

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL
FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DE GAS
LICUADO DEL PETROLEO (GLP) – APLICACIÓN ESTACION DE
TRANSPORTE DE REFINADOS EN COLOMBIA.**

DIANA KATHERINE CARRILLO ROMERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA**

2020

**FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DE GAS
LICUADO DEL PETROLEO (GLP) – APLICACIÓN ESTACIÓN DE
TRANSPORTE DE REFINADOS EN COLOMBIA.**

DIANA KATHERINE CARRILLO ROMERO

**Trabajo de grado para optar por el título de
Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas**

Director

FABIO ALEXANDER CASTELLANOS OLARTE

MSc. Gestión de la industria de los hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA**

2020

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE GLP .	14
1.1 MARCO REFERENCIAL.....	14
1.2. NORMATIVA INTERNACIONAL UTILIZADA	17
1.3. DEFINICIONES GENERALES EN SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESION:	17
1.4. FILOSOFIA DE CONTROL PARA EL EVENTO DE VAPORIZACION REPENTINA O AUMENTO DE PRESION:.....	23
2. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE GLP - CASO ESTUDIO	26
2.1 BASES DE DISEÑO	27
2.1.1. Criterios y consideraciones	29
2.2 DIAGNOSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA.....	32
2.2.1. Condiciones del lugar.....	32
2.2.2. Sistema de alivio actual	33
3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE ALIVIO EN EL MANEJO DEL GLP- CASO ESTUDIO.....	43
3.1 Análisis de alternativas sistema de alivio.....	43
3.1.1. Línea Base.....	43

3.1.2 Sistema de recuperación de vapores (FGRS- Flare gas recovery system).	.44
3.1.3. Condensación refrigerada.....	45
3.1.4. Presurización	47
3.2. ANALISIS DE ALTERNATIVAS TEA	52
3.2.1. Incinerador Térmico (Thermal Oxidizer).....	53
3.2.2. TEA convencional asistida por aire (SMOKELESS)	54
3.2.3. TEA Encapsulada	55
3.3. ANALISIS COSTO-EFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE ALIVIO	57
4. CONCLUSIONES	59
5. RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de la normativa internacional.....	17
Tabla 2 Propiedades del GLP.....	27
Tabla 3 Datos meteorológicos y geográficos de la estación de refinados	32
Tabla 4 Longitud cabezal de alivio de GLP a TEA.....	34
Tabla 5 Características generales de las PSV instaladas	35
Tabla 6 Resultados simulación hidráulica cabezal de alivio	36
Tabla 7 Tipo PSV propuesta reemplazo	37
Tabla 8 Dimensiones del tambor amortiguador	38
Tabla 9 Propiedades GLP entrada al tambor amortiguador	38
Tabla 10 Resultados diagnóstico Tambor amortiguador	39
Tabla 11 Dimensiones del tambor propuesto	40
Tabla 12 Características generales de la tea	41
Tabla 13 Presupuesto inversión línea Base	43
Tabla 14 Características intercambiador de calor GLP	46
Tabla 15 Presupuesto inversión condensación refrigerada	46
Tabla 16 Presupuesto inversión presurización	49
Tabla 17 Presupuesto inversión Evaporación	50
Tabla 18 Opciones TEA Smokeless	54
Tabla 19 Opciones TEA encapsulada	56
Tabla 20 Resumen Costo-Beneficio sistema Alivio	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Componentes del sistema de alivio de presión.	18
Figura 2 Sobrepresión y acumulación	19
Figura 3 Válvula tipo convencional	20
Figura 4 Válvula tipo balanceada.....	21
Figura 5 Válvula tipo pilotada.....	21
Figura 6. Relación entre los niveles de presión para válvulas de alivio de presión.	22
Figura 7 Disposición de la estación de transporte	33
Figura 8 Sistema de alivio actual	34
Figura 9 Válvulas de alivio de la estación.....	35
Figura 10 Tambor amortiguador	37
Figura 11 Referencia medidas tambor amortiguador.....	39
Figura 12 Tambor de sello	41
Figura 13 Tea	41
Figura 14 Esquema sistema de recuperación de vapores.....	44
Figura 15 Esquema operativo sistema condensación refrigerada	45
Figura 16 Esquema operativo sistema Evaporación.....	50
Figura 17 Comparación costo alternativas sistema de alivio	51
Figura 18 Incinerador Térmico.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19 Tea Zeeco	56
Figura 20 Tea John Zink Hamworthy	56

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Propuesta de proveedores

Anexo B. Propuesta TEA Asistida

Anexo C. Estimado costos Clase V.

Anexo D. Datos Fabricantes PSV.

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DE GAS LICUADO DEL PETROLEO (GLP) – Aplicación estación de transporte de refinados en Colombia*.

AUTOR: DIANA KATHERINE CARRILLO ROMERO**

PALABRAS CLAVE: GLP, RIESGO, ALIVIO, SOBREPRESIÓN.

DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de alivio de presión son un componente importante en el sistema de seguridad de un proceso, en especial de uno que maneje de los que manejan productos hidrocarburos inflamables. Estos sistemas de alivio proveen la barrera última de protección para evitar accidentes frente al aumento de presión dentro del sistema que pueden generar como, por ejemplo, fuga de producto inflamable a la atmosfera, generando bleves y explosiones. Durante el desarrollo de este trabajo se realiza la revisión de alternativas de optimización para el diseño y funcionamiento de sistemas de alivio de presión de gas licuado del petróleo (GLP), asegurando los requerimientos operativos, pero sobre todo garantizando los niveles de seguridad de proceso para evitar fugas de producto a la atmosfera. Para lograr este objetivo, se realiza el caso de estudio en una estación de refinados que transporta GLP en Colombia, el cual puede ser replicable para otras estaciones que transporten este producto y tengan características similares. El análisis inicia caracterizando las condiciones del activo, para identificar los cambios necesarios como línea base para hacer operativo el sistema. Seguido se procede a revisar diferentes alternativas para el sistema de alivio, incluyendo la condensación del líquido relevado, la presurización y la evaporación del GLP, así como el análisis de alternativas para el reemplazo de la TEA. Este trabajo concluye con la comparación costo-beneficio de las diferentes alternativas planteadas, descartando las que tienen una operación o costo inviable, así como también las cuales no cumplen con el objetivo primordial de mitigación del riesgo en la estación.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas Escuela de ingeniería de petróleos Maestría en ingeniería de petróleos y gas Director Fabio Alexander Castellanos Olarte Magister Gestión de la industria de los hidrocarburos

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF OPTIMIZATION ALTERNATIVES FOR THE OPERATION OF LIQUIFIED PETROLEUM GAS (LPG) PRESSURE RELIEF SYSTEMS - Application of oil refining transport station in Colombia*.

AUTHOR: DIANA KATHERINE CARRILLO ROMERO**

KEY WORDS: LPG, RISK, RELIEF, OVERPRESSURE.

DESCRIPTION:

The Pressure relief system is an important component in the process safety system, especially one that handles flammable hydrocarbon products. These relief systems provide the ultimate barrier of protection to prevent accidents such as, a flammable product leaking into the atmosphere, generating blends and explosions.

During the development of this work the revision of optimization alternatives for the design and operation of pressure relief systems of liquefied petroleum gas (LPG) is carried out, ensuring operational requirements, but above all guaranteeing safety levels in the process to prevent product leakage into the atmosphere.

To achieve this objective, the study case is carried out in an oil refining station that transports LPG in Colombia, which can be replicable for other stations that transport this product and have similar characteristics.

The analysis begins by characterizing the conditions of the asset, to identify the necessary changes as a baseline to make the system operational. Then we proceed to review different alternatives for the relief system, including condensation of the relieved liquid, pressurization and evaporation of LPG, as well as the analysis of alternatives for the replacement of the FLARE.

This work concludes with the cost-benefit comparison of the different alternatives proposed, discarding those that have an unviable operation or cost, as well as those that do not meet the primary objective of risk mitigation at the station.

* Master Thesis

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas Escuela de ingeniería de petróleos Maestría en ingeniería de petróleos y gas Director Fabio Alexander Castellanos Olarte Magister Gestión de la industria de los hidrocarburos

INTRODUCCIÓN

Un sistema de alivio de presión es un sistema de seguridad destinado a proteger equipos frente a un evento de presión, es uno de los componentes principales de un sistema protegiendo y salvaguardando la seguridad de las personas, los equipos y el medio ambiente, afectando directamente a la mitigación de los impactos tanto económicos como de imagen que se puede tener debido a eventos catastróficos en un sistema operativo. Por esta razón es necesario realizar revisiones y actualizaciones periódicas de los sistemas de alivio instalados en la infraestructura de transporte de GLP (Gas Licuado del petróleo).

Las industrias químicas y energéticas se caracterizan por tener pocos accidentes, pero, cuando se producen, de severidad (alcance y efectos) elevada. Ello se debe y da lugar a que los aspectos de seguridad tengan una importancia y sean objeto de una intensa atención en las actividades de diseño, proyecto, operación y mantenimiento de las plantas pertenecientes a dichas industrias.

El sistema de relevo y protección del sistema de GLP evaluado presenta alto riesgo para la operación y el personal, debido a los problemas de obsolescencia en el diseño y baja integridad en sus líneas y vasijas. Así mismo el diseño actual no permite cumplir con la funcionalidad necesaria para proteger la infraestructura de las sobrepresiones que se puedan presentar para las condiciones de operación del caso de estudio.

Si la condición mencionada anteriormente persiste, puede conllevar a afectaciones mayores como por ejemplo fuga de producto con final consecuencia presencia de nubes combustibles, explosión y muerte. Por tal razón se plantea las diferentes alternativas para el cambio del sistema de alivio considerando siempre la relación costo-eficiencia, cumpliendo como base con los requerimientos de seguridad de las instalaciones. Se prevé que se van a requerir cambios en válvulas de relevo, tanques, líneas de descarga, y TEA, por lo cual la mejor alternativa será aquella que demande menos presupuesto, y cumpla con las condiciones de seguridad básica. Este trabajo de grado tendrá un alcance de tipo explicativo, ya que se describen y relacionan diferentes variables con el fin de conseguir la mejor alternativa de diseño para un sistema de alivio en una estación de típica que transporte de GLP. Además, la metodología seguida en de este trabajo puede servir de base para realizar el diagnóstico y plantear alternativas de solución en otras estaciones que transporten este producto y tengan características similares.

1. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE GLP

1.1 MARCO REFERENCIAL

Al consultar la literatura, algunos de los accidentes impactantes con el manejo de GLP son: en Feyzin, Francia (1966) - GLP, Se presentó un bleve dejando 18 muertos y 90 heridos; en Staten Island, New York (1973) – GNL (Gas Natural Licuado), se presentó incendio dejando 40 muertos; en San Juan de Ixhuatepec, Mexico DF (1984) – GLP, se presentó un bleve dejando 1500 muertos y más de 4200 personas heridas; Veracruz, México (2003) – GLP, se presentó explosión dejando 4 muertos y 62 heridos[†]; todos estos accidentes provocados por el manejo de hidrocarburos sometidos a presión en las instalaciones industriales han llevado a una mejora constante de las normativas y lineamientos de diseño de los elementos de seguridad en cada uno de los procesos de producción.

Las industrias químicas y energéticas se caracterizan por tener pocos accidentes, pero, cuando se producen, de severidad (alcance y efectos) elevada. Ello se debe y da lugar a que los aspectos de seguridad tengan una importancia y sean objeto de una intensa atención en las actividades de diseño, proyecto, operación y mantenimiento de las plantas pertenecientes a dichas industrias.

La secuencia accidental que se puede dar, de manera parcial o total, suele ser:

[†] BOTTA, Nestor Alfonso. LISTADO DE LOS GRANDES ACCIDENTES MUNDIALES. Copyright © 2000-2012 RED PROTEGER.

a) Emisión: derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos. Puede generar efectos tóxicos, incendios y/o explosiones según la naturaleza de las sustancias emitidas.

b) Incendio: combustión (de varias formas) de los fluidos contenidos o emitidos, generando radiación térmica dañina, cuando aquéllos son inflamables.

c) Explosión: anterior (por ejemplo, de aparatos) a la emisión o posterior (por aceleración de la combustión) al incendio, generando ondas de presión o de sobrepresión que son dañinas. La explosión puede también dar lugar a la propagación de proyectiles. Tal conjunto de accidentes puede afectar a las personas, a los bienes y al medio ambiente tanto dentro como fuera de los límites de la planta en que tienen su origen aquéllos[‡].

El transporte del GLP en Colombia desde su origen se hace a través de tuberías, Pese a que se trata de un sistema de transporte seguro comparado con otros (ferrocarril, carretera), es de interés de aumentar la seguridad y esto se ve con la constante renovación de regulaciones en el transporte de este producto.

La mayoría de los accidentes por ignición accidental de combustible se producen en las plantas de proceso (35.8%), seguidos de aquellos ocurridos durante su transporte (25.6%), almacenamiento (18.9) y carga/descarga (13.9%). Con respecto al origen específico de los accidentes, la mayoría de los accidentes ocurridos en plantas de proceso se dan por ignición de sustancias presentes en tanques de

[‡] J. Ma. Storch de gracia, T. García Martín. SEGURIDAD INDUSTRIAL EN PLANTAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño. 2ª Edición. 2008. Ediciones Díaz de santos.

proceso (36.7%). En segundo lugar, tenemos los accidentes producidos por fugas de las tuberías de la planta por las que circula dicha sustancia (22%). Por lo que respecta a los accidentes ocurridos durante la fase de transporte, su gran mayoría es dada mientras la sustancia es transportada mediante tuberías (46.8%), Con respecto a los materiales involucrados en accidentes en los cuales se da lugar una llamarada o una explosión de nube de vapor inflamable, se ha observado que la sustancia más frecuentemente involucrada es el gas licuado de petróleo (GLP) con un 41% de contribución. Al GLP le sigue la gasolina (6,3%), el crudo (6,3%) y el cloruro de vinilo (4,0%), reactivo usado para la fabricación del cloruro de polivinilo (PVC). En la distribución de las causas de los accidentes, en la categoría de las fallas mecánicas, la causa específica más frecuente es desconocida para un 23% del total de los casos, mientras que la causa específica conocida más frecuente es la **sobrepresión con un 13% de los casos**, seguida de las fallas de operación de las válvulas[§].

Los errores en el diseño Ingenieril y operaciones de los sistemas de alivio de presión pueden resultar en serias incidencias de seguridad, que deben ser evitadas. Control de calidad, capacitación técnica, revisión de cómputos, y verificación de los métodos pueden apoyar la reducción en los riesgos de seguridad en estos sistemas^{**}.




[§] López, Javier. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE SUBSTANCIAS PELIGROSAS. Junio 2017. Pág. 2.

^{**} Snow-McGregor, Kindra. Diseño en la ingeniería de procesos, y seguridad. PETROSKILLS. Campbell, M. John. January 1, 2009.

1.2. NORMATIVA INTERNACIONAL UTILIZADA

En la Tabla1, se presenta un cuadro resumen de la normativa de referencia para utilizar durante el diseño de los sistemas de alivio.

Tabla 1 Resumen de la normativa internacional

Ente emisor	Número	Título
	STD 521 (ISO 23251)	<i>Pressure-Relieving and Depressuring Systems.</i>
	STD 520 Part I	<i>Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part I – Sizing and Selection.</i>
	RP 520 Part II	<i>Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part II – Installation.</i>
	STD 526	<i>Flanged Steel Pressure Relief Valves.</i>
	STD 537	<i>Flare Details for General Refinery and Petrochemical Service</i>
	STD 2000	<i>Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks. Nonrefrigerated and Refrigerated.</i>
	B31.3	<i>Process Piping</i>
	SEC VIII DIV 1	<i>Boiler & Pressure Vessel Code - Rules for Construction of Pressure Vessels.</i>
	4126	<i>Safety devices for protection against excessive pressure (subdividida en siete partes)</i>

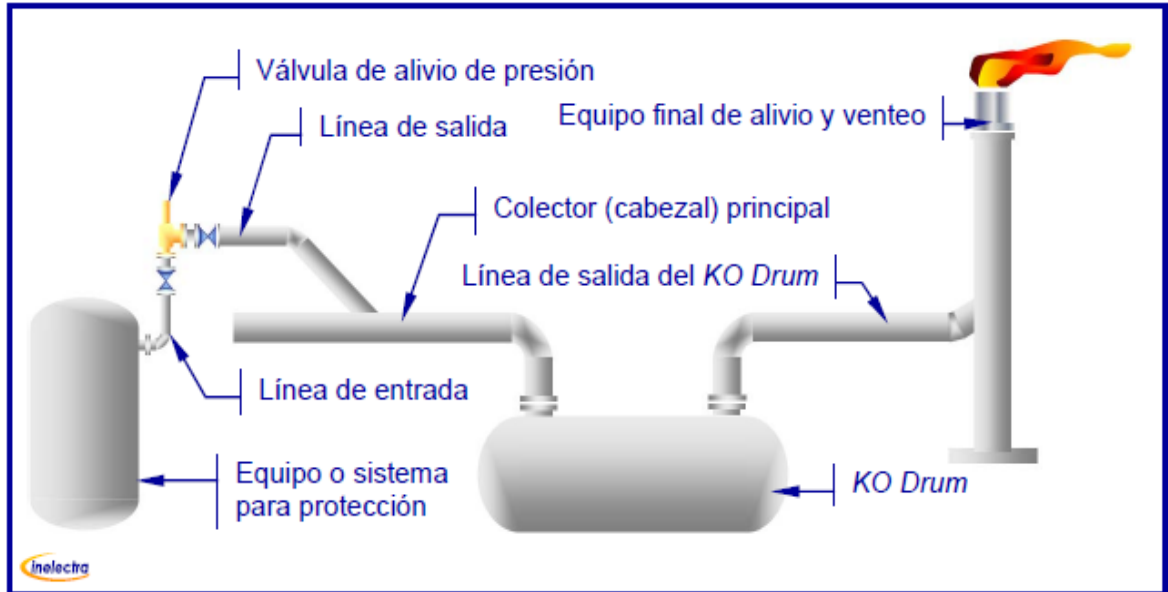
1.3. DEFINICIONES GENERALES EN SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN:

a) Sistema de Alivio (de Relevo) de Presión (Pressure Relieving System):

Un sistema de alivio de presión puede consistir en un solo dispositivo de alivio (por ejemplo, una válvula de alivio o un disco de ruptura), con la línea de salida, en un recipiente o línea. Un sistema más complejo puede contar con varios

dispositivos de alivio conectados a un sistema de recolección y los equipos finales de disposición: *Tanque de separación o tambor acumulador (KO Drum)* y equipo final de alivio y venteo (Figura 1)^{††}.

Figura 1 Componentes del sistema de alivio de presión.



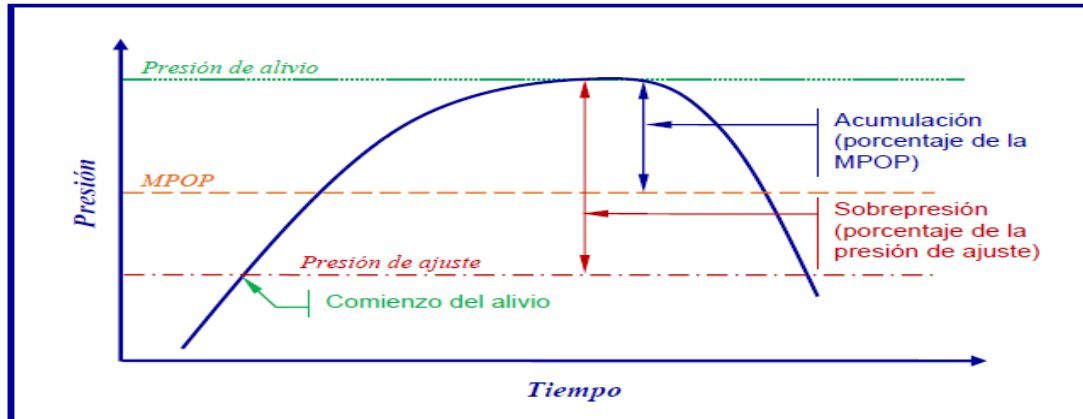
Fuente: Guía de diseño para los sistemas de alivio de presión. 903-HM120-P09-GUD-041. Rev. 3. Inelectra. Octubre 2009

b) Acumulación (*Accumulation*): Se refiere al incremento de presión por encima de la MPOP (Máxima presión operativa) del equipo, la cual está permitida durante la descarga de un dispositivo de alivio de presión^{‡‡} (Figura 2). Los valores aceptables de acumulación permitida están establecidos en varios códigos de diseño para operaciones de emergencia y para contingencias de fuego.

^{††} A.A. Guía de diseño para los sistemas de alivio de presión. 903-HM120-P09-GUD-041. Rev. 3. Inelectra. Octubre 2009.

^{‡‡} ANSI/API Standard 521 (ISO 23251). Pressure-Relieving and Depressuring Systems. Fifth Edition, January 2007.

Figura 2 Sobrepresión y acumulación



Fuente: API Recommended Practice 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part II – Installation. Fifth Edition, August 2003

c) Dispositivo de Alivio (Relevo) de Presión (*Pressure Relief Device*):

Dispositivo activado por una presión estática a su entrada y diseñado para abrir durante una emergencia o condición anormal con el objetivo de prevenir un incremento en la presión del fluido interno por encima del valor especificado de diseño. El dispositivo puede ser también diseñado para prevenir un vacío interno excesivo. El dispositivo puede ser una válvula de alivio de presión, un dispositivo de alivio de presión sin posibilidad de cierre después de activado o una válvula de alivio de vacío.

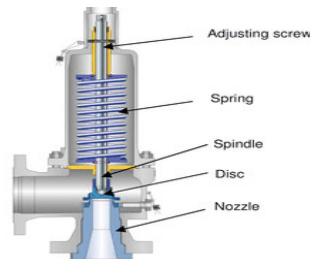
d) Mechurrio, Tea, Antorcha o Quemador de Desfogue (*Flare*): Equipo para

la disposición segura de los gases de desecho por medio de la combustión. En un quemador elevado, la combustión tiene lugar en la punta (*tip*) de una línea o estaca. Un quemador de piso o de suelo es similar, pero la combustión ocurre a un nivel cercano al suelo. Una fosa de quemado es usada.

e) **Válvula de Alivio (Relevo) (*Relief Valve*):** Válvula de alivio de presión provista con un resorte, el cual es accionado por la presión estática aguas arriba de la válvula. La válvula abre generalmente de manera proporcional al incremento de presión sobre la presión de apertura. Las válvulas de alivio de presión son usadas generalmente para servicios de fluidos incompresibles^{§§}. Existen 3 tipos básicos de válvulas de seguridad y relevo:

- Convencional: Dispositivo de presión diferencial con resorte cargado, sus características operativas están directamente afectadas por cambios en la contrapresión. Son realmente útiles cuando se descarga a la atmósfera, ya que la descarga hacia un cabezal de alivio no es práctica debido a que la contrapresión siempre es variable y esto afectará el desempeño de la válvula (Figura 3).

Figura 3 Válvula tipo convencional

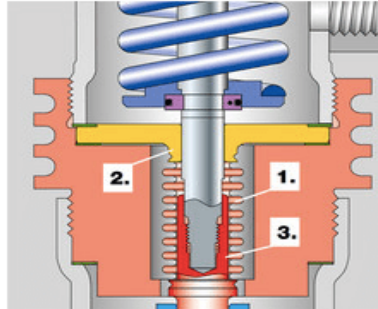


Fuente: www.manometrix.com.mx

- Válvula balanceada: Válvula de seguridad cargada por resorte que incorpora un fuelle u otros medios para minimizar el efecto de la contrapresión sobre las características operativas de la válvula (figura 4).

^{§§} API Standard 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part I – Sizing and Selection. Eighth Edition, December 2008.

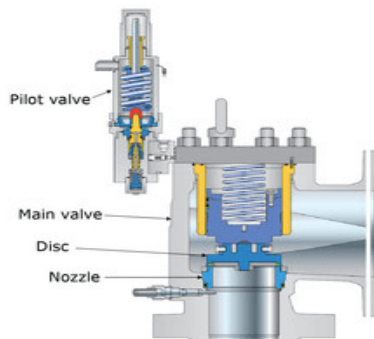
Figura 4 Válvula tipo balanceada



Fuente: www.manometrix.com.mx

- Válvulas de Seguridad Operadas por Piloto (POSV): La válvula de alivio accionada por piloto normalmente no es afectada por la contrapresión. Pueden tener hasta un 80% de contrapresión que tan solo reduce la capacidad en un 20% (Figura 5).

Figura 5 Válvula tipo pilotada

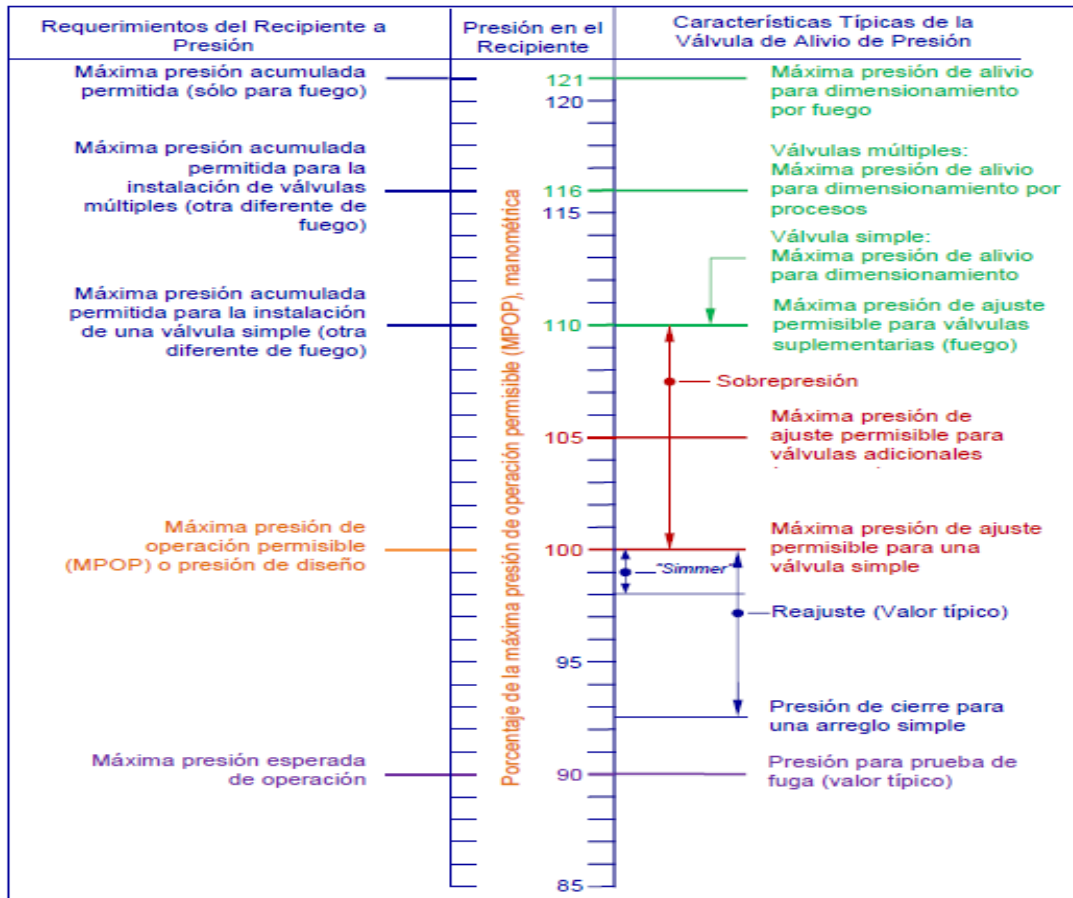


Fuente: www.manometrix.com.mx

- f) **Tanque de separación o tambor acumulador (de Relevo) (Knock Out Drum):** Recipiente para la separación de los fluidos de alivio: gas y líquido. El gas puede ser enviado a un equipo final de alivio o venteo para la disposición final. Los líquidos pueden ser enviados a fosas de quema, tanques para almacenamiento, retornados al proceso, etc.

g) **Presión de Ajuste (Set Pressure):** Presión manométrica a la cual una válvula de alivio, dispositivo de seguridad o instrumento está ajustado para abrir o accionar^{***}. La Figura 6 muestra la relación de las presiones en una válvula de alivio.

Figura 6. Relación entre los niveles de presión para válvulas de alivio de presión.



Fuente: API Recommended Practice 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part II – Installation. Fifth Edition, August 2003

^{***} API Standard 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part I – Sizing and Selection. Eighth Edition, December 2008.

1.4. FILOSOFÍA DE CONTROL PARA EL EVENTO DE VAPORIZACIÓN

REPENTINA O AUMENTO DE PRESIÓN:

En la ingeniería de procesos, las reacciones fuera de control, en este caso el aumento de presión, presentan tres aspectos a considerar dentro de la filosofía para su control, para realizar el diseño del sistema de protección:

- Control de la instalación para mantener la situación normal (Sistema de control, sistema integrado de seguridad).
- En caso de reacción fuera de control, descarga rápida del contenido del recipiente para evitar la explosión (Blowdown)
- Control del producto descargado para evitar un accidente posterior, nube inflamable, dispersión de producto (Sistema de alivio a TEA).

Sistema de alivio de presión: El sistema de alivio de presión está conformado por dispositivos de alivio de presión, el sistema de venteo, tuberías y medios de disposición final colocados en las instalaciones para la recolección, transporte y disposición segura de alivios generados cuando se activan las válvulas de seguridad de la planta. Tiene la función de proteger las instalaciones de sobrepresiones derivadas de fallas mecánicas u operacionales del proceso, disminuyendo a valores seguros la presión del sistema en caso de contingencias, a través del desalojo de la masa acumulada manteniendo la estabilidad, eficiencia de los procesos de separación y garantizar la continuidad de las operaciones de producción de la planta. Mediante un sistema de recolección conformado por un cabezal de disparos,

se recoge todos los gases provenientes de las válvulas de alivio o las de venteo (blowdown), para enviarlos a un separador despojador de líquidos y para así de manera segura, puedan ser quemados en la TEA^{†††}.

Sistema de Venteo o Despresurización: Este sistema es de gran importancia, ya que para algunas contingencias el sistema de alivio no protege a los equipos, por ejemplo: en caso de incendio la temperatura del metal puede incrementarse y alcanzar el esfuerzo de ruptura del metal sin producirse la sobrepresión que activa las válvulas de alivio. El único mecanismo para evitar esto, es a través de un sistema de venteo, que al detectar el incendio se activa la secuencia automática de parada y descarga de la instalación. Para diseñar este sistema debe evaluarse los requerimientos de incendio y los de proceso, para considerar el mayor de ambos, y garantizar una capacidad suficiente de venteo y evitar superar el esfuerzo de ruptura del material. El sistema de venteo opera a través de las válvulas de despresurización automática (blowdown valves), que se activan al mismo tiempo que se cierran las válvulas de entrada y salida de la instalación (shut down valves); estas válvulas no solo operan durante el tiempo recomendado (15 min), deben permanecer activas durante toda la emergencia permitiendo desalojar la masa acumulada y reducir la presión desde el valor normal de operación hasta 0 Psig^{†††}. El venteo también puede ser parcial en equipos específicos, para contingencias

^{†††} PDVSA., 90616.1.022 "Sistemas de Alivio" Manual de Ingeniería de Diseño, Volumen 13 III

^{†††} API Standard 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure Relieving Devices in Refineries. Part I – Sizing and Selection. Eighth Edition, December 2008.

simples o total de en caso de emergencias en la misma. El gas se recolecta mediante un cabezal principal, proveniente tanto de las válvulas de alivio como las blowdown, luego se envía al recipiente KOD, la corriente gaseosa puede ser descargada a la atmósfera a través del sistema de venteo o quema, siempre y cuando las regulaciones ambientales lo permitan, sino puede utilizarse un sistema cerrado. En caso de usar un sistema de venteo a la atmósfera debe cumplirse los siguientes criterios:

- Que el venteo de emergencia esté permitido por normas locales.
- Que los hidrocarburos no sean amenaza de fuego, ya que el vapor debe ser aliviado a la elevación más alta posible y a la máxima velocidad; esta velocidad no debe ser menor de 500 pie/seg
- Nivel de ruido no excesivo durante el venteo, aceptable hasta 0,5 Mach^{§§§}.
- Que las válvulas no tengan fugas; para evitar esto, se instalan discos de ruptura antes de la válvula

Debe cumplir con las normas y códigos, principalmente los siguientes:

- Código ASME sección VIII
- API RP 520 sección 1 y 2 Práctica recomendada para el diseño e instalación de Sistemas de Alivio de Presión.
- API RP 521 Guía para Sistemas de Alivio de Presión y Despresurización

^{§§§} ANSI/API Standard 521 (ISO 23251). Pressure-Relieving and Depressuring Systems. Fifth Edition, January 2007.

2. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE GLP - CASO ESTUDIO

El trabajo se desarrollará de manera experimental, recolectando los datos de campo durante las fases correspondientes al desarrollo. Este desarrollo se dividirá en cuatro (4) fases principales, descritas a continuación:

- i. Bases de diseño: Se deben establecer los criterios y consideraciones para el diseño de un sistema de alivio, tomando en cuenta los requerimientos a futuro del sistema, así como los cumplimientos operativos y de seguridad de procesos.
- ii. Diagnóstico inicial: En esta fase, se revisará la capacidad de diseño, integridad, operatividad y diseño típico de un sistema de alivio instalado, utilizando como caso de estudio, el actualmente instalado en una estación de transporte de refinados. El objetivo es desarrollar la línea base, evaluando en campo el estado actual y el cumplimiento a las normativas vigentes de cada uno de los componentes que compone el sistema de alivio, PSV's, líneas de relevo, tambor amortiguador, tambor de sello, bombas a sumidero, y la TEA.
- iii. Análisis de alternativas: Con base en los requerimientos a cumplir para el sistema de relevo, se procede a reconocer en el mercado las diferentes tecnologías existentes, que puedan ofrecer alternativas a la quema del GLP, o beneficios de reutilización de los productos después del disparo por sobrepresión.

- iv. Selección de alternativa: Realizar análisis costo – Beneficio para las alternativas de reemplazo del sistema de alivio planteadas, y presupuesto de la inversión necesaria para el cambio del sistema de alivio actual. Analizar las prestaciones de cada una de las alternativas revisadas en el punto anterior, para definir cuál es el mejor camino para seguir en las siguientes fases del proyecto que serían el diseño avanzado y construcción de un nuevo sistema de alivio.

2.1 BASES DE DISEÑO

En la Tabla 2 se presentan las propiedades fisicoquímicas del GLP que se transporta para el caso de estudio a evaluar.

Tabla 2 Propiedades del GLP

PARÁMETRO	DOCUMENTO NORMATIVO	UNIDAD	RESULTADO
Contenido de agua libre	Visual	-	No contiene
Poder calorífico	ASTM S 3588-98	kJ/kg	48992
Pentano y + pesados	ASTM D 2163-14e1	%vol	14.38
Factor volumétrico	ASTM D 2421-13	m ³ /kg	0.4272
P. de vapor a 37.8°C	ASTM D 2598-16	kPa	434
Densidad rel. a 15.6°C	ASTM D-2598-16	-	0.586
C6+	ASTM D 2163-14e1	%vol	9.76

PARÁMETRO	DOCUMENTO NORMATIVO	UNIDAD	RESULTADO
Metano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	0.00
Etano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	0.68
Propano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	11.24
Propileno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	4.27
Iso-Butano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	14.38
N-Butano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	11.69
Trans-2-Buteno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	11.57
1-Buteno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	10.28
Iso-Butileno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	14.54
Cis-2-Buteno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	6.60
Isopentano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	3.06
N-Pentano	ASTM D 2163- 14e1	%vol	1.56
1,3 Butadieno	ASTM D 2163- 14e1	%vol	0.40

2.1.1. Criterios y consideraciones

2.1.1.1. PSV

- a. Los flujos máximos que se manejan por el sistema de transporte de 8", para el dimensionamiento de las PSV es de 1300 BPH.
- b. Se contempla el escenario de salida de válvula bloqueada para el dimensionamiento de las válvulas de alivio.
- c. No se tendrán en cuenta los alivios menores provenientes de las TRV's (Temperature relieve valves) instaladas, para el análisis de capacidad del sistema de alivio.
- d. Las PSV se diseñan para que estén en la capacidad de evacuar el flujo máximo que transporta el ducto con las dos válvulas PSV operando.
- e. De acuerdo con el estándar API 520-I, se establecen restricciones en cuanto a la máxima contrapresión permitida a la descarga de la PSV a través de la cual se realiza el relevo:
 - PSV de tipo convencionales, la contrapresión total (superpuesta más construida), no mayor al 10% de la presión de set de la válvula.
 - PSV de tipo balanceadas, la contrapresión total no mayor al 50% de la presión de set de la válvula.
 - PSV de tipo pilotadas, la apertura de la válvula no es afectada por la contrapresión. No obstante, se establece un límite de contrapresión del 50% de la presión de set de la válvula pilotada, para garantizar un funcionamiento adecuado de la válvula.

2.1.1.2. Tanque de separación o tambor acumulador (Knock Out Drum)

- a. Se considera que debe almacenar el flujo de por lo menos 20 min proveniente de las líneas de relevo, contemplando flujo máximo, de acuerdo con el estándar API 521, numeral 4.2.5.
- b. La separación de líquidos debe ser para partículas de 300 µm de diámetro.
- c. La filosofía de operación del KO DRUM debe contemplar tener siempre un nivel mínimo de líquido, asegurando la capacidad ante una situación de relevo, por lo tanto, debe asegurarse en la filosofía, la evacuación del líquido remanente al presentarse cada evento de relevo en la estación.

2.1.1.3. Tambor de sello

- a. Los tambores de sello según el estándar API -521 deben cumplir con los propósitos de: Evitar la propagación de cualquier retro-llama que pueda originarse en la TEA y mantener una presión positiva en el sistema para evitar entradas de aire.
- b. Dimensiones para el máximo relevo del vapor que se pueda presentar, volumen de líquido en el sello debe ser adecuado para prevenir una rotura de sello por una formación de vacío después de una situación de emergencia (relevos).

2.1.1.4. TEA

- a. Fracción de calor irradiado transmitido a la atmósfera = 0.3, teniendo en cuenta que el peso molecular > 30.

- b. Humedad mínima del lugar para el cálculo de la atenuación de la radiación debida a las condiciones atmosféricas.
- c. Parámetros de radiación que se alcanzan cuando operan (Normatividad internacional – API521)):
- Radiación, 500 BTU/ft².h – intensidad máxima de calor radiante en cualquier ubicación donde el personal con dotación apropiada (a) pueda ser expuesto continuamente.
 - 1500 BTU/ft².h – intensidad máxima de calor radiante en áreas donde las acciones por emergencia duren 2-3 min y pueda requerirse personal sin protección, pero con dotación apropiada (a).
 - 2000 BTU/ft².h – intensidad máxima de calor radiante en áreas donde las acciones por emergencia duren 30 s y pueda requerirse personal sin protección, pero con dotación apropiada (a).
 - 3000 BTU/ft².h – intensidad máxima de calor radiante en cualquier ubicación donde se requiera acción urgente en caso de emergencia. Cuando el personal entra o trabaja en área con intensidad de calor irradiado mayor a 2000 BTU/ft².h, debe considerarse protección por radiación y/o ropa especial de protección (e.g. traje de aproximación a fuego). Precaución de seguridad: es importante reconocer que el personal con ropa adecuada no puede tolerar una radiación térmica igual o mayor a 3000 BTU/ft².h por más de unos pocos segundos.

- d. Parámetros de ruido, según MINISTERIO DE SALUD. Resolución 8321 de 1983, por la cual se dictan normas sobre protección y conservación de la audición de la salud y el bienestar de las personas, por causa de la producción y emisión de ruidos.
- 75 dB – nivel máximo para una zona industrial durante el día (7AM-9PM)
 - 90 dB – valor límite permitido para ruido continuo o intermitente durante 8 horas
 - 100 dB – valor límite permitido para ruido continuo o intermitente durante 2 horas
 - 115 dB - valor límite permitido para ruido continuo o intermitente durante 15 minutos o menos.
- e. Alta eficiencia en la combustión (mayor a 85%).
- f. Velocidad de gas en el Tip. (mayor a 0.5 y menor a 0.8 mach)
- g. Sin humo (smokeless) Y Baja visibilidad de la llama.

2.2 Diagnóstico del estado actual del sistema

2.2.1. Condiciones del lugar En la tabla 3 se presenta la caracterización del lugar de ubicación de la estación de refinados escogida

Tabla 3 Datos meteorológicos y geográficos de la estación de refinados

PARÁMETRO	VALOR
Presión Barométrica	14.6 psia
Temperatura	Temperatura promedio: 95°F

PARÁMETRO	VALOR
Humedad Relativa	86 – 98%
Viento	Velocidad promedio: 6.9 ft/s Dirección predominante: SE
Sismos	Zona de amenaza sísmica intermedia

En la ilustración a continuación, se indica el área que ocupa la estación y el área de Tea a la que se direccionan los relevos de esta.

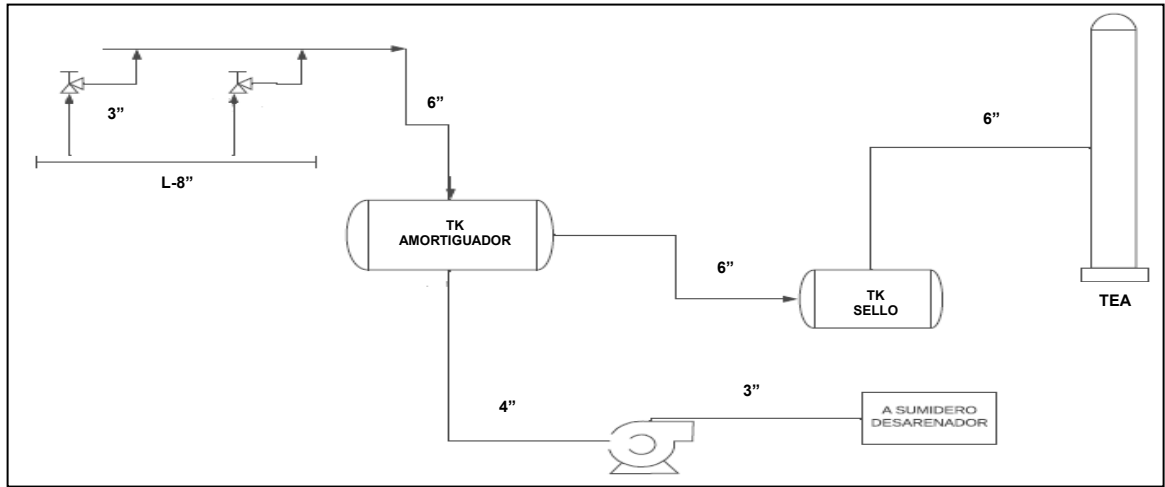
Figura 7 Disposición de la estación de transporte



Fuente: <https://www.google.com/maps>

2.2.2. Sistema de alivio actual El GLP de la estación es recibido desde el almacenamiento de GLP ubicado en la Refinería y se transporta a otros sistemas por medio de dos (2) líneas de transporte: una de 10”, L-10” (Poliducto), el cual transporta Gasolina y Jet y GLP; y una línea de 8”, L-8” (Propanoducto) que transporta GLP exclusivamente. El alivio por sobrepresión es dirigido hacia el sistema de relevo y Tea. En la figura 8 se muestra el esquema del sistema para manejo de alivios actual de la estación en estudio.

Figura 8 Sistema de alivio actual



2.2.2.1. Válvulas de alivio de presión (PSV'S) y cabezal a TEA: Cabezal de

Alivio: El cabezal de Alivio de GLP hacia la Tea se encuentra mayormente enterrado, por lo cual se hace difícil su evaluación, y mantenimiento a nivel de integridad, además, puede producirse un bolsillo de líquido que limita la capacidad de evacuación de la tubería y puede conducir a problemas de corrosión. El cabezal de alivio inicia con una tubería de 3" (descarga de las psv), después se presenta un cambio a un diámetro mayor de 6", posteriormente inicia la línea enterrada para salir de la estación y dirigirse al área de TEA (Figura 7), hacia la entrada del tambor amortiguador (Figura 8). La longitud de los tramos de tubería de los diferentes diámetros se presenta en la tabla 4.

Tabla 4 Longitud cabezal de alivio de GLP a TEA

TRAMO (in)	Longitud Medida (ft)	Longitud Equivalente (m)
3	99	37

6	1732	685
---	------	-----

Válvulas de alivio (Figura 9):

Figura 9 Válvulas de alivio de la estación



En total se encuentran dos válvulas de alivio en la línea de 8", las cuales se describen en la tabla 5.

Tabla 5 Características generales de las PSV instaladas

TAG	MARCA	TAMAÑO			TIPO	P _{SET} (psi)
		Entrada	Orificio	Salida		
PSV-1 L8"	Consolidated	2" 900#	H	3" 150#	Convencional	1155
PSV-2 L8"	Consolidated	2" 900#	H	3" 150#	Convencional	1155

Evaluación sistema alivio instalado: Se realizó simulación hidráulica con el software Pro II V10.0 (Flujo 1300 BPH), para determinar la caída de presión en el sistema, la distribución de fases (liquido-vapor) en la tubería, y la contrapresión en las válvulas de alivio.

Estableciendo que se descarga como punto final a la atmosfera (TEA), la presión del vapor al llegar al tip de la TEA es 0 psig, desde este punto se calculan las caídas de presiones del Stack (cuerpo TEA) hasta el tambor amortiguador, teniendo en cuenta el tambor de sello, esto se realiza haciendo cortes cada 10 ft, calculando mediante el software en cada punto el porcentaje de GLP vaporizado y el comportamiento del flujo. En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 6 Resultados simulación hidráulica cabezal de alivio

N°	Variable	Resultado	ΔP
1	Presión TIP	0 psig	-
2	Presión STACK	1.3 psig	1.3
3	Presión KO DRUM	11.2 psig	10.2
4	Presión descarga PSV	245 psig	230
5	Presión Set PSV	1155 psig	-
6	%Contrapresión	21%	-
7	%Másico vapor KO DRUM	29.17%	-

Como se muestra en el ítem 6 de la tabla 6, el % de contrapresión para las válvulas de alivio es de 21%, estas válvulas son de tipo convencional, por lo tanto, el valor de sobrepresión sobrepasa los límites para este tipo de válvulas (10%). Este resultado representa una condición de **riesgo en la operación**, pues se puede presentar fallas en el momento de apertura de la válvula ante una emergencia.

Recomendación: Debido al desconocimiento y riesgo de integridad de la tubería enterrada, se recomienda reemplazar el cabezal existente. Igualmente se hace necesario realizar el cambio de las válvulas de alivio instaladas actualmente, por una de tipo balanceada calculado según estándar API 521, para manejar contrapresiones de hasta 50%. En la tabla 7 se describen las PSV propuestas.

Tabla 7 Tipo PSV propuesta reemplazo

Tipo de Válvula	Flujo	Set Presión	Contrapresión	%Contrapresión	Orificio
Balanceada	1300 BPH	1155 PSIG	245 PSIG	21%	J

2.2.2.2. Tambor amortiguador (KO DRUM). Es un cilindro horizontal de 1.56 m de diámetro y 3.70 m de longitud s/s. Tiene dos boquillas para la entrada de fluido, en 10", y una para la salida de vapor en 6". Además, cuenta con un drenaje de 4".

Figura 10 Tambor amortiguador



Para la evaluación de este tanque se considera que el máximo nivel que debe tener de líquido en el cilindro debe ser del 80% del diámetro de este. Lo anterior con el fin

de conseguir una velocidad adecuada para la separación de las gotas de líquido del gas en el fluido proveniente de la corriente de descarga. Se consideraron los niveles indicados en la tabla 8 y las propiedades de GLP al ingreso del tambor amortiguador, calculados en mediante simulación en el software Aspen HYSYS V8 (Tabla 9).

Tabla 8 Dimensiones del tambor amortiguador

DIMENSIONES		NIVELES *		VOLUMEN	
ID (Diámetro - m)	1.530	LLLL (mm)	0	Volumen Geométrico Total (m ³)	8.07
L (Longitud - m)	3.700	LLL (mm)	150		
Área Transversal (m ²)	1.911	HLL (mm)	150		
L/D	2.372	HHLL (mm)	1000		

*Tomados de la configuración de controles en la estación.

Tabla 9 Propiedades GLP entrada al tambor amortiguador

PROPIEDADES DEL FLUIDO	
Densidad del Vapor (lb/ft ³)	0.28
Densidad del Líquido (lb/ft ³)	38.0
Viscosidad del Vapor (cP)	0.0074
k=cp/cv	1.119
Peso Molecular (lb/mol)	49.94
Diámetro de las partículas a ser separadas (µm)	300

Los datos anteriores nos permiten realizar el cálculo de la velocidad de caída de la partícula, el coeficiente de arrastre, y la longitud mínima que debería tener desde la boquilla de ingreso a la de salida, las medidas de referencia se presentan en la

figura 11. Esta longitud debe compararse con la existente para determinar si el recipiente se encuentra dentro de las condiciones óptimas de diseño para su operación (Tabla 10).

Figura 11 Referencia medidas tambor amortiguador

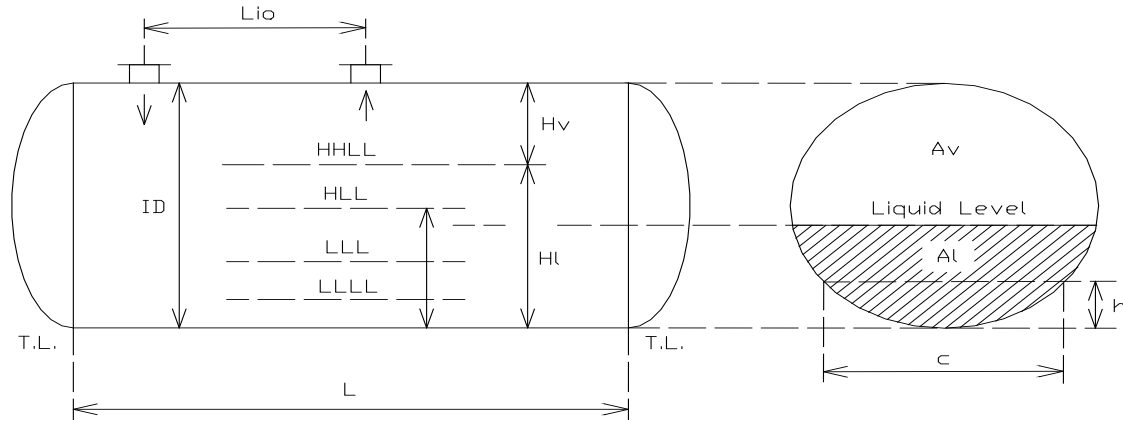


Tabla 10 Resultados diagnóstico Tambor amortiguador

RESULTADOS			
C*(Re) ²			20357
Coeficiente de arrastre, C			0.83
Velocidad de Caída de la Partícula (ft/s)			2.304
Separación Vapor/Líquido			
Lio (m)	3.00	Flujo de Vapor (lb/h)	212495
		Área sobre el HHLL (m ²)	0.617
Lio, mínima (m)	6.10	Velocidad del Vapor (ft/s)	25.097
Contención de Líquido (Hold-Up)			
Flujo de Líquido (lb/h)			60560
Sección de Líquido	Volumen de "Hold-Up" (m ³)	Tiempo de "Hold-Up" (min)	Área Transversal (m ²)
Fondo-LLLL	0.000	0.00	0.000
LLLL-LLL	0.373	0.49	0.094
LLL-HLL	0.000	0.00	0.000
HLL-HHLL	5.264	6.90	1.200

RESULTADOS				
Total (Fondo-HHLL)		5.637	7.39	1.294

Según los resultados el tanque amortiguador no es el adecuado pues se requieren un mínimo de 20 min de recibo del flujo de líquido y en este caso solo se están teniendo 7 min. Igualmente, el Lio mínimo es de 6 metros y en el tambor actualmente instalado se tienen solo 3 metros. Bajo esta condición se presentaría presencia de líquido en la TEA, generando una situación de riesgo. Para cumplir con el tiempo de contingencia de 20 min, se propone un tambor que conserve la relación $L/D = 3$ y permita la separación de partículas de hasta $300 \mu\text{m}$ con las dimensiones propuestas en la tabla 11.

Tabla 11 Dimensiones del tambor propuesto

DIMENSIONES		NIVELES		VOLUMEN	
ID (Diámetro - m)	3.000	LLLL (mm)	0	Volumen Geométrico Total (m ³)	70.69
L (Longitud - m)	9.000	LLL (mm)	150		
Área Transversal (m ²)	7.069	HLL (mm)	2000		
L/D	3.000	HHLL (mm)	2500		

2.2.2.3. Tambor de sello (Figura 12) El tambor de sello del sistema de alivio es un cilindro horizontal de 1.29 m de diámetro y 1.85 m de longitud. Las boquillas de entrada y salida de gas son de 6". La entrada de agua es de 1½"

Figura 12 Tambor de sello



Actualmente no se tiene información en la estación del diseño o configuración interna de este tanque, se pudo observar que presenta un nivel de integridad bajo.

2.2.2.4. Tea El flujo de gas aliviado es dirigido a la tea en una línea de 6". Mostrada en la figura 13.

Figura 13 Tea



La tabla 12 presenta las características de la TEA instalada.

Tabla 12 Características generales de la tea

Altura (ft)	150.9
Diámetro [in]	12
Material	Acero al carbono

Estructura	Derrick
Caudal [BPD]	18000

La plataforma del tipo presenta alto grado de oxidación, la tea es del tipo “utility” o no asistida, es decir que quema sin asistencia de aire o vapor, por lo cual no controla de manera eficiente la combustión, esto se puede evidenciar porque al momento de la quema del producto aliviado, presenta emisión de humo y llama visible. La tea está soportada por una estructura una estructura metálica fija (“Derrick”), esta estructura presenta deterioro y corrosión.

Por lo anterior lo más recomendable es realizar el cambio de la TEA instalada actualmente.

Adicionalmente a la evaluación del estado de los componentes analizados anteriormente, se identifica otra situación de riesgo, y es la disposición del GLP líquido resultante del tambor acumulador, actualmente este hidrocarburo líquido altamente inflamable, es llevado por una bomba de trasiego hacia un sumidero con venteo a la atmósfera, esta situación genera una atmósfera inflamable. Para mitigar esta situación de riesgo, se podría enviar el GLP líquido hacia el almacenamiento de GLP de la refinería (3 km de tubería), realizar la reinyección de GLP a las líneas de transporte de la estación, o como tercera opción realizar la quema total del GLP.

3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE ALIVIO EN EL MANEJO DEL GLP- CASO ESTUDIO

3.1 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS SISTEMA DE ALIVIO

3.1.1. Línea Base En el diagnóstico inicial descrito anteriormente se generaron unas recomendaciones para el cambio parcial o total de los componentes del sistema de alivio instalado, estos cambios requieren una inversión, la cual se estima de manera muy general en la tabla 13, y solo contempla la compra de los equipos.

Tabla 13 Presupuesto inversión línea Base

EQUIPO	COSTO (USD)
Cabezal de alivio y PSV'S	650.000
KO Drum	454.000
Sistema de sello	539.000
<u>TOTAL*</u>	<u>1.643.000</u>

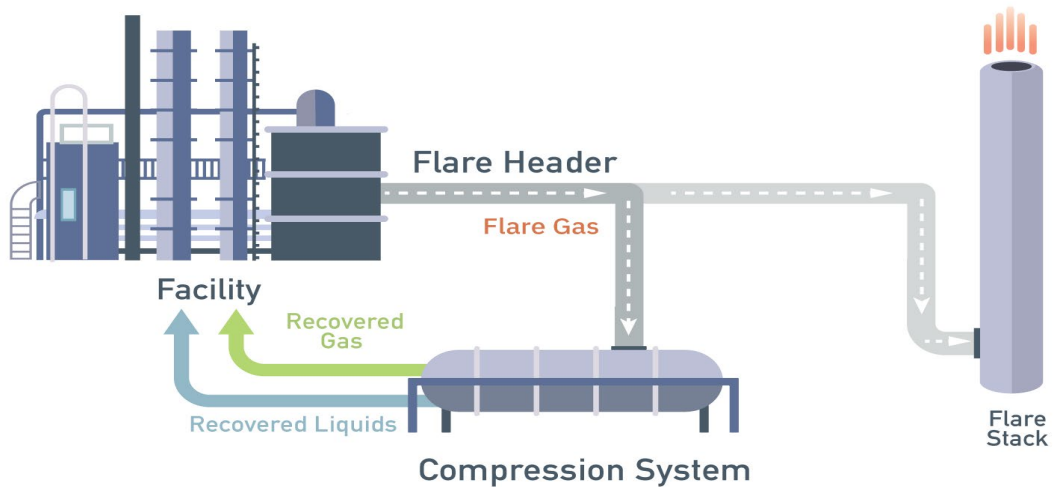
*Exceptuando el cambio total de la TEA, analizado más adelante.

Adicional a esta línea base que solucionaría en el mediano plazo los problemas del sistema de alivio actual, se analizaron otras alternativas tecnológicas emergentes en el mercado, que brindan otras soluciones a la problemática.

3.1.2 Sistema de recuperación de vapores (FGRS- Flare gas recovery system).

Este proceso recupera los gases que normalmente se quemarían en la TEA, para que estos puedan ser usados como gas combustible en el proceso. Esto reduce las emisiones al ambiente y hace el proceso más eficiente. Este sistema puede funcionar con la tea existente, y si esta es de tipo asistida, podrían utilizarse los gases recuperados para el encendido. El proceso es mostrado a continuación en la figura 14.

Figura 14 Esquema sistema de recuperación de vapores.



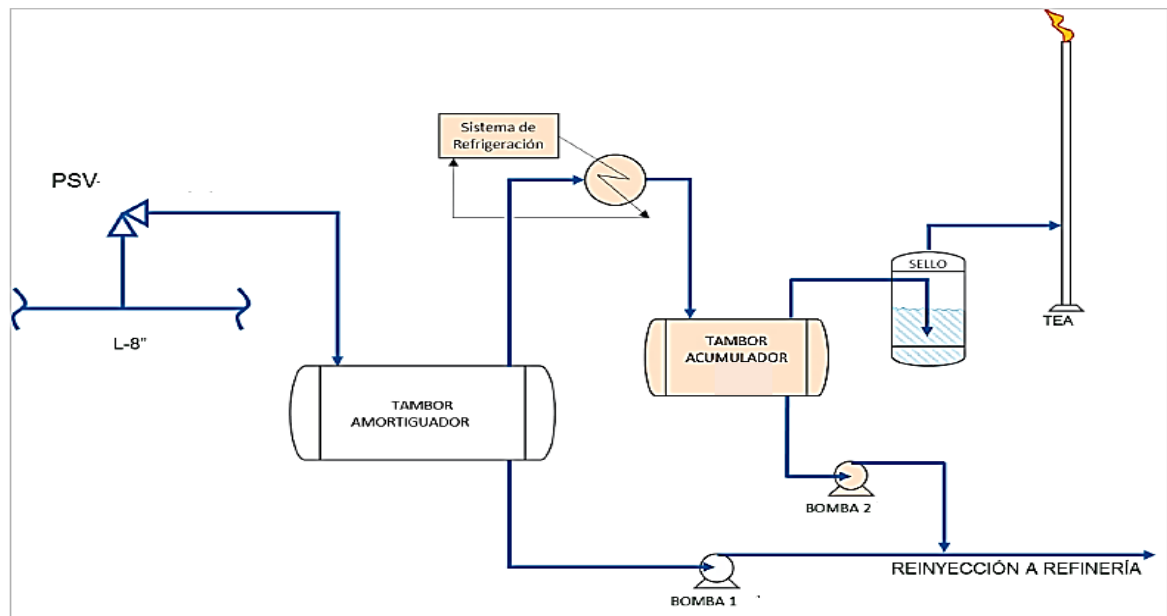
Fuente. <https://www.marathonpetroleum.com/Responsibility/Environmental-Stewardship/>

Un sistema de este tipo se diseña para recuperar los relevos continuos y pequeños de vapores que son asociados a la operación de plantas de producción en una refinería. Es decir, no son normalmente diseñadas para el recibo de un 100% del flujo en una situación de emergencia (flujo total de relevo de la PSV). Si quiere utilizar este sistema para recibir los flujos originados en una situación de emergencia

en la línea de 8", la capacidad de la FGRS necesaria sería 10 veces mayor que la del mayor de estos sistemas instalado en el mundo. Se decide descartar el uso de esta alternativa, por su inviabilidad económica y operativa para la necesidad actual.

3.1.3. Condensación refrigerada Esta tecnología contempla un sistema de refrigeración, utilizando como fluido refrigerante el nitrógeno. Los líquidos recuperados podrían llevarse a la refinería, o reinyectarse a la línea de transporte de 8". De esta manera se minimizan los flujos de quema hacia la TEA. Este sistema es diseñado para utilizar la TEA existente en el proceso. En la figura 15 se presenta un esquema del proceso propuesto.

Figura 15 Esquema operativo sistema condensación refrigerada



En este caso, adicional a los equipos contemplados en la línea base, se añadirían: El sistema de refrigeración, un tambor amortiguador, y una bomba de recuperación.

Sistema de refrigeración:

Se conforma por intercambiador de calor que en este caso funciona como fluido de intercambio el nitrógeno, el cual, remueve el calor de la corriente de proceso y condensa el vapor. Para la composición del GLP, se estima que se debe enfriar el vapor de GLP hasta -46°F para garantizar la condensación de este a las condiciones de relevo. Con base en este requerimiento se calculan las características principales del sistema de refrigeración que se muestran en la tabla 14.

Tabla 14 Características intercambiador de calor GLP

Calor por retirar (MMBTU)	Área de transferencia requerida (ft ²)	Flujo Nitrógeno (lb/hr)
14.2	1040	215000

Bajo ese esquema, considerando, el segundo tambor acumulador, y la segunda bomba de trasiego, de especificaciones similares a los del caso base, se presenta un presupuesto estimado que se presenta en la tabla 15 el cual solo contempla la compra de equipos.

Tabla 15 Presupuesto inversión condensación refrigerada

EQUIPO	COSTO (USD)
Cabezal de alivio y PSV'S	650.000
KO Drum	454.000
Sistema de sello	539.000
Condensador (Intercambiador)	575.000
Tambor acumulador	396,000

Bomba trasiego	171.000
<u>TOTAL*</u>	<u>2,785.000</u>

*Exceptuando el cambio total de la TEA, analizado más adelante

3.1.4. Presurización En esta alternativa, la diferencia principal comparado con la línea base, son las condiciones de diseño y operación del tambor acumulador (KO DRUM), pues la filosofía para evitar la quema de GLP y obtener la recuperación de producto, se basa en operar el KO DRUM en condición de presión tal que el GLP relevado permanezca en estado líquido y pueda ser inyectado de vuelta a la línea de 8”.

- Tambor acumulador (KO DRUM): Debe cumplir las especificaciones para almacenamiento presurizado contenidas en las normas internacionales: API 620 (Recommended Rules for Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks), API 2000 (Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks), API 2510 (Design and Construction of Liquefied Petroleum Gas Installations), API 2510 A (Fire Protection Considerations for the Design and Operation of Liquefied Petroleum Gas Storage Facilities) y NFPA 58 (Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases).

Según lo anterior, las protecciones necesarias que debe tener este tipo de tanque de almacenamiento de GLP presurizados con las siguientes:

- Instrumentación: Sensores de nivel independientes (3) con diferente tecnología para asegurar una correcta medición del nivel dentro del equipo y no tener sobrellenado.
- Sistema Fire & Gas: Detectores de fuga, sensores de temperatura y presión, para asegurar respuesta automática en caso de emergencia.
- Anillos contraincendios alrededor del tambor: Instalación de red de agua contraincendios alrededor del tambor asegurando que el agua de estos anillos pueda cubrir en su totalidad la superficie del tanque en caso de presencia de fuego.
- Hidrantes monitores: Se requiere la instalación de hidrantes monitores para contrarrestar escenarios de fuego en el tambor o alrededores.
- Válvulas motorizadas SDV (Shut-Down Valve): Se deben instalar este tipo de válvulas y configurarlas de tal forma que, en caso de una emergencia, corten el flujo de GLP al tanque presurizado.
- Válvulas de NO Flujo: Estas válvulas se deben instalar para evitar flujos incontrolados de GLP a la atmósfera.
- PSV en el tambor: Ya que este tanque va a estar conteniendo presión, se deben instalar estas válvulas de alivio en el tanque conectadas directamente a la TEA para aliviar vapores en caso de una emergencia por sobre presión.

Bajo las condiciones descritas anteriormente, se presenta un estimado general de las inversiones requeridas para esta alternativa (Tabla 16), el cual solo contempla compra de equipos.

Tabla 16 Presupuesto inversión presurización

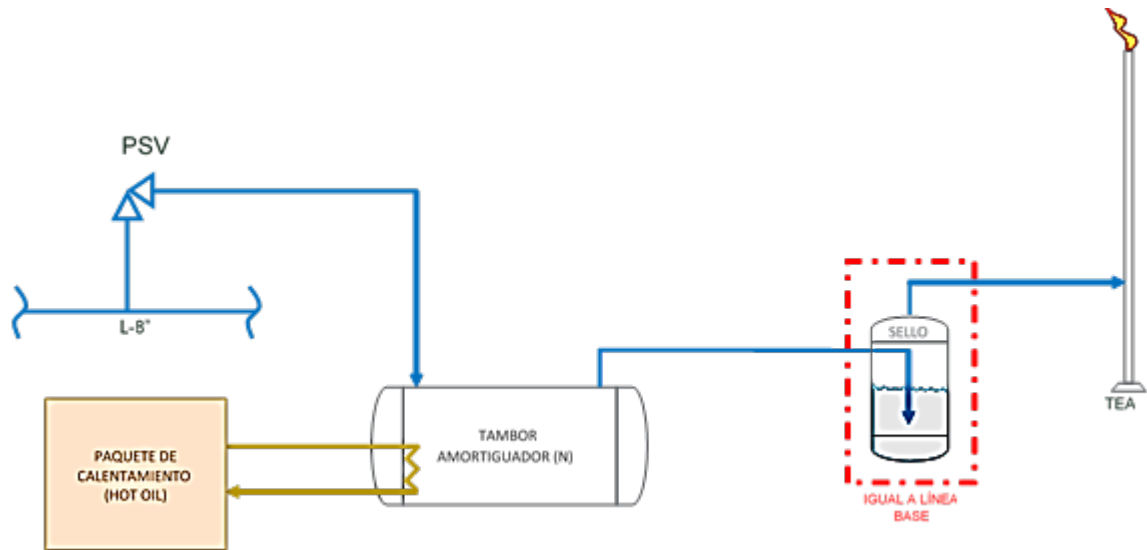
EQUIPO	COSTO (USD)
Cabezal de alivio y PSV'S	650.000
KO Drum	660.000
Sistema de sello	539.000
Bomba trasiego	171.000
<u>TOTAL*</u>	<u>2,020,000</u>

*Exceptuando el cambio total de la TEA, analizado más adelante

En este caso, para poder reinyectar el GLP relevado a la línea de 8", se debe esperar que en la línea se tenga flujo (pues no opera de manera constante), esta espera implica un sobre diseño en el cupo de almacenamiento de los tambores para mantener la seguridad operativa de la estación después de un evento de relevo. Igualmente, se evaluó la disposición de GLP a la refinería, la cual resulto ser una opción inviable debido a las múltiples conexiones que se deben realizar, evaluados en aproximadamente 1,62 MUSD, así como reevaluar la capacidad de la refinería para el relevo, y cambiar procedimientos de esta.

3.1.5. Evaporación Esta alternativa contempla la evaporación del GLP líquido y combustión de todo el GLP relevado, mediante el calentamiento del líquido almacenado en el tambor amortiguador por un intercambiador que utiliza como fluido de calentamiento Hot Oil (Figura 16). De esta manera se elimina el riesgo que se presenta al llevar el GLP líquido al sistema de sumidero con venteo a la atmosfera.

Figura 16 Esquema operativo sistema Evaporación



Bajo el proceso descrito anteriormente se presenta un estimado de inversión para la alternativa de evaporación (ver tabla 17), este presupuesto solo contempla la compra de equipos.

Tabla 17 Presupuesto inversión Evaporación

EQUIPO	COSTO (USD)
Cabezal de alivio y PSV'S	650.000
KO Drum	454.000
Sistema de sello	539.000
Hot Oil	449.000
<u>TOTAL*</u>	<u>2.092.000</u>

3.1.6. Comparación de Alternativas Para este análisis se exceptúan los costos que son iguales para todas las alternativas, por lo cual no tienen carácter decisivo, estos sistemas comunes para todas las alternativas son:

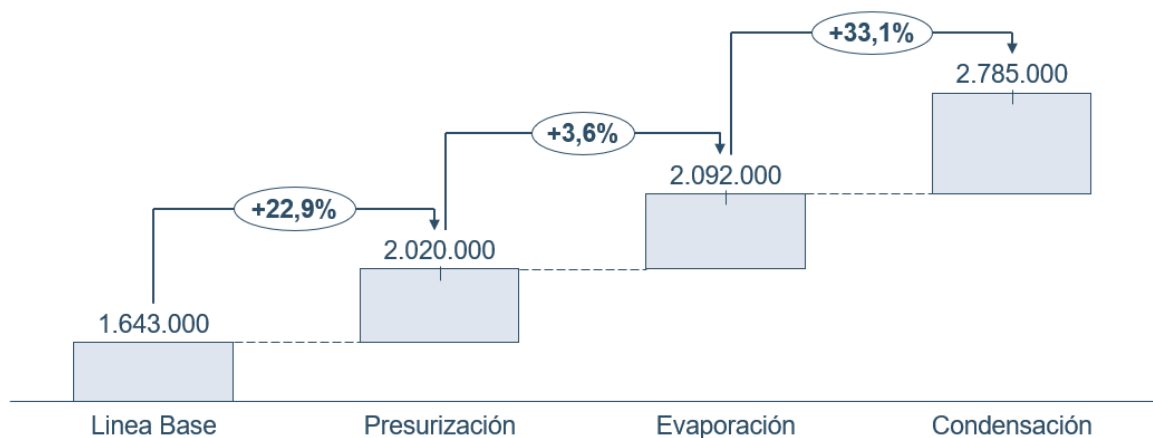
- Costo de TEA (Analizado más adelante)
- De comisionamiento de las facilidades existentes
- Adecuaciones eléctricas

Adicionalmente en este análisis no se contempla los costos OPEX (de operación y mantenimiento), para cada una de las alternativas planteadas.

A continuación, se presenta el análisis comparativo de las alternativas, cabe resaltar que la alternativa analizada FGRS se descarta tanto técnicamente como económicamente tan cómo se describe en el punto 3.1.2.

En la figura 17 se presenta el resumen de la inversión para las alternativas planteadas.

Figura 17 Comparación costo alternativas sistema de alivio



De estas cuatro alternativas sobrantes se descarta la alternativa de condensación por su costo, quedando para el análisis tres alternativas: Línea Base, Evaporación y Presurización.

De estas tres alternativas se realiza un análisis de riesgos, concluyendo que, no es aceptable a nivel de compañía el nivel de riesgo que implica tener un tanque presurizado dentro de instalaciones del sistema de transporte que maneja otros líquidos combustibles, además de esto, incluir este tanque implica cambiar la filosofía de control y operación de la planta, así como todos los procedimientos, planes de manejo ambiental, e infraestructura de protecciones, generando costos adicionales. Todos los cambios para realizar adicionales no son compensados con la probabilidad de recuperar el producto líquido, pues el alivio desde las válvulas de no es un flujo constante, y solo se presentaría flujo en eventos de sobrepresión.

En conclusión, se decide que la alternativa más viable tanto económicamente como operativamente, considerando la disminución de los riesgos latentes en la estación es la alternativa de evaporación, esta como solución a los problemas de baja integridad, diseño y riesgo de parte del sistema de relevo. Sin embargo, esta no es la solución total, pues hay que analizar el cambio de la TEA, el cual se revisará a continuación.

3.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TEA

Con base en lo analizado anteriormente, se hace necesario el reemplazo de la TEA, por una que cumpla con la normativa actual, requerimientos ambientales y sea segura para la operación. En este análisis comparativo se tuvieron en cuenta tres tipos de quemadores:

- i. Incinerador Térmico (Thermal Oxidizer)
- ii. Tea Smokeless. Tea convencional asistida por aire.

iii. Tea Encapsulada. NO radiación no emisiones.

3.2.1. Incinerador Térmico (Thermal Oxidizer) Unidad de proceso para el control de la contaminación del aire que descompone gases peligrosos (incluyendo Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno, BTEX) en un calor de altas temperaturas y de prensa (Que se puede recuperar), vapor de agua y dióxido de carbono a la atmósfera. Alcanzan eficiencias de destrucción hasta del 99.9%. Este equipo usa un sistema de control activo para asegurar que los parámetros de diseño que afectan la eficiencia y seguridad del equipo se mantengan en los niveles apropiados en todo momento durante su operación. Al analizar esta opción se tienen las siguientes observaciones:

- Estos incineradores están diseñados normalmente para manejar un flujo continuo de gases residuales.
- Para asegurar la quema completa del gas de proceso, se necesita una inyección de gas combustible, por ejemplo, gas natural, con el fin de elevar la temperatura de combustión.
- Si el flujo de relevo está en estado líquido, se necesita atomizar el fluido y mezclarlo con el aire para llevar a una concentración que este dentro del límite inferior de explosividad.

Por las consideraciones anteriores, el incinerador térmico no es una opción viable, pues el flujo a recibir no es constante, tiene requerimientos adicionales de combustible, que obligaría a tener almacenamiento e inventario y a manejar un gas

combustible adicional en la estación, además de atomizar el flujo de entrada en cada escenario de relevo.

Figura 18 Incinerador Térmico




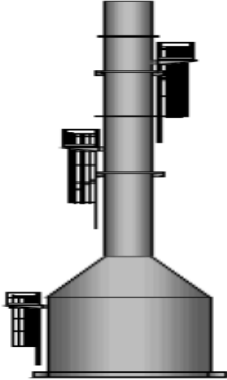
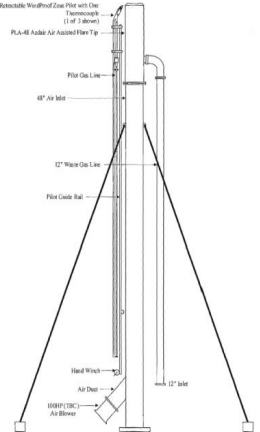
Fuente. <http://www.zeeco-therme.com>

3.2.2. TEA convencional asistida por aire (SMOKELESS) El objetivo de este tipo de TEA es el de garantizar una combustión completa adicionando aire al gas residual de quema, por lo tanto, se tiene una quema limpia y son humo negro visible. Este aire se agrega en el Tip de la TEA.

Como este tipo de sistema es altamente comercial, se solicitó al mercado cotizaciones, los resultados se presentan en la tabla 18.

Tabla 18 Opciones TEA Smokeless

Proveedor	Tornado	Zeeco	John Zink Hamworthy
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Soportada por guayas. - Incluye sello de velocidad. - Incluye sopladores de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Auto soportada. - Incluye sello de velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Soportada por guayas. - Incluye sello de velocidad. - Incluye sopladores de aire.
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> - Altura: 85 ft - Diámetro: 48 in 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura: 50 ft - Diámetro: 16 in 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura: 75 ft - Diámetro: 48 in

Costo (USD)	541,000	398,650	375,000
Esquema			

3.2.3. TEA Encapsulada Este tipo de TEA usan un diseño eficiente de quemador para proveer operación sin humo dentro de una cámara de combustión que concentra la llama. La cámara de combustión esta normalmente cubierta de un material refractario para dar un buen tiempo de servicio y también reducir los niveles de ruido.

Entre las ventajas de este tipo de Teas se tiene:



- Quemado limpio y sin generación de humo.
- No hay radiación a los alrededores de la unidad.
- No hay visibilidad de las emisiones ni de la llama.
- Bajo ruido.
- No requiere asistencia de aire o vapor.
- Adaptable a un amplio rango de presiones de gas.
- Alta eficiencia de combustión y destrucción.

- Diseño seguro con mantenimiento bajo y larga vida útil.

- Bajo costo de operación.

En la tabla 19 se presenta el resultado de las propuestas comerciales adquiridas con dos distribuidores internacionales reconocidos en el diseño de TEA.

Tabla 19 Opciones TEA encapsulada

Proveedor	Zeeco	John Zink Hamworthy
Dimensiones (ft)	-Altura: 70 ft - Diámetro: 20 ft	-Altura: 57 ft - Diámetro: 33 ft
Precio (USD)	2,340,000	1,750,000
		
	Figura 19 Tea Zeeco	Figura 20 Tea John Zink Hamworthy

Esta opción presenta las mejores ventajas en temas ambientales y de seguridad, sin embargo, su costo es bastante elevado. Por su parte las TEA smokeless,

cumplen con los requerimientos normativos, de seguridad, además, subsana la condición actual de deterioro de la TEA existente.

Con base en los análisis descritos anteriormente, se considera que la mejor opción es la TEA tipo Smokeless del proveedor John Zink Hamwothy, pues cumple con los requerimientos operativos y de seguridad requeridos, además de presentar el precio más competitivo en el mercado.

3.3. ANÁLISIS COSTO – EFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE ALIVIO

Con el análisis técnico y económico de alternativas presentado anteriormente, se puede realizar un análisis de todo el sistema de alivio (incluyendo la tea), para realizar la propuesta de diseño para las siguientes fases del proyecto. En la tabla 20 se presenta comparativa de los sistemas de alivio.

Tabla 20 Resumen Costo-Beneficio sistema Alivio

Tipo Sistema Alivio	Tipo TEA	Costo Total (USD)	Efectividad
Línea Base	Smokeless (John Zink Hamwothy)	\$ 2.018.000	No soluciona la problemática de riesgo por disposición de GLP líquido – Nube inflamable.
Presurización	Smokeless (John Zink Hamwothy)	\$ 2.395.000	Añade otro factor de riesgo al tener un tanque presurizado. La reinyección agrega costos y cambios operacionales.
Evaporación	Smokeless (John Zink Hamwothy)	\$ 2.467.000	Soluciona la problemática de riesgo al quemar el GLP, además de los problemas de integridad de la TEA mediante su reemplazo total.

Al escoger la alternativa de evaporación se genera una mejora importante en la seguridad del proceso de alivio por sobrepresión en la estación de GLP, pues con esta se elimina el riesgo que se presenta por llevar el GLP que es acumulado en el tambor acumulador a un sistema abierto, lo cual como se mencionó anteriormente genera nubes inflamables. En adición a esta solución, se suprimen los problemas de integridad y seguridad que se tiene en la TEA instalada mediante la compra e incorporación al sistema de una TEA nueva, confiable y con un sistema de control actualizado, que represente confiabilidad en la operación de quema de combustible en momentos de descargue de producto debido a sobrepresiones.

4. CONCLUSIONES

- El sistema de alivio deber se evaluó como un elemento crítico del proceso, por criterios de seguridad, lo cual genero optimizaciones en su diseño, generando una recomendación para el cambio de las válvulas PSV, el cabezal de alivio, el sistema de quema de manejo de los líquidos combustibles, y por último el elemento final de quema (TEA). Minimizando en gran medida los riesgos latentes para la operación y el personal involucrado.
- La condición actual del sistema de relevo de GLP desde el punto de integridad y de seguridad del proceso, representa riesgos para la operación y para el personal de la estación.
- El diseño y la configuración de los equipos existentes generan las siguientes situaciones:
 - ✓ Riesgo por desconocimiento de integridad de cabezal de alivio enterrado.
 - ✓ Riesgo por no evacuación de flujo de descarga en caso de sobrepresión por el no manejo de contrapresión de las válvulas de alivio instaladas actualmente.
 - ✓ Arrastre de líquido a la TEA durante los relevos.
 - ✓ Condiciones de congelamiento del agua en el tambor de sello.
 - ✓ Disposición inadecuada e insegura del GLP recuperado a un sistema abierto con la generación de nube de vapor de hidrocarburo.

- La alternativa seleccionada para implementación es la de evaporación incluyendo el cambio de TEA tipo Smokeless, porque cumple con los beneficios requeridos de seguridad, y es competitiva en términos económicos.
- El proyecto deberá contemplar un rubro adicional durante la ejecución de los trabajos asociados al reemplazo de la tea existente, el cual es el alquiler de una **Tea Provisional** con un costo aproximado de **1,3 MMUSD.** por un año aproximado de montaje de la nueva instalación.

5. RECOMENDACIONES

- Se debe continuar con una ingeniería de detalle, donde se relacionen los gastos energéticos de la alternativa escogida, así como los elementos asociados al sistema de control y sistema eléctrico que se necesitarían para la implementación.
- Se debe realizar un presupuesto que incluya tanto el CAPEX de compra de equipos, como el opex asociado a la operación de los nuevos equipos, el costo de los nuevos canales de control requeridos, el costo del mantenimiento de cada uno de estos, el costo del aceite necesario para el intercambiador a instalar, y costos adicionales involucrados con la logística asociada.
- Se debe tener en cuenta la actualización de todos los instructivos operativos asociados con el sistema de alivio una vez se implemente la alternativa, así como un esquema de capacitación tanto a operadores como mantenedores para las nuevas operaciones y equipos a implementar.
- Se debe construir un plan de seguimiento y control para el proyecto con etapas y entregables para cada disciplina relacionada, para dar el aval del cumplimiento de la promesa de valor de la inversión, así como tener control de tiempo y ejecución.

BIBLIOGRAFÍA

2007 ASME. Boiler & Pressure Vessel Code, Section I - Rules for Construction of Power Boilers.

2007 ASME. Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels. Division I.

Anderson Greenwood Crosby. *Technical Seminar Manual*. 2001.

ANSI/API Standard 521 (ISO 23251). Pressure-Relieving and Depressuring Systems. Fifth Edition, January 2007.

ANSI/ISA-75.05.01-2000. *Control Valve Terminology*.

API Publication 2510A. Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of Liquefied Petroleum Gas (LPG). Second Edition,

API Standard 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure Relieving Devices in Refineries. Part I – Sizing and Selection. Eighth Edition, December 2008.

API Recommended Practice 520. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part II – Installation. Fifth Edition, August 2003.

CASAL, Joaquim. MONTIEL, Helena. PLANAS, Eulaia, VÍLCHES, Juan A. Análisis de riesgo en instalaciones industriales. Barcelona. Ediciones UPC.

BOTTA, Nestor Alfonso. Listado de los grandes accidentes mundiales. {En Línea}. Disponible en:

(https://www.redproteger.com.ar/escueladeseguridad/grandesaccidentes/grandes_accidentes.htm)

GPSA. Section 5 – Relief Systems. Volume II. 11th Edition – FPS, 1998.

GPSA. *Section 6 – Storage. Volume II. 11th Edition – FPS, 1998*

J Ma STORCH de Gracia, T. GARCIA Martin. Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño. 2ª Edición. 2008.

LOPEZ, Javier. Análisis cuantitativo de riesgos de redes de tuberías de transporte de sustancias peligrosas. Trabajo de grado (Ingeniería Química) 2020.

Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8th Edition. McGraw-Hill. 2007.