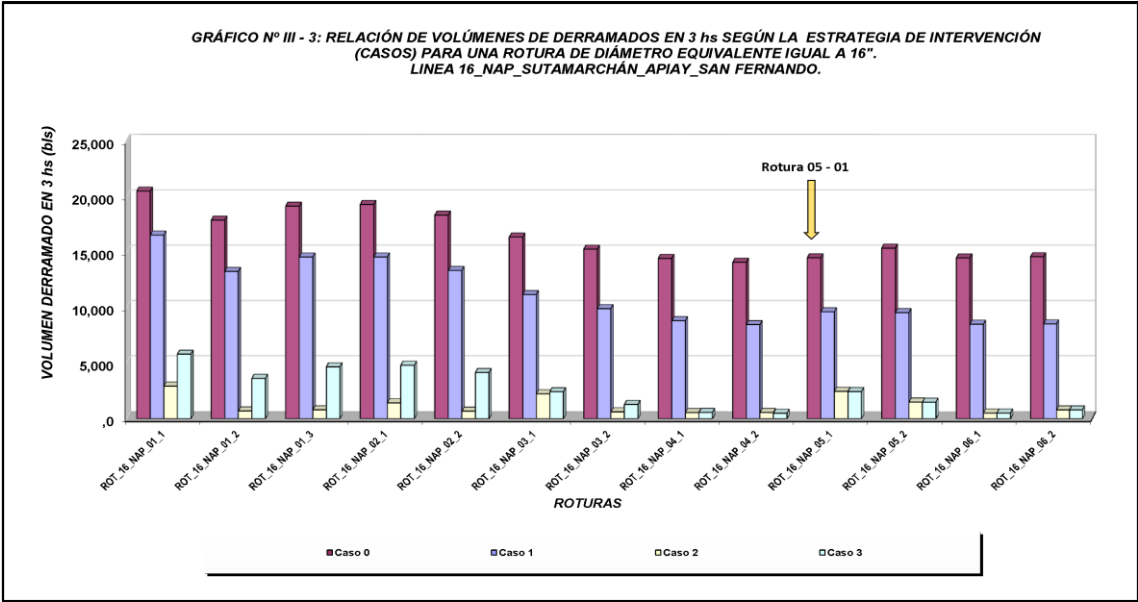


Figura 6. Volúmenes de derrame en 3 hs. para las roturas modelas según las estrategias de control (Casos).

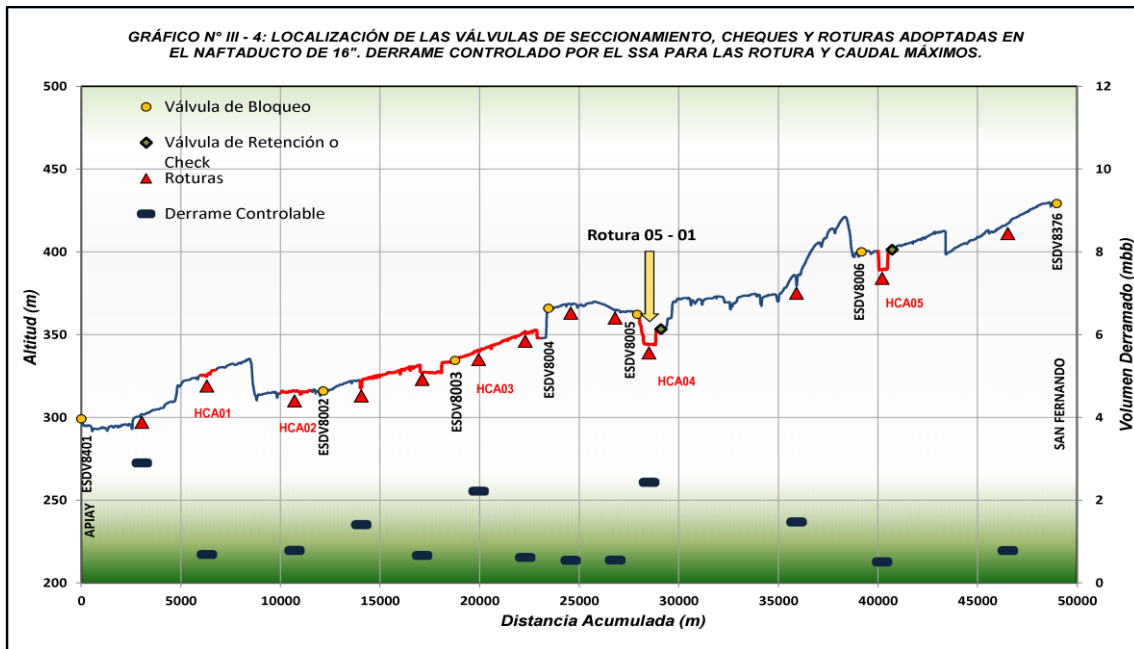


Figura 7. Localización de las roturas modeladas y magnitud del volumen de derrame controlable para la estrategia más completa de control (Casos 3).

El último gráfico permite identificar el volumen máximo controlable para la estrategia propuesta (SSA: Sistema de Seccionamiento Automático), para la configuración de válvulas de bloqueo y roturas evaluadas, con respecto a la localización de las áreas de altas consecuencias.

El sistema seccionamiento propuesto debe garantizar el volumen máximo de derrame controlable en un tramo determinado con una probabilidad de falla acorde a la requerida como resultado del análisis de riesgo (HAZOP – LOPA). Para ello, lógicas de detección de cambios típicos de un patrón de rotura, la declaración de las alarmas de rotura y la activación de las secuencias incluidas en las estrategias de control (paros de bombas, cierres de válvulas de bloqueo, etc.) deben poseer un nivel de integridad consistente con el del sistema de seccionamiento propuesto.

3.2 Marco Normativo de la Seguridad Funcional

La Guía ISO / IEC define a la seguridad como un estado en el que se está libre de riesgos inaceptables para las personas, para el medio ambiente y para los activos de una compañía.

Llamamos entonces riesgo “aceptable” cuando su valor calculado es menor al valor naturalmente aceptado por el entorno (la empresa, la sociedad, etc.). Cuando el valor calculado del riesgo es mayor, que ese valor aceptado, decimos que se trata de un riesgo “tolerable” o “inaceptable”, por lo tanto debemos reducirlo. En este caso, la seguridad existirá sólo cuando la reducción del riesgo pueda ser garantizada. Cuando no podemos llegar al riesgo aceptable podremos conformarnos con estar en riesgo “tolerable”, pero en éste la seguridad no estará totalmente garantizada (no estamos tan seguros).

La Seguridad Funcional es una rama de la seguridad general que tiene que ver con el proceso, el sistema de control del proceso y el buen funcionamiento de las capas de protección, de manera tal, que ninguna falla de las Funciones de Seguridad pueda llevar a heridas o muerte de seres humanos, contaminación del medio ambiente, pérdidas de los activos y producción.

La Seguridad Funcional necesita de normas. La norma de aplicación general es la IEC 61508 [8] “Seguridad Funcional para Sistemas Eléctricos, Electrónicos y Electrónicos programables (E/E/PES). Derivada de la anterior y específica para el sector de la industria de procesos aplica la norma IEC 61511 [11][12][13] o su equivalente ANSI / ISA-S84 [14].

Los elementos utilizados en las funciones de seguridad, pueden fallar y lo hacen en tres formas diferentes dependiendo la causa. Estas son:

- Las fallas aleatorias de hardware,
- Las fallas del equipamiento de causa común y
- Las fallas sistemáticas.

Considerando las causas que pueden llevar a una falla de la SIF, podemos dar una definición para la Seguridad Funcional que está de acuerdo con la norma IEC 61511:

“La seguridad funcional es funcionalmente segura, si las fallas aleatorias, las fallas de causa común y las fallas sistemáticas están bajo control, y por lo tanto no pueden dar lugar a una falla de funcionamiento del SIS.

Si la función de seguridad no falla, entonces no puede producir daño o muerte a las personas, afectar al medio ambiente o producir pérdidas a las instalaciones y a la imagen de la empresa. No se puede lograr el 100% en Seguridad Funcional, pero las normas mencionadas establecen los lineamientos y directrices sobre cómo lograr la seguridad funcional SIL 1, SIL 2, SIL 3 en las SIF. El SIL, da idea del rendimiento de las SIF. SIL, y seguridad funcional aplica a cualquier función de seguridad activa y se encuentra en prácticamente cualquier industria, desde la química, farmacéutica, gas y petróleo, automotriz, máquinas, ferroviaria y también es posible su aplicación al proceso de transporte de fluidos por ductos.

3.2.1 Gestión de la Seguridad Funcional

Con el fin de lograr la seguridad funcional es necesario una correcta administración de la Seguridad Funcional en la empresa. La gestión de la Seguridad Funcional tiene un doble objetivo.

- El primero es definir todas las actividades técnicas y de gestión que se deben llevar a cabo, durante toda la vida útil de la función de seguridad y del Sistema Instrumentado de seguridad.
- El segundo objetivo es designar a las personas que llevarán a cabo las actividades y a los responsables de hacerlas ejecutar.

La gestión de la seguridad funcional está guiada por un modelo de ciclo de vida de la Seguridad Funcional.

3.2.2 Ciclo de Vida según el modelo de la IEC 61511

El modelo de “Ciclo de vida” de la norma, identifica todas las fases y etapas que la función de seguridad atravesará durante su vida útil. La siguiente figura reproduce el Ciclo de Vida de la norma 61511.

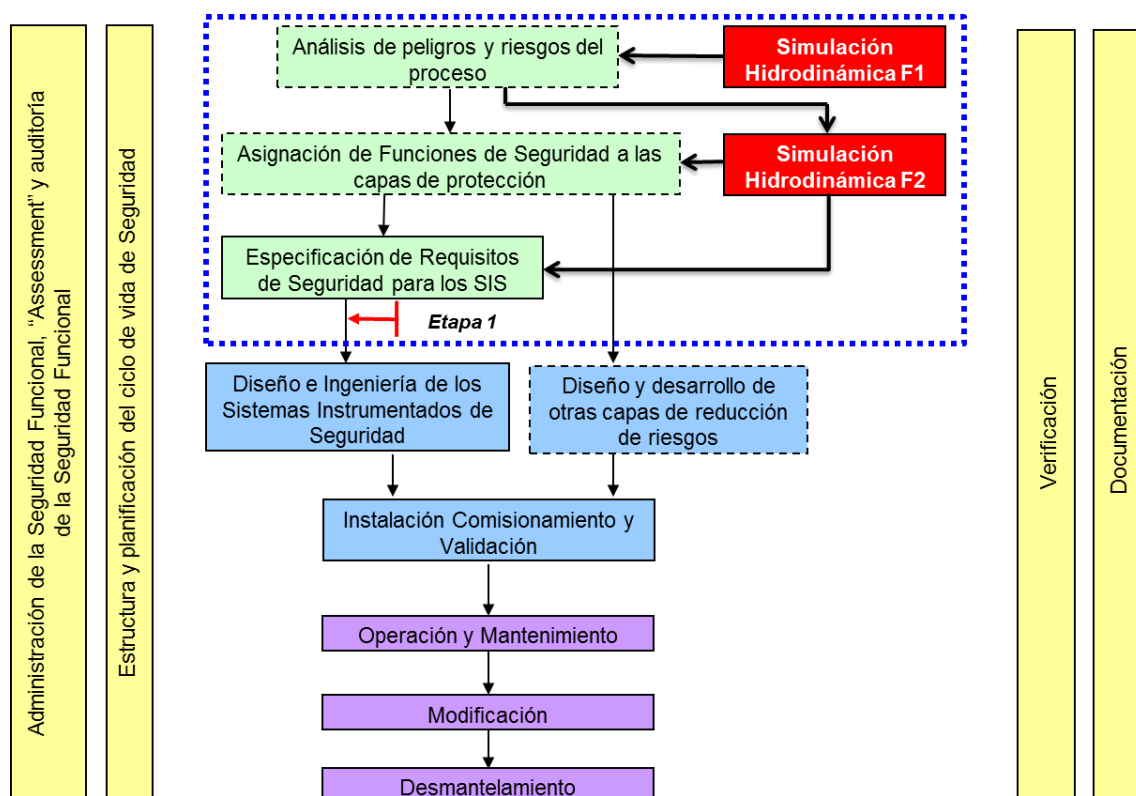


Figura 9. Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional en Ductos que incorpora las fases de simulación hidrodinámica (en rojo)

3.3 Aplicación de las Técnicas del HAZOP + LOPA

Para cumplir con el objetivo del análisis de riesgos para un sistema de transporte por ducto la metodología propone utilizar la técnica de HAZOP para identificar los peligros propios del proceso de transporte, evaluar los riesgos e identificar problemas operativos que se pudieran suscitar. Para determinar las capas de protección que pudieran resultar necesarias para llevar los riesgos identificados a los valores aceptables definidos para un proyecto en particular, se utiliza el análisis de las capas de protección LOPA.

La metodología de análisis consiste en realizar un estudio HAZOP, para determinar los escenarios de riesgo y evaluar su magnitud, y en aplicar a continuación (en la misma sesión) el análisis LOPA optimizando así el desempeño del equipo de análisis.

Asimismo, a los efectos de ayudarnos a la identificación de escenarios peligrosos en ductos es necesario contar con los estudios hidrodinámicos y efectuar las simulaciones de transitorios, tantas como se consideren necesarias, para identificar peligros y eventos que puedan comprometer la integridad del ducto (como por ejemplo el cierre no deseado de cada válvula de bloqueo de línea).

3.3.1 Técnica del HAZOP

Es una técnica que permite identificar peligros en un proceso e identificar deficiencias en el diseño que puedan dar lugar a problemas de operatividad. La técnica de HAZOP se basa en el análisis de desviaciones de las variables del proceso respecto de su intención de diseño, por lo que esta metodología seleccionada, es apta para identificar peligros y problemas operativos que puedan afectar al proceso de transporte y su operación poniendo en riesgo la integridad de las personas, el medio ambiente y las instalaciones. La técnica considera todas las variables involucradas en el proceso (flujo, presión, temperatura, nivel, etc.).

La idea central consiste en investigar sistemáticamente cómo un proceso puede desviarse de su intención de diseño, para determinar los peligros y riesgos que pueden derivarse de estas desviaciones.

Se procede a “identificar riesgos que podrían interferir en la operación eficiente de un proceso, estimulando la imaginación de un equipo multidisciplinario en una forma sistemática” [3][4].

Esta investigación se realiza mediante un ejercicio sistemático estructurado de diálogo y debate grupal, realizado por un equipo de trabajo conformado idealmente por no menos de cinco (5) y no más de diez (10) personas, con la colaboración de un “facilitador” y un secretario, integrado de manera que estén representados los sectores participantes de un Análisis de Riesgos y en sesiones de trabajo de no más de seis (6) horas efectivas de duración. Debido a la naturaleza de la tarea, se programan descansos apropiados para la distensión y el debate, lo que lleva a un total de ocho (8) horas de trabajo por día.

El sistema de análisis requiere que las instalaciones objeto del estudio sean divididas en segmentos o nodos los cuales deben ser analizados uno por uno con la ayuda de las simulaciones hidrodinámicas.

La descripción particular de cada “Nodo”, sus características y alcance, la “Intención de diseño” y sus valores establecidos en la ingeniería, constituyen lo que se ha dado en denominar “Hojas de Guía”, una para cada Nodo/Segmento.

Cada “Hoja de Guía” contiene las “Desviaciones” que serán los “estimulantes de la imaginación” para el equipo de análisis. Cada “Desviación” es la combinación de una “Palabra Guía” y un “Parámetro o Variable” significativa, incluida en la descripción de la intención de diseño del segmento.

El objetivo básico de HAZOP es la conformación de un escenario de pérdidas y daños que amenacen ya sea a las “Personas (Vida)”, o al “Medio Ambiente”, o a las “Instalaciones (Propiedad)”, o a la “Capacidad de Producción (Pérdida de beneficios)”, o a la Imagen de la empresa. Este objetivo básico se complementa con un cierto grado de evaluación de la “Probabilidad de las Causas” y la “Severidad de las Consecuencias”, lo que de hecho es una ayuda para determinar las prioridades y la importancia relativa de los cambios que el equipo pueda recomendar para eliminar las causas, o reducir las consecuencias, o proveer protección contra las mismas.

3.3.2 Técnica del análisis LOPA

Una vez definido el nivel de riesgo del evento peligroso analizado en el HAZOP, se estudia la documentación que acompaña al Análisis de Riesgos principalmente los DFP (Diagramas de Flujo del Proceso) y P&ID (Diagramas de Procesos e Instrumentación) en busca de capas de protección y/o salvaguardas, para prevenir o atenuar el evento peligroso; teniendo en cuenta, para cada peligro identificado documentando, la causa iniciadora. Se puede evaluar así, la cantidad total de reducción de riesgo provista por las capas de protección detectadas y la eventual necesidad de una mayor reducción de riesgo. Si se requiere una reducción de riesgo adicional, se deben definir las recomendaciones consensuadas por el grupo de análisis, con el objeto de minimizar el riesgo en la instalación, en caso de resultar éste alto, de acuerdo a la calificación de riesgos de la compañía.

A partir de los datos obtenidos en el estudio HAZOP se detalla cada uno de los peligros identificados documentando la causa inicial y las capas de protección que previenen o mitigan el peligro. La reducción de riesgo total puede ser determinada y se analiza la necesidad, o no, de una mayor reducción de riesgo.

Aquellos escenarios que presentan niveles de riesgo superiores, en al menos un orden de magnitud (10 veces), al nivel de riesgo considerado como aceptable por la compañía se generará la recomendación correspondiente con el área responsable que deberá tomar acción y realizar el seguimiento para atender a la recomendación. Si el grupo de trabajo lo considera necesario,

también pueden efectuar recomendaciones para los niveles de riesgos tolerables o aceptables, en pos de mantener controles sistemáticos y apuntar a un proceso de mejora continua.

Cada capa de protección independiente (IPL) tendrá un valor característico de reducción del riesgo. Siendo el riesgo la combinación de la frecuencia, o probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso, con la severidad de sus consecuencias, una IPL podrá actuar reduciendo la consecuencia o bien la frecuencia del evento. Cuando la acción de la IPL permite reducir la consecuencia de un evento peligroso, se habla del “factor de reducción de consecuencia” (FRC), mientras que cuando la acción de la IPL permite reducir la frecuencia del evento, se habla del “factor de reducción de frecuencia” (FRF).

En cada capa de protección identificada se asignará un FRF y/o FRC según corresponda, generando un estimado de reducción de riesgo numérico que la/las capa/s de protección aportan. Si se requiere un conocimiento más completo del riesgo, deben utilizarse técnicas cuantitativas más rigurosas, tal como análisis de árbol de fallas.

Este proceso de evaluación de IPL’s requiere de información sobre la frecuencia de los eventos iniciadores, las probabilidades de falla de las IPL’s y una evaluación matemática. El método requiere que el usuario defina los criterios de riesgo y datos estadísticos produciendo resultados objetivos.

Una IPL es un dispositivo, sistema o acción que es capaz de prevenir el desarrollo de un escenario hacia su consecuencia no deseada, independientemente del evento iniciador o de la acción de cualquiera otra de las capas de protección asociada a dicho escenario. La efectividad e independencia de una IPL debe ser auditable. Todas las IPL’s son salvaguardas, pero no todas las salvaguardas son IPL’s. Cada salvaguarda identificada para un escenario debe ser probada de manera tal que de conformidad a su definición.

Ejemplos de IPL:

- Función de control en el BPCS (reduce la frecuencia).
- Alarma con respuesta definida del operador (reduce la frecuencia).
- Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) (reduce la frecuencia).
- Dispositivo de alivio de presión (reduce la consecuencia).
- Sistema de contención de derrames (reduce la consecuencia).

3.3.3 Matriz de Valoración de Riesgos

El análisis de peligros y valoración de riesgos, así como la determinación de las necesarias capas de protección, requieren de la utilización de una matriz de referencia, en la cual el usuario establece una categorización de riesgos y las medias necesarias para reducir y eventualmente controlarlos, a fin de mantener una operación segura en el proceso de transporte.

Para los estudios se requiere de la utilización de la matriz de valoración de riesgos, en una versión cuantificada que, a modo de ejemplo, se muestra en la Figura 10. La matriz de referencia en esta propuesta metodológica fue extraída de la norma NRF-018-PEMEX-2007 [9] y el Procedimiento para realizar análisis de riesgos del proceso [8].

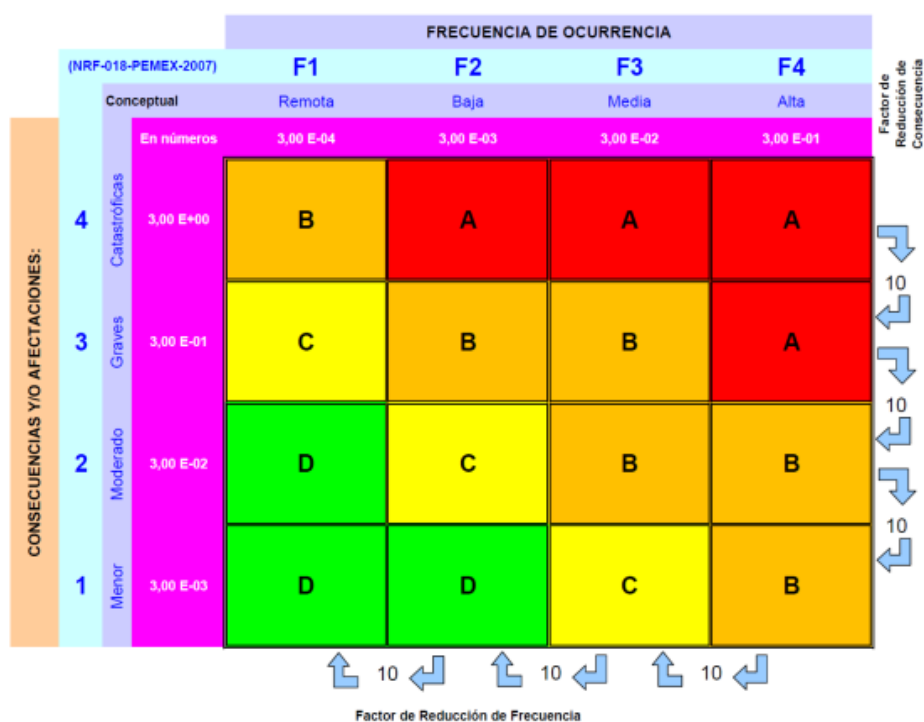


Figura 10. Matriz de Riesgos RAM en su versión cuantificada

3.3.4 Categorización del Riesgo

En la siguiente tabla se muestra la categorización de riesgo para la matriz tomada como ejemplo en el punto anterior [8][9].

Tabla 1. Categorización del Riesgo

RIESGO	Categoría de Riesgo		Respuesta Requerida
	A	Riesgo Intolerable	Reducción del riesgo obligatorio
	B	Riesgo Indeseable	Se debe demostrar y documentar ALARP
	C	Riesgo aceptable con Controles	Mantener controles sistemáticos y apuntar a un proceso de mejora continua
	D	Riesgo razonablemente aceptable	Mantener controles sistemáticos

3.3.5 Pasos básicos para la Evaluación del Riesgos y Análisis de Capas de Protección

Para cada evento peligroso identificado se analiza la frecuencia del evento iniciador y la severidad de las consecuencias con la ayuda de la Matriz calibrada de Riesgos. En ese proceso el grupo determina la categoría del riesgo para ese evento peligroso.

ANÁLISIS de SEVERIDAD y FRECUENCIA:

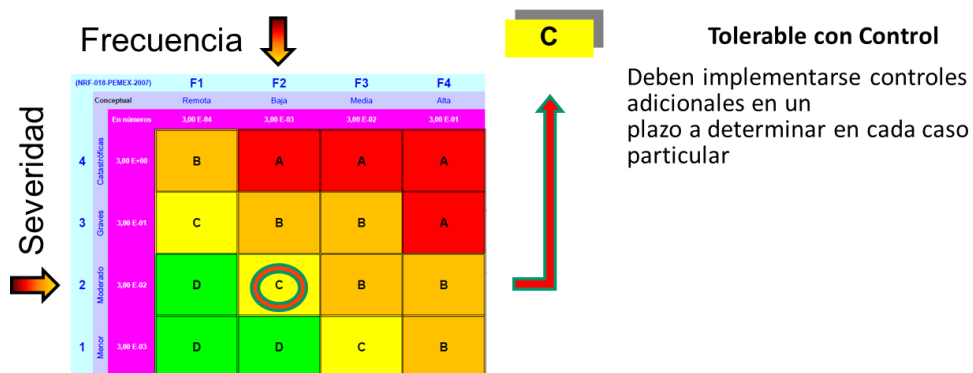


Figura 11. HAZOP – Determinación del riesgo inicial

Obtenido el riesgo inicial analizamos las capas de protección asignando a cada una el factor de reducción de riesgos (frecuencia y/o consecuencia) y evaluamos si se llega al riesgo aceptable.

ANÁLISIS de SEVERIDAD y FRECUENCIA:

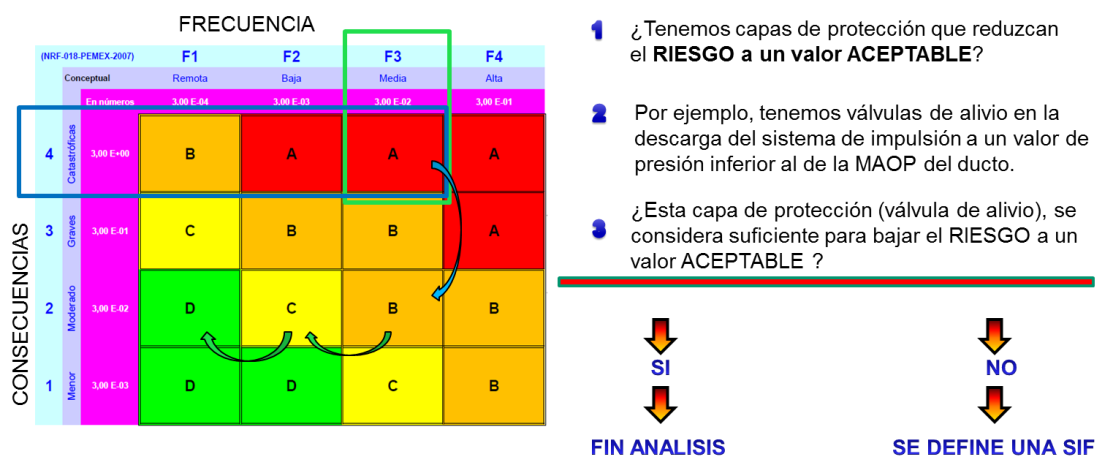


Figura 12. LOPA – Análisis de Capas de protección

3.4 Propuesta del Marco Metodológico

La metodología propuesta para el análisis de Seguridad Funcional del ducto incorpora una secuencia de tareas que incluye la modelación hidráulica e hidrodinámica y las actividades establecidas en el modelo de gestión de la norma IEC 61511-1 [11] en los capítulos:

- Capítulo 5, Administración de la Seguridad Funcional.
- Capítulo 6, Requisitos del Ciclo de Vida de Seguridad.
- Capítulo 7, Verificación.
- Capítulo 8, Análisis y evaluación de riesgos del proceso.
- Capítulo 9, Asignación de funciones de seguridad para capas de protección.
- Capítulo 10 y 12, Especificación de Requisitos de Seguridad (SRS) del SIS.

Debido a requisitos propios de la norma, las tareas a realizar comprenden la participación de profesionales expertos, especialistas en hidráulica, en seguridad funcional, en seguridad de procesos, con amplios conocimientos en las etapas del ciclo de vida de seguridad a desarrollar, especialmente en el:

- Análisis de peligros, Valoración riesgos (técnicas HAZOP, HAZID y otras).
- Asignación de funciones de seguridad a capas de protección (método LOPA).
- Desarrollo de Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS).

Las actividades que supone la realización de un ESFD (Estudio de Seguridad Funcional en Ductos) se resumen en el siguiente esquema.

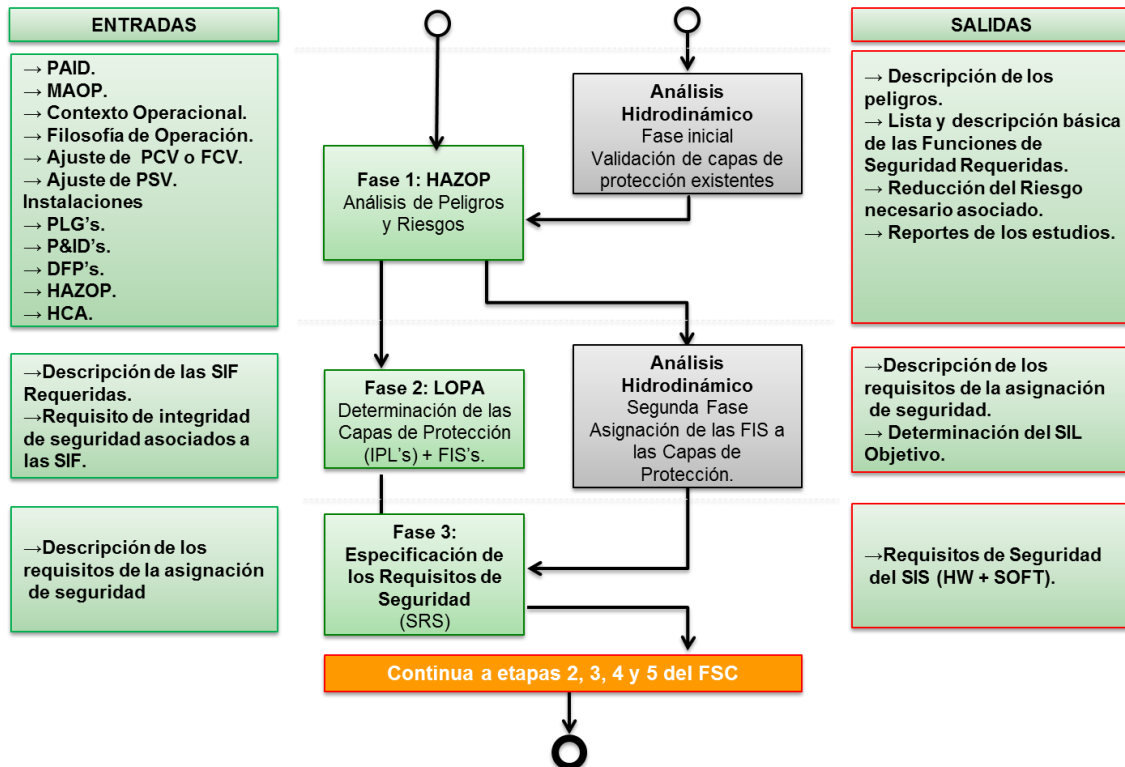


Figura 13. Las tres primeras Fases del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional aplicada a ductos

Cada una de las tareas que propone la metodología se describe a continuación.

3.4.1 Recopilación y Consolidación de la Documentación

Esta tarea se refiere a la recopilación y análisis de toda la documentación disponible, para la realización de los estudios. Es usual, en esta instancia, generar un “Informe de situación actual” que se analizará en una reunión con el grupo del proyecto de Seguridad Funcional para definir el programa de actividades a desarrollar en adelante.

Adicionalmente se esboza la conceptualización preliminar de los aspectos relevantes a considerar en el análisis hidrodinámico sin perder de vista los requerimientos particulares del sistema de transporte por ductos que se pretende analizar. Esta etapa también incluye la conceptualización de las distintas fases del Ciclo de vida de la Seguridad Funcional para el sistema bajo estudio.

3.4.2 Configuración Preliminar del Modelo de Simulación

En base a la información y la conceptualización consolidadas en el punto anterior se configura el modelo de simulación, incluyendo las lógicas de control y de operación definidas para el sistema de transporte.

Este primer modelo sirve de base para debatir la formulación y ajustes de los escenarios de operación a evaluar, para el régimen estacionario y transitorio, de acuerdo a lo que se indica en la documentación del sistema de transporte. Se puede incorporar, además, escenarios que a

juicio del grupo que participa en el proyecto de Seguridad Funcional del ducto estimen conveniente agregar para su evaluación.

3.4.3 Primer taller de trabajo

Es altamente recomendable verificar y validar en sitio la documentación procesada en el punto anterior y se releva las instalaciones que sean necesarias para formular el proyecto dentro de los alcances establecidos.

Normalmente esta tarea incluye verificar y releva los faltantes de información de las instalaciones que puedan afectar a la capacidad de transporte, la seguridad y la operación, incluyendo la descripción de los equipos principales y su condición operativa. En particular, se recomienda efectuar el relevamiento de las lógicas de control planificadas y/o existentes y las que se encuentren previstas para la seguridad de la impulsión, del ducto propiamente dicho y de las instalaciones complementarias.

El Primer Taller de Trabajo efectúa con ingenieros, técnicos y operadores del sistema de transporte para validar la información, acordar criterios e hipótesis del estudio a realizar y revisar la modelación preliminar descripta en el punto anterior.

Se discuten, además, los criterios que permiten identificar eventos críticos, por ejemplo, aquellos que puedan dar lugar a posibles cierres espurios (no programados) de válvulas de bloqueo y/o arranques en directa del sistema de impulsión.

Además, se suele definir el alcance del análisis de roturas y fugas a realizar que sirven, por ejemplo, para la selección de los sistemas de detección de fugas.

3.4.4 Modelación Hidrodinámica Definitiva, Validación de las Estrategias de Control y Protección y Preparación de la Documentación de Entrada para HAZOP + LOPA

En esta tarea se realizan todas las modelaciones adicionales que resulten necesarias de acuerdo a lo que se definió en el Primer Taller.

Si resultara necesario, se completa la modelación del régimen permanente para el rango completo de operación de los equipos principales (bombas, válvulas reguladoras, etc.) y se verifica las capacidades de transporte máximas y mínimas del sistema, incorporando las posibles restricciones.

Se efectúa la modelación del régimen transitorio de todos los casos especificados y los casos adicionales que surjan del Primer Taller. Esto normalmente incluye a las estrategias de control automático (lazos PID), la evaluación del impacto de los paros y puestas en marcha, y la verificación de los dispositivos de seguridad ante transitorios críticos.

En base a los resultados de este análisis se elabora un documento que resume los resultados de las simulaciones y las conclusiones del análisis efectuado.

Además ésta tarea normalmente incluye un procesamiento y entrega de los resultados de modelaciones de fugas y roturas que sirven de base para los oferentes de Sistemas de Detección de Fugas, con la finalidad de emular la generación de las alarmas correspondientes.

El documento con los resultados de las simulaciones sirve de “Entrada” para el Análisis de Riesgo y evaluación de capas de protección (HAZOP + LOPA).

3.4.5 Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos de Origen Operativo (HAZOP).

Para la aplicación de la técnica del HAZOP puede utilizarse como referencia la norma IEC 61882 [3], y dentro del marco normativo establecido por IEC-61511 Capítulo 8, (tarea correspondiente a la Fase 1 del ciclo de vida de la Seguridad Funcional).

Este estudio será adecuadamente soportado por los resultados de la modelación y de las simulaciones hidrodinámicas. Pueden considerarse las siguientes tareas para el desarrollo de esta actividad:

Preparación del estudio HAZOP

Consistente en:

- Ordenar toda la documentación necesaria para el estudio HAZOP, de acuerdo con los riesgos asociados a la naturaleza misma del/los fluido/s transportados, a los distintos escenarios de la operación (flujo, presión, temperatura, nivel, etc.) y a la magnitud de estos inventarios.
- Preparar y precargar las planillas de software para el desarrollo del taller HAZOP, definiendo los posibles nodos, modos de operación, desviaciones, etc., que deberán ser consensuados con el equipo multidisciplinario del proyecto.
- Disponer del informe de resultados de la modelación hidrodinámica definitiva y validación de las estrategias de control y protección del sistema de transporte.

Taller de Estudio HAZOP

Este ítem se refiere a tareas a ser realizadas en una sala de reuniones con un grupo multidisciplinario, e implica el Análisis de Riesgos de Procesos y Operabilidad (HAZOP) del ducto, de acuerdo con la norma IEC 61882, y dentro del marco normativo establecido por IEC-61511 Capítulo 8, (tarea correspondiente a la Fase 1 del ciclo de vida de la Seguridad Funcional):

- Revisión de las tareas a desarrollar.
- Presentación por parte del líder y moderador del grupo, en forma de cursillo rápido, acerca de la metodología HAZOP.
- Realización de las sesiones de análisis HAZOP, para la identificación de peligros relacionados directamente al proceso transporte realizando la valoración de riesgos de procesos y operatividad del ducto.
- Se debe contar en el taller con el apoyo de una computadora con el modelo simulado del ducto y un especialista en modelación hidrodinámica para simular “en línea” los eventos críticos que surjan de la aplicación sistemática de la metodología para la identificación de peligros.
- Determinación de todos los medios posibles para la reducción de riesgos, salvaguardas y capas de protección (a nivel reducción de la “frecuencia” y de las “consecuencias”). En los escenarios operativos que así lo requirieran, y se identificará la necesidad de utilizar funciones instrumentadas de seguridad.
- Identificar las protecciones para garantizar la integridad del ducto frente a desvíos críticos de las variables de proceso (por ejemplo la presión).
- Identificar posibles escenarios que permitan mejoras operativas y de confiabilidad en el transporte del fluido.
- Registro de salvaguardas, capas de protección, funciones instrumentadas de seguridad, comentarios, recomendaciones y responsables para cada uno de los escenarios, destacando especialmente aquéllos que indicaren un nivel de riesgo no aceptable.

El “Estudio HAZOP” elaborado como resultado del taller, está constituido por todas las planillas de análisis que se completan con los registros durante el taller, y además cuentan con el aval y firma de cada uno de los integrantes del grupo.

Se elabora adicionalmente el “Listado de SIF identificadas en el HAZOP” y contiene el listado de todas las SIF que deberán ser evaluadas en el posterior estudio LOPA.

Elaboración del Informe del Estudio de Riesgos

Este ítem se refiere a la preparación y emisión del “Informe del Análisis de Riesgo HAZOP”, que incluye como Anexo al “Estudio HAZOP” y contiene (entre otros) los listados completos de todas las recomendaciones y SIF que fueron determinadas durante el desarrollo de las sesiones del taller

3.4.6 Análisis de Capas de Protección (LOPA) – Determinación del SIL objetivo.

Para la aplicación de la técnica del LOPA puede utilizarse como referencia la norma IEC 61511-3 [13], y dentro del marco normativo establecido por IEC-61511 Capítulo 9, (tarea correspondiente a la Fase 2 del ciclo de vida de la Seguridad Funcional).

Este estudio será adecuadamente soportado por los resultados de la modelación y de las simulaciones hidrodinámicas. Pueden considerarse las siguientes tareas para el desarrollo de esta actividad.

Consistente en:

- Ordenar toda la documentación generada en el HAZOP y la documentación necesaria para la realización de la Asignación de Funciones de Seguridad a las Capas de Protección Independientes y determinación del Nivel SIL objetivo.
- Preparar y precargar la herramienta de análisis para el desarrollo del taller “LOPA” (Layer of Protection Analysis) (de acuerdo a la Norma IEC 61511: parte 3), definiendo su vinculación con el estudio HAZOP (que luego serán consensuados con el grupo de análisis).

Taller del estudio LOPA + SIL

Este ítem se refiere a tareas a ser realizadas con el grupo de análisis, en una sala de reuniones, donde se procede a:

- Identificar para cada uno de los escenarios que indicaren un nivel de riesgo no aceptable (proveniente del HAZOP), las salvaguardas y capas de protección necesarias para reducir y/o mitigar el riesgo.
- Se debe contar en el taller con el apoyo de una computadora con el modelo simulado del ducto y un especialista en modelación hidrodinámica para validar a través de simulaciones las capas de protección identificadas y/o propuestas por el grupo de análisis.
- Asignar, a cada uno de los escenarios que indicaren un nivel de riesgo no aceptable, las capas independientes de protección necesarias.
- Determinar cuáles de esas capas independientes deberán ser Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) y asignar, a cada una de ellas, el nivel de integridad (SIL) y el factor de reducción de riesgo (FRR) necesario, usando el método LOPA.
- Formular soluciones para el control de los derrames de sustancias peligrosas en caso de rupturas de ductos.
- Registrar los comentarios, recomendaciones y responsables para cada uno de los escenarios que indicaren un nivel de riesgo no aceptable.

El “Estudio LOPA” estará constituido por las hojas de análisis desarrolladas en el taller.

El estudio LOPA podrá hacerse en conjunto con el estudio HAZOP en una misma sesión de trabajo.

Desarrollo del Informe de análisis LOPA – Determinación SIL

Este ítem se refiere a Preparación y emisión del “Informe de Evaluación SIL”, que incluirá como Anexo el “Estudio LOPA”, y contendrá el listado completo de todas las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF), que hayan sido determinadas durante el desarrollo del estudio LOPA, así como sus correspondientes niveles SIL objetivo y Factores de Reducción de Riesgo.

3.4.7 Especificación de Requisitos de Seguridad

Para la Especificación de Requisitos de Seguridad se debe tener en cuenta el marco normativo establecido por IEC-61511 Capítulo 10, (tarea correspondiente a la Fase 3 del ciclo de vida de la Seguridad Funcional). Esta tarea contempla las siguientes actividades:

- Preparar y precargar las planillas de Hojas de Datos SIF para el desarrollo del taller SRS, definiendo los parámetros de cada SIF, los cuales serán analizados con el grupo de análisis durante el desarrollo del taller.
- Realizar el Taller SRS, para la especificación de todos los requerimientos de seguridad de cada función de seguridad resultante de los estudios anteriores (talleres HAZOP + LOPA y estudio de simulación hidrodinámica), así como de los SIS destinados a ejecutarlas.
- Las “Hojas de Datos SIF” completadas durante el taller con el grupo multidisciplinario serán de vital importancia para la posterior elaboración de las especificaciones de requerimientos de seguridad, tanto a nivel de hardware como del software (incluyendo el análisis de todos los modos posibles de operación y mantenimiento para cada SIF).

Como resultado de estas tareas se elabora el documento “Especificaciones de Requisitos de Seguridad” que incluyen como Anexo a las “hojas de datos SIF”.

3.5 Casos de Estudio

3.5.1 Sistema de transporte Crudo Maya (PEMEX, México) – Capas de protección para control de sobrepresiones

Los objetivos del análisis han sido:

- Identificar las protecciones para garantizar la integridad del ducto frente a desvíos críticos de las variables de proceso (presión).
- Identificar posibles escenarios que permitan mejoras operativas y de confiabilidad en el transporte de hidrocarburos.
- Evaluar las capas de protección existentes y proponer capas de protección adicionales (p. ej.: Funciones Instrumentadas de Seguridad “SIF”) para alcanzar el objetivo de acotar el riesgo al nivel aceptable por PEMEX.
- Formular soluciones para el control de los derrames de hidrocarburos en caso de rupturas de ductos.

Descripción del Sistema Crudo Maya:

El sistema de Crudo Maya incluye a las líneas que unen a la Terminal Marítima Dos Bocas en el Golfo de México (TMDDB) con el nudo Paloma a través del cual se distribuye prácticamente el 60% de los crudos mexicanos producidos en el Golfo de México y zonas aledañas.

El sistema de Crudo Maya se compone de: 8 líneas de ductos de 36” y 48” de diámetro con una longitud total de 256 kilómetros e incluye 20 válvulas de bloqueo de línea. A continuación se muestra el esquema de la línea del caso de estudio.

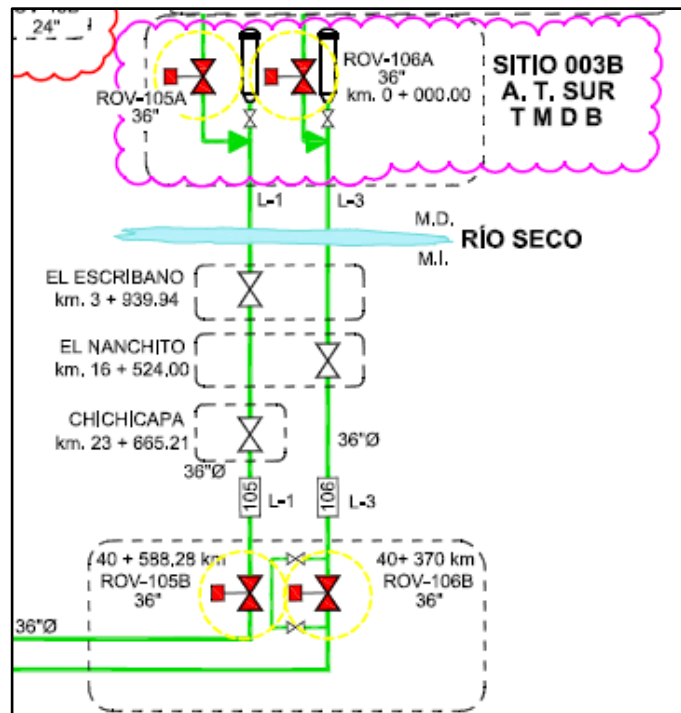


Figura 14. Ubicación de la línea L-1 del caso analizado (Sistema Crudo Maya)

Capas de Protección Evaluadas

Protecciones existentes:

- Nivel 0 - Presiones de Diseño / MAOP.
- Nivel 1 - BPCS: Válvulas de Control (recirculación).
- Nivel 2 - PSV: Válvulas de alivio en descarga de bombas.
- Nivel 3 - HPSD: Switch de paro por alta presión de descarga de bombas.

Capas de Protecciones propuestas:

- Nivel 4 - ICSDVB: SIF basada en la detección de inicio de cierre de válvulas.
- Nivel 5 - HPSDVB: SIF por detección de alta presión aguas arriba de las ROV.
- Nivel 6 - DPSDVB: SIF por detección de diferencial de presión de las ROV.

Resultado de Sobrepressiones del Sistema de Crudo Maya

CUADRON N° VI - 1: RESULTADOS DE CADA BLOQUEO, ANALIZADOS SOBRE LA LÍNEA 105 (L - 1) ENTRE TMDB Y LA AT EL MISTERIO.								
VÁLVULA QUE CIERRA	ESCENARIO OPERATIVO	PROTECCIÓN EVALUADA		PRESIONES MÁXIMAS EN EL PUNTO CRÍTICO DEL DUCTO				
		NIVEL	NOMBRE	PROGRESIVA DEL PUNTO CRÍTICO DE COMPARACIÓN CON LA PRESIÓN DE DISEÑO (m)	PRESIÓN ALCANZADA EN EL PUNTO CRÍTICO (kg/cm²)	PRESIÓN DE REFERENCIA (kg/cm²)	% DE SOBREPASO	CONDICIÓN DE SOBREPASO DE LA TOLERANCIA ADMITIDA DEL 10% DE LA PMPO
VÁLVULA EN LA TRINIDAD ROV-105B	4 MÁX. FLUJO EN TRAMO MIST - CCCP Presión en TMDB: 45 kg/cm²	0	SIN PROT	36007	54,6	47,0	16,2%	Se supera el 10% de la PMPO
		1	SDMC	36007	54,5	47,0	15,9%	Se supera el 10% de la PMPO
		2	PSV	36007	54,5	47,0	16,0%	Se supera el 10% de la PMPO
		3	HPSD	36007	54,5	47,0	15,9%	Se supera el 10% de la PMPO
		4a	ICSDVB-a	1181,7	45,5	47,0	-3,1%	No se supera la PMPO
		4b	ICSDVB-b	1181,7	45,5	47,0	-3,1%	No se supera la PMPO
		5	HPSDVB	36007	51,9	47,0	10,4%	Se supera el 10% de la PMPO
		6	DPSDVB	36007	51,6	47,0	9,7%	No se supera 10% de la PMPO

Figura 15. Resultados del bloqueo de la línea L-1 por el cierre de la válvula ROB – 105B

Hoja de registros HAZOP para sobrepresiones en el Sistema de Crudo Maya

HAZOP+LOPA Hoja No.		N1-Ss1-E8		[Nodo - Subsistema - Escenario: N(##)-Ss(##)-E(##)]				Nodo #:		1					
Subsistema:		Tramo #1, Línea 105 (L-1) desde TMDB a Sitio 025 (A.T. El Misterio)						Modos de Operación:		Escenario 8 - E8					
Documentos de referencia		A-100 EFP Aceite Maya Rev2 (EFP), SMT-PEP-SYL-CRD-000 (PLG), B1-426-333-K-028 (ISO), E-001-022_Rev.0 (PLG), A-401-022_Rev.2 (DTI), A-402-022_Rev.2 (DTI), E-001-025_Rev.0 (PLG), A-401-025_Rev.2 (DTI).						Palabras Guías + Parámetros:		Ver hoja de Desviación Nodos					
Intención de Diseño:		Transportar crudo MAYA por la línea 105 (L-1) (en paralelo con la línea 106 (L-3)), desde la TMDB hasta el Sitio 025 A.T. El Misterio, operando con máxima eficiencia y Seguridad, minimizando, además, el impacto de una posible pérdida de contención en el ducto.						Palabras Guías:		Ver hoja de Desviación Nodos					
HAZOP															
IDENTIFICACIÓN		EVENTO PELIGROSO						FRECUENCIA		CONSECUENCIAS				Riesgo INICIAL	
Nodo #	Evento Peligroso #	Palabra Guía + Parámetro	Valores de operación Normal	Desviación	Consecuencia/s (Impact event description)	Causa/s	Valor [1/año]	Rango	AP	AA	AN	AI	Nivel Riesgo inicial	FRR Requerido	
1	1	Mas Presión	45 Kg/cm2 - en línea 105 (L-1), con línea 106 (L-3) Cerrada al inicio	Más presión por arriba de la PMPO+10% en el Tramo #1, Línea 105 (L-1) del sistema de Crudo Maya	Presión no admisible en línea 105 (L-1) (de acuerdo a Simulación), con probabilidad de Rotura del ducto con derrame, con nube de vapor tóxica o asfianste con alectación a las personas, al medio ambiente por potencial incendio, con daño a las instalaciones e impacto al negocio.	Bloqueo espurio de: la ROV 105B (AT La Trinidad)	5,4E-03	F2	3	4	1	3	A	181	

Figura 16. Riesgo inicial por el bloqueo de la línea L-1 por el cierre de la válvula ROB – 105B

Resultado del LOPA para la reducción del riesgo al nivel aceptable

LOPA										GESTIÓN	
FREC MITIGADA			REDUCCION POR SIF				RIESGO FINAL				COMENTARIOS / RECOMENDACIONES
Frec. Mitigada	Nivel Riesgo	FRR Requer	IPL-5 SIF 1	FRF-3	IPL-6	FRF-4	Frec. Final	Consec. Final	Nivel Riesgo	FRR Requer	Recomendaciones
F2	A	181	ICROVB: Detección de inicio de cierre espurio de la ROV-105B, con el envío de Alarma de "Detección de cierre espurio" a la TMDB	185		1	F1	4	B	1	1. Implementar la FIS-ROV-105B-2, que al detectar el inicio de cierre espurio de la válvula ROV-105B, envíe a la TMDB la Alarma de "Detección de cierre espurio". 2. Implementar la FIS-ROV-105B-3, Detección de Diferencial de presión en la ROV-105B, envíe a la TMDB la Alarma de "Detección de cierre espurio". 3. Implementar la FIS-CB-105B-2/3, que al detectar Alarma de "Detección de cierre espurio", iniciar la secuencia de paro de la CB4T. 3. Gestionar la implementación las FIS y capas de protección que se han definido para este escenario, ante GTDH SUR y RMSO. 4. Gestionar ante la GTDH SUR la realización, de un análisis de riesgo (Hazop+Lopa) para la línea 105, en cada una de las 8 zonas de alta consecuencia, tomando como base el estudio PAID del tramo 1.

Figura 17. Reducción de riesgo por SIF para alcanzar el riesgo final aceptable para el caso del bloqueo de la línea L-1 por el cierre de la válvula ROB – 105B

Conclusiones del Análisis del Sistema de Crudo Maya

De acuerdo a los resultados de los Estudios de Seguridad Funcional en Ductos del Sistema de Crudo Maya, se llega a la conclusión de que existen tres (3) alternativas de operar en forma segura para el caso de la línea L-1:

- No superar una presión de 38 Kg/cm² a la descarga de la Casa de Bombas 4T.
- Reparar y/o reemplazar la tubería correspondiente a la línea 105 (L-1).
- Implementar Funciones Instrumentadas de Seguridad dentro del proyecto SCADA.

3.5.2 Emisario Planta Nueva Aldea (ARAUCO, Chile) – Capas de protección para control de derrames

Tareas realizadas:

- Análisis Hidráulico - Hidrodinámico, Estrategias de Control y Protecciones.
- Análisis de Riesgos (HAZOP) y Evaluación de Capas de Protección (LOPA).
- Formulación de Lógicas de Control y Seguridad surgidas en el Estudio.

Esquema básico del Sistema

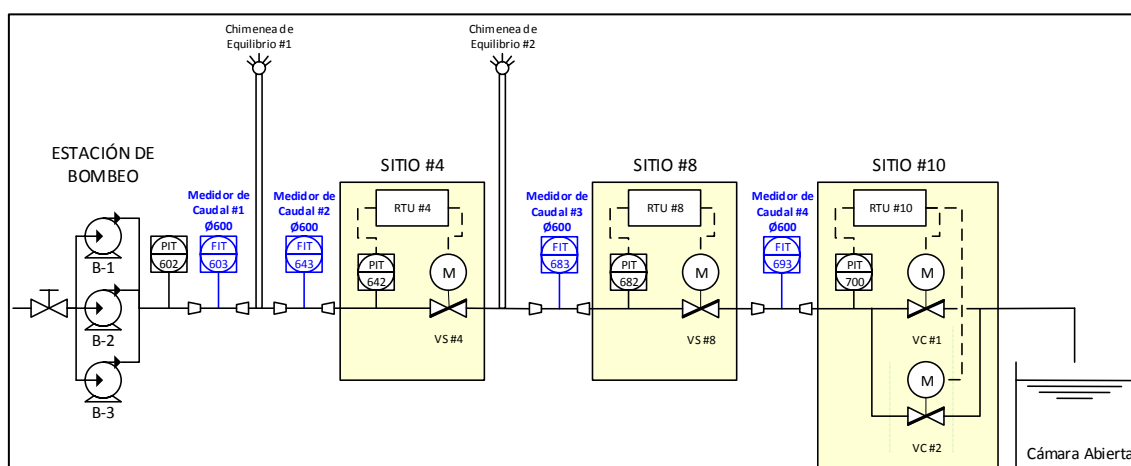


Figura 18. Esquema básico del Emisario Planta Nueva Aldea

Resultados del Análisis Hidrodinámico

- Las estrategias de control de derrames incluirán paros de las bombas, desactivando el modo automático de las válvulas de control (PCV - 700A).
- Los cierres de las válvulas de sectorización V – 610 a V – 650 originan derrames en la chimenea de equilibrio #1, sino paran las bombas.
- Los cierres de las válvulas de sectorización aguas abajo de la chimenea de equilibrio #2 originan derrames en esta chimenea. Se diseñó una estrategia que evite este derrame.
- En la mayoría de los casos de roturas, la estrategia de seccionamiento del Emisario, cerrando las válvulas de sectorización, es la que asegura una mayor reducción del volumen de fluido derramado en caso de fugas o roturas.

Con la metodología descrita en el punto 3.1.2 se determinaron los volúmenes de derrames máximos esperables para cada estrategia de control. A modo de ejemplo se muestra el caso de la simulación de derrames por una rotura de 120 mm.

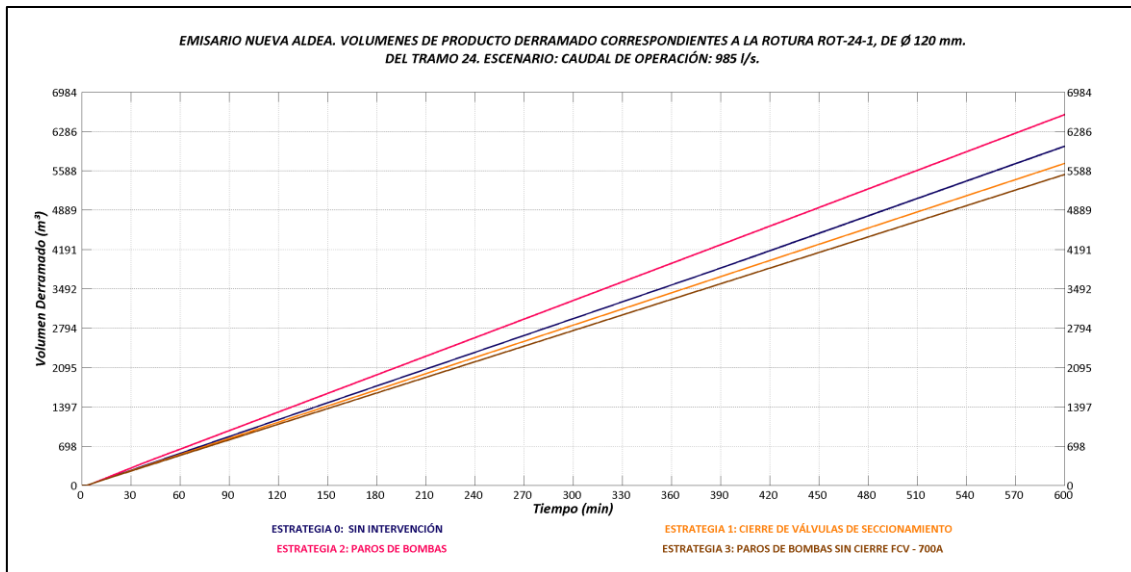


Figura 19. Evolución del volumen derramado para una rotura de 120 mm. (Rot-24-1)

Los volúmenes máximos de derrame han sido incorporados en el análisis de riesgos para la cuantificación de su impacto (severidad de las consecuencias).

Conclusiones del Análisis del Sistema Emisario Planta Nueva Aldea

- Para los casos de Fugas Pequeñas, el Nivel de Riesgo con la Consecuencia y Frecuencia Mitigadas resultó en un valor ligeramente mayor al Nivel de Riesgo aceptable por ARAUCO. Se recomendó la implementación de otras capas de protección para alcanzar el Nivel de Riesgo aceptable.
- Se recomendó implementar técnicas adicionales de detección de pequeñas fugas, a ser incorporadas en el Sistema DCS – SCADA, que permita al operador confirmar y/o tomar decisiones ante una alarma de detección de fuga (SDF).
- Para las Fugas Medias y Roturas el Nivel de Riesgo resultó ser mayor al Nivel de Riesgo aceptable por ARAUCO. Se recomendó implementar un Sistema Automático de Seccionamiento del Emisario (SSA).

4 Conclusiones

Los casos presentados, basados en la metodología propuesta para el diseño de las protecciones por sobrepresiones y estrategias para control de derrames muestran la factibilidad de incorporar los conceptos de la Seguridad Funcional aplicada a ductos a los fines de formular las soluciones más convenientes.

La metodología propuesta permite obtener resultados consistentes con las respuestas reales de los ductos ante los eventos transitorios asociados a los factores de riesgo que se desean mitigar.

Sobre esta base se pueden formular protecciones basadas en Sistemas Instrumentados de Seguridad que tengan el nivel de integridad de la seguridad necesario (con su factor de reducción de riesgo) para poder operar en forma segura.

El desarrollo futuro debe incluir diseño de éstos sistemas en base al monitoreo de cambio de variables de proceso acorde con los eventos que se desean contrarrestar (sobrepresiones y derrames). Para ello la modelación hidrodinámica es una herramienta indispensable y la gestión de la Seguridad Funcional garantiza el nivel de seguridad en el tiempo.

5 Nomenclatura y Bibliografía

5.1 Definiciones:

Capa de protección: Un dispositivo, sistema o acción que, cuando funciona, impide que el escenario evolucione hacia las consecuencias no deseadas. Una capa de protección se denomina también salvaguarda o medida de reducción de riesgo.

Capa Independiente de Protección (IPL): Una capa de protección cuya actuación no está condicionada por el suceso iniciador o con la acción de ninguna otra capa de protección asociada al escenario. Para ser independientes, las capas deben cumplir ciertos requisitos: Especificidad, Independencia, Confiabilidad, Auditabilidad. A cada IPL se les asigna un factor de reducción de riesgo. Todas las IPL son salvaguardas, pero no todas las salvaguardas son IPLs (ver Salvaguarda).

Categorías de Consecuencia: Consecuencia es el resultado final de una o múltiples desviaciones. El resultado o la severidad de las consecuencias se categorizan en cuatro niveles (desde “Menores” hasta “Catastróficas”). Cuando se establece una consecuencia, las desviaciones y los sistemas que se presume han fallado deben ser especificados claramente. Por ejemplo, la seguridad de las personas.

Causa: Razón por la cual una desviación podría ocurrir.

Consecuencia: Es el resultado (en general no deseado) de un escenario. Las consecuencias se expresan en términos de daños personales, económicos, medio ambientales, materiales o de pérdidas de producción y de la imagen de la empresa.

Desviación: Desplazamiento de las condiciones de operación de la intención de diseño. Cambio de estado más allá de ciertos límites o condiciones. Incluye cualquier cambio físico, tal como: presión diferencial o absoluta, temperatura, fase, nivel, estado operativo, condición de energía, concentración o indicación de falla de control.

Frecuencia: Número de ocurrencias por unidad de tiempo.

Intención de Diseño: Define cómo se espera que el segmento opere.

Mitigación: Reducción de riesgo mediante medidas destinadas a reducir las consecuencias una vez ha ocurrido el incidente (Ej. pérdida de contención). Medidas de mitigación: sistemas de detección y/o extinción de fuego y gas, alarmas, Equipo de Protección Personal, piletas y diques, planes de emergencia, extintores de fuego, brigada de bomberos, etc.

Nivel de Riesgo: Es el resultado del producto de una categoría de consecuencia y una categoría de frecuencia en base a una matriz simple frecuencia / consecuencia.

Nodo: Parte o Sección a ser revisada en detalle

Palabra Guía: Sugiere una modificación simulada de un parámetro.

Parámetros: Magnitudes, funciones, componentes, incluidos en la descripción de la intención.

Peligros: Consecuencias que generan daño, lesiones o pérdidas.

Prevención: Reducción de riesgo mediante medidas destinadas a reducir la probabilidad la causa básica o los eventos condicionantes. Medidas de prevención: Buenas prácticas de diseño de procesos, BPCS, SIS, sistemas de alivio de presión, alarmas, etc.

Probabilidad: Existen razones para creer que sucederá. Cuantificación de la posibilidad de ocurrencia de un suceso o de una secuencia de acontecimientos durante un intervalo de tiempo, o posibilidad de éxito o fracaso de una actuación bajo demanda. La probabilidad se expresa adimensionalmente y comprendida entre 0 y 1.

Riesgo: Una medida de la probabilidad de que se materialicen las pérdidas económicas, daños a seres humanos o medioambientales en términos de frecuencia y magnitud de la pérdidas o

daños. Se suele expresar como el producto entre la magnitud y la probabilidad de las consecuencias del escenario.

Salvaguardas: Provisiones para el control de los riesgos existentes. No son capas de protección, por lo cual no se les asigna un factor de reducción de riesgo (ver Capa Independiente de Protección).

Suceso: Cualquier evento relevante para que se produzca un escenario. En un estudio de riesgo un suceso puede referirse a todo el escenario de accidente (desde su inicio hasta sus consecuencias finales).

Suceso iniciador: El evento que actúa como punto de partida del escenario y que da lugar a las consecuencias indeseadas. No confundir con las causas o sucesos básicos. Se pueden distinguir tres tipos de sucesos iniciadores: Eventos externos, Fallos en equipos y Fallos humanos o acciones inapropiadas.

5.2 Abreviaturas

- BPCS Del inglés “Basic Process Control System”. Sistema básico de Control de Procesos.
- FRC Factor de Reducción de riesgo de Consecuencia.
- FRF Factor de Reducción de riesgo de Frecuencia.
- HAZID Del inglés “Hazard Identification Study”. Método o técnica que permite identificar peligros y evaluar los riesgos sobre la base de una lista, enfocados a los potenciales peligros relacionados al ambiente, geográficos, del entorno, de incendio y/o explosión, de salud, etc.
- HAZOP Del inglés “Hazard and Operability Study”. Es una técnica que permite identificar peligros en el proceso e identificar deficiencias en el diseño que pueda dar lugar a problemas de operatividad.
- HCA Del inglés “High Consequence Area”. Área de Alta Consecuencia.
- IEC Del inglés “International Electro-technical Commission”, la comisión internacional electrónica que elabora y publica las normas internacionales eléctricas, electrónicas y tecnologías relacionadas, conocidas como electro-tecnologías
- LOPA Del inglés “Layer of Protection Analysis”. Es un método de evaluación de peligros y riesgos que permite la determinación del SIL apropiado para cada SIF.
- MAOP Máxima presión de operación permisible
- PFD Diagrama de Flujo de Proceso
- P&ID Del inglés “Pipeline & Instrument Diagram”, Diagrama de Tubería e Instrumentación
- PLC Del inglés “Programmable Logic Controller”. Controlador Lógico programable
- PSV Del inglés “Pressure Safety Valve”. Válvula de Seguridad de Alivio de Presión
- RR Rango de Riesgo
- SCADA Del inglés “Supervisory Control and Data Acquisition”. Sistema de Adquisición de Datos, Supervisión y Control

- SIF Del inglés “Safety Instrumented Function”. Función instrumentada de Seguridad.
- SIL Del inglés “Safety Integrity Level”, es una medida de rendimiento necesario para una función instrumentada de seguridad (SIF). Por extensión, “SIL Rated” indica un equipamiento que se ha evaluado y demostrado su aptitud para ser usado en una SIF de un determinado SIL
- SIS Del Inglés “Safety Instrumented System”, Sistema Instrumentado de Seguridad.
- SRS Del Inglés “Safety Requirement Specification”, Especificaciones de Requerimientos de Seguridad.
- ZAC Zona de Alta Consecuencia.

5.3 Bibliografía:

- [1] Guidelines for Safe and Reliable Instrumented Protective Systems, CCPS an AIChE Industry Technology Alliance, Wiley 2007
- [2] Sistemas Instrumentados de Seguridad – Evolución, Diseño y Aplicación, Roberto E. Varela, Soluciones en Control, 2003
- [3] Hazard and operability studies (HAZOP studies) — Application guide. BRITISH STANDARD - BS IEC 61882:2001
- [4] HAZOP and HAZAN. Identifying and assessing process industry hazards. Trevor Kletz. IChemE, 1999
- [5] Layer of Protection Analysis - Simplified process risk assessment. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers 3 Park Avenue New York, New York 10016-5991, 2001
- [6] Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Third Edition. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers 3 Park Avenue New York, New York 10016-5991, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008
- [7] 29CFR 1910.119 “Process Safety Management (PSM)”, OSHA, USA.
- [8] PG-SS-TC-003-2007 Procedimiento para realizar análisis de riesgos de proceso en PEMEX Exploración y Producción. Versión segunda. Diciembre 2007
- [9] NRF-018-PEMEX-2007 Estudios de Riesgos. Rev. 0. Enero de 2008.
- [10] IEC 61508 Seguridad funcional de Sistemas de Seguridad Eléctricos / Electrónicos / Electrónicos Programables. 2010.
- [11] IEC 61511-1 Seguridad funcional. Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de las industrias de procesos. Parte 1: Marco, definiciones, requisitos para el sistema, el hardware y el software. IEC 2003 + Corrigenda 2004.
- [12] IEC 61511-2 Seguridad funcional. Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de las industrias de procesos. Parte 2: Directrices para la aplicación de la Norma IEC 61511-1. IEC 2003.
- [13] IEC 61511-3 Seguridad funcional. Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de las industrias de procesos. Parte 3: Guía para la determinación de los niveles requeridos de integridad de seguridad. IEC 2004.
- [14] ANSI / ISA – S.84 Safety Instrumented Systems for the Process Industries.

- [15] Design of Contingency Plans for Pipeline Leakage using Hydraulic Simulation (PC2006 – 10214). International Pipeline Conference 2006, Calgary, Alberta, Canada. Autores: Martin Di Blasi (YPF), Walter Ramponi (YPF), Juan Czarnowski.
- [16] Application of Global Strategies to mitigate overpressures due to unexpected blockages in pipelines (IBP1051_07). Rio Pipeline Conference 2007, Brasil. Autores: Adrián Zoppi (YPF), Marcelo Leissa (YPF), Martín Di Blasi (YPF), Juan Czarnowski.
- [17] A Methodological discussion to evaluate and design protection strategies to control overpressures in hydrocarbon pipeline systems using the transient analysis (IBP1136_11). Rio Pipeline Conference 2011, Brasil. Autores: Juan Czarnowski, Pablo Gonzalez (PAE), Horacio Carbajal (YPF).
- [18] Pipeline Rupture Consequences Mitigation Comprehensive Study (PSIG 1009) PSIG – Pipeline Simulation Interest Group -, USA. Autores: Mahmood AL – Rasheed, Austin Brell, Saleh, Al – Qafas & Mohammed Al – Marri (Saudi Aramco)

Juan Czarnowski:

Títulos: Ingeniero Civil e Hidráulico. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.

Trayectoria: Consultor Especialista en la aplicación de la modelación hidrodinámica aplicada a sistemas de transporte por ductos a presión en proyectos de incremento de capacidad de transporte, diseño de sistemas de protecciones y control de derrames para, entre otras empresas, YPF, Refinor, Pan American Energy, SINOPEC Argentina, Pluspetrol, Tecpetrol, Chevron, Techint y AySA (Argentina) y de otros países, como PEMEX (México), Ecopetrol (Colombia), Arauco (Chile) y PetroAndesPetroleum (Ecuador), etc.



Oscar Rodolfo Bollmann:

Títulos: Ingeniero en Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. Argentina.

Functional Safety Professional TÜV SÜD, ID Number: TP10050248



Trayectoria: Consultor Especialista en Automatización, Control, SCADA y Sistemas Instrumentados de Seguridad para la industria del Gas y Petróleo y para la producción y tratamiento de agua. Participación con equipos técnicos y profesionales acompañando el desarrollo de distintos proyectos en Latinoamérica, y para empresas tales como, YPF, TGS, TGN, Chevron, Gas Andes (Argentina) y de otros países, como PEMEX, Petroquímica Cangrejeras, CNA (México), Ecopetrol (Colombia), GNLQ, GNLM y ARAUCO (Chile), PLNG, COGA y GMP (Perú), YPFB Transportes, EBR y CLHB, (Bolivia), etc.

