

**Seguridad en la Logística del GLP, Normativas, Protocolos y Buenas prácticas para
Minimizar Riesgos en el Almacenamiento y Transporte**

MONOGRAFÍA

Autor

Pedro Elías Delgado Cristancho

Asesor

Julián Alberto Sarria

Universidad Santo Tomas

Escuela de ingeniería

Ingeniería en logística y Operaciones

2025

DEDICATORIA

A mi padre, cuya dedicación en su oficio trascendió cada puntada para convertirse en un ejemplo de perfección, su trabajo no solo vestía cuerpos, sino también valores: el cuidado por el detalle, la constancia silenciosa y el orgullo de hacer bien las cosas sin necesidad de aplausos. Este trabajo lo dedico a él, con gratitud eterna, porque su legado vive en mi búsqueda de la excelencia y en cada decisión que toma la forma del rigor y el respeto.

AGRADECIMIENTOS

Con profunda gratitud, dedico estas líneas a quienes han sido pilares fundamentales en este proceso.

A mi esposa, por su paciencia incansable, su amor firme y su apoyo constante, su compañía en los momentos de incertidumbre y su confianza en mis capacidades ha sido fundamental para alcanzar esta meta. A mis tres hijos, fuente permanente de inspiración, alegría y propósito, pues cada paso que doy está guiado por el deseo de ser un ejemplo para ellos.

Finalmente, quiero extender mi agradecimiento a Granados Gómez, la empresa que me abrió sus puertas y me brindó la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente. Su confianza renovada tras cerrar mi ciclo en el sector minero de más de 23 años me permitió transformar un momento de dificultad en un nuevo comienzo lleno de aprendizaje y retos que motivaron este trabajo.

RESUMEN

El Gas Licuado de Petróleo, históricamente relevante en el ámbito doméstico colombiano, ha recobrado protagonismo en la matriz energética nacional gracias a su poder calorífico y versatilidad logística. Este estudio analiza los riesgos operativos asociados al almacenamiento y distribución del GLP, abordando la normativa vigente, protocolos de seguridad y buenas prácticas aplicadas en Colombia. Mediante una metodología cualitativa y documental, se revisan fuentes normativas, técnicas y académicas que permiten identificar los principales desafíos logísticos, evaluar la eficacia del marco regulatorio, y explorar tecnologías emergentes como sensores IOT y sistemas de monitoreo inteligente. Este estudio plantea diversas tácticas orientadas a optimizar la seguridad, el rendimiento operativo y la sostenibilidad dentro de la cadena de suministro, promoviendo una administración más consciente y responsable del gas licuado de petróleo. Se destaca la necesidad de fortalecer la cultura preventiva, optimizar el uso de tecnologías, y fomentar la articulación entre reguladores, empresas y actores del sector.

Palabras clave: GLP, Logística, envasado, almacenamiento, transporte, requerimientos, tendencias, tecnología.

ABSTRACT

Liquefied Petroleum Gas, once the dominant household fuel in Colombia, has regained prominence in the national energy transition due to its high calorific value and logistical advantages. This thesis examines the operational risks involved in LPG storage and distribution, focusing on Colombian regulatory frameworks, safety protocols, and best practices. Through a qualitative and documentary approach, the study reviews legal, technical, and academic sources to identify key logistical challenges, assess the effectiveness of current regulations, and explore emerging technologies such as IoT sensors and intelligent monitoring systems. This study presents various tactics aimed at optimizing security, operational performance, and sustainability within the supply chain, promoting a more conscious and responsible management of liquefied petroleum gas. The need to strengthen the preventive culture, optimize the use of technologies, and encourage coordination among regulators, companies, and sector actors is emphasized.

Keywords: *LPG, Logistics, packaging, storage, transportation, requirements, trends, technology.*

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
JUSTIFICACIÓN	12
OBJETIVOS	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos	13
MARCO TEÓRICO.....	14
Fundamentos del Gas Licuado de Petróleo	14
Composición Química	14
Propiedades físico químicas relevantes	14
Usos Industriales o Comerciales	15
Consumo Nacional.....	16
Elementos de un sistema de GLP	17
Cadena de valor del Gas Licuado de petróleo	18
Producción e importación	19
Almacenamiento	19
Distribución y expendio al público	20
METODOLOGIA.....	20
(1) Planteamiento de las preguntas de investigación.....	21
(2) Recolección de la información.....	22
Criterios de inclusión y de exclusión.....	22
RESULTADOS.....	24
(3) Análisis de los Resultados	24

Organización de la información.....	25
Análisis Taxonómico	29
DISCUSIÓN	40
Seguridad Industrial y Regulación del Gas Licuado de Petróleo	40
Caracterización del producto	40
Marco Normativo de Gas Licuado de Petróleo	41
Seguridad de Procesos	42
Identificación de peligros.....	43
Control del Riesgo	48
Medidas de prevención.	52
Tecnologías aplicadas al gas licuado de petróleo	55
Tecnologías utilizadas en el almacenamiento.....	55
Sistemas de medición estáticos	55
Sistemas de medición automática	55
Sensores IOT.....	56
Sistemas de monitoreo en tiempo real	58
Tecnologías utilizadas en el envasado	59
Tecnologías utilizadas en la distribución.....	61
Seguimiento GPS	61
Trazabilidad de producto	61
Automatización de procesos	62
Nuevas tendencias en el almacenamiento y distribución del GLP	64
Optimización de Rutas y procesos.....	64

Modelos de Optimización	64
Aplicación de software para inventarios de tanques.....	67
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Ventas de GLP reportadas al Sistema Único de Identificación	17
Ilustración 2. Resultados obtenidos en los buscadores de las bases de datos consultadas	24
Ilustración 3. Marcaciones por documento	29
Ilustración 4. Documentos acuñados por nivel o clase	30
Ilustración 5. Documentos que contienen los elementos de la cadena de suministro.....	33
Ilustración 6. Aporte de los documentos al propósito del estudio	35
Ilustración 7. Tipo de fuente de información.....	36
Ilustración 8. Documentos que describen modelos de gestión	37
Ilustración 9. Documentos seleccionados por subclase	39

Lista de Tablas

Tabla 1. Composición de Gas Licuado de Petróleo	14
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del GLP.	15
Tabla 3. Distribución del consumo mundial de GLP.....	16
Tabla 4. Matriz de clasificación taxonómica de documentos	28
Tabla 5. Clasificación de atmósferas	50
Tabla 6. Aplicaciones de los sensores IOT en la industria	63

INTRODUCCIÓN

Según Ministerio de Minas y energía (2025), desde la década de los treinta y hasta el final de los cuarenta, el GLP fue el combustible más ampliamente utilizado en los hogares colombianos, sin embargo, la construcción de los primeros gasoductos, impulso rápidamente el uso del gas natural, pues al ser más económico y de menores emisiones contaminantes resulto mucho más atractivo para los consumidores, reteniendo una buena parte del mercado. En el contexto de la transición energética nacional, el gas licuado de petróleo ha emergido como un recurso de creciente relevancia. Su versatilidad, disponibilidad y menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles han favorecido su incorporación progresiva en diversos sectores, además, su mayor poder calorífico ofrece mayor eficiencia y sus propiedades fisicoquímicas le permiten ser licuado, facilitando su transporte. Sin embargo, su naturaleza inflamable y el uso de sistemas presurizados con vapor y líquidos en extremo fríos, lo convierten en una sustancia de alto riesgo, especialmente durante las etapas de almacenamiento y transporte. En este contexto, la logística del gas licuado de petróleo exige la implementación rigurosa de normativas, controles operacionales, protocolos de seguridad y buenas prácticas que garanticen la seguridad. En Colombia, la manipulación del GLP está respaldada por un marco normativo robusto, guías internacionales y buenas prácticas promovidas por asociaciones e industrias que complementan los estándares locales. Esta monografía tiene como propósito analizar los principales riesgos asociados a la logística del GLP y examinar las normativas, protocolos y buenas prácticas que permitan minimizarlos, para aportar herramientas que fortalezcan la seguridad operativa de los procesos, complementar las estrategias de gestión del riesgo e identificar las tecnologías actuales y emergentes que permitan un uso más eficiente y responsable del recurso a través de un enfoque técnico y documental.

JUSTIFICACIÓN

La manipulación del Gas Licuado de Petróleo representa un alto riesgo en toda su cadena logística, esto se debe no solo a la naturaleza inflamable de su composición, sino a las condiciones particulares que deben mantenerse durante su almacenamiento y transporte. A pesar de los controles estatales, recientemente se han presentado varias emergencias relacionadas con la manipulación de gases combustibles en Colombia, las causas identificadas incluyen el no controlar fugas en mangueras y flexibles, realizar movimientos de tanques con producto y ejecutar tareas de mantenimiento bajo condiciones de riesgo. Estos eventos, muchas veces atribuibles a deficiencias en la aplicación de protocolos de seguridad, falta de capacitación, excesos de confianza o ausencia de tecnologías de monitoreo, evidencian la falta de control en las maniobras, así como una ausencia de cultura de prevención.

En este contexto, surge la inquietud sobre la efectividad de las normativas vigentes, la implementación de buenas prácticas, el uso de tecnologías disponibles o la falta de innovación en este sector. Pero ¿Cuáles son los requisitos normativos y de seguridad aplicables para la comercialización del gas licuado de petróleo en Colombia? ¿Las empresas del sector aplican de forma adecuada estos lineamientos? ¿Cuáles son las tecnologías más utilizadas actualmente en manipulación del gas licuado de petróleo, y cómo contribuyen a la eficiencia del proceso? y ¿Cuáles son las tendencias emergentes y tecnologías innovadoras que definirán el futuro del almacenamiento seguro y eficiente de este combustible? Estas preguntas motivan el presente estudio, que busca analizar los riesgos y desafío logístico del GLP para identificar las mejores estrategias que aporten al conocimiento útil para empresas, reguladores y profesionales del sector logístico, promoviendo una gestión más eficiente y responsable del Gas Licuado de Petróleo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar las condiciones de seguridad asociadas a la cadena de suministro del gas licuado de petróleo, en función de los requisitos regulatorios, protocolos técnicos y criterios de operación segura.

Objetivos Específicos

- Revisar las metodologías estandarizadas para la gestión de riesgos operativos en el contexto del GLP, considerando su aceptación y aplicación práctica en el sector.
- Examinar las tecnologías consolidadas que intervienen en la modernización de la cadena de suministro del GLP, desde el almacenamiento hasta la distribución.
- Analizar las tendencias emergentes orientadas a mejorar la seguridad operativa y optimizar la logística en las etapas de almacenamiento y distribución del GLP.

MARCO TEÓRICO

Fundamentos del Gas Licuado de Petróleo

Composición Química

Venegas, Ayabaca, Salvatore, Tipanluisa, & Farías (2024) señala que:

El término gas licuado de petróleo se usa para nombrar a algunos hidrocarburos que se pueden conservar en estado líquido a temperatura ambiente y con presiones no tan elevadas, como es el caso del etano, propano y butano. El GLP comercializado en Colombia lo conforman principalmente el butano (C_4H_{10}) y el propano (C_3H_8), con una pequeña cantidad de compuestos más ligeros y pesados, como etano y pentano, y se produce como un subproducto de los procesos de refinación y producción de gas natural y petróleo crudo. (p. 82) [15].

Tabla 1. Composición de Gas Licuado de Petróleo

COMPONENTE	PORCENTAJE
PROPANO	41.06
N-BUTANO	31.31
ISOBUTANO	25,77
ETANO	0.84
ISOPENTANO	0.41
NITROGENO	0.1

Nota. Adaptado de Ficha de Datos de Seguridad GLP Ventas Cupiagua, 2023, Ecopetrol

Propiedades físico químicas relevantes

Según Venegas, Ayabaca, Salvatore, Tipanluisa, & Farías (2024), El Gas Licuado de Petróleo (GLP) destaca en el ámbito industrial por su elevada eficiencia energética, atribuida a su

notable poder calorífico en comparación con otras fuentes. El Gas Licuado de Petróleo, aunque normalmente se encuentra en estado gaseoso, puede ser licuado mediante ajustes en su presión y temperatura, lo que facilita su manejo y almacenamiento. En forma líquida, presenta un peso específico cercano a 0.55 kg/m^3 . Al entrar en contacto con el ambiente, se evapora rápidamente, aumentando su volumen hasta 270 veces. Debido a su densidad relativa de 1.53 en comparación con el aire, tiende a acumularse en áreas bajas. En estos espacios, la presencia de una fuente de ignición puede desencadenar una explosión, ya que el GLP forma mezclas inflamables cuando su concentración se encuentra entre el 2 % y el 10 % [15].

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del GLP.

PROPIEDAD	PARAMETRO
PESO ESPECIFICO FASE LIQUIDA	0.55 kg/m^3
PODER CALORIFICO	50.3 MJ/m^3 o $12\,000 \text{ kcal/m}^3$
PRESION Y T ° EN ESTADO GASEOSO	1 atm a $25 \text{ }^\circ\text{C}$
LIMITE INFERIOR DE EXPLOSIVIDAD	2%
LIMITE SUPERIOR DE EXPLOSIVIDAD	10%
PUNTO DE EBULLICION	Propano: $-42 \text{ }^\circ\text{C}$ / Butano: $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
OLOR	NO
SOLUBLE EN EL AGUA	NO

Nota. Adaptado del Artículo Sistemas de gas licuado de petróleo: Una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento. Venegas, D., Ayabaca, C., Reina, S., Tipanluisa, L. y Farías, O. (2024).

El GLP no tiene olor perceptible en su estado natural, de acuerdo con la información recolectada es un gas incoloro e inodoro, pero con el propósito de facilitar la detección de fugas se le agrega un compuesto químico odorante llamado etil mercaptano.

Usos Industriales o Comerciales

Bazán, y otros (2019), señalan que:

El gas licuado de petróleo es usado para diferentes aplicaciones alrededor del mundo, debido a que es estable, contiene gran cantidad de energía, en estado líquido el transporte se puede realizar de manera más económica, se puede emplear tanto en estado gaseoso como líquido, su combustión es limpia y tiene bajos niveles de azufre, siendo estos dos últimos factores favorables para el medio ambiente. En cuanto al uso del gas licuado de petróleo en el sector doméstico, los propósitos más comunes a nivel mundial son para calefacción, cocción de alimentos, mantenimiento del jardín, funcionamiento de termas, así como combustible para almacenar energía en caso de emergencias. (p. 1-2) [34]

Tabla 3. Distribución del consumo mundial de GLP

USOS DEL GLP	PORCENTAJE
Sector Domestico	44
Sector Químico	26
Sector Industrial	12
Sector Transporte	9
Sector Hidrocarburos	8
Sector Agrícola	1

Nota. Adaptado del Artículo Propuesta de mejora en la producción y distribución de gas licuado de petróleo usando herramientas de optimización. Bazán, C., Prado, C., Beltrán, R., Sánchez, L., Rojas, J., y Reyes, S. (2019).

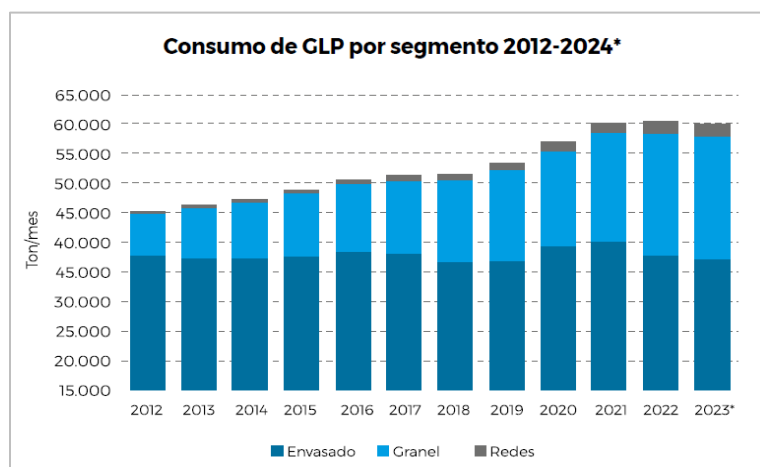
Consumo Nacional

GASNOVA (2025), señala que:

En 2023 el consumo promedio mensual de GLP fue de 61.275 toneladas, mostrando un aumento del 1,5% respecto al año anterior. En el periodo de enero-abril de 2024, el consumo promedio fue de 60.406 toneladas mensuales reflejando un incremento de 2,3% en comparación con el mismo periodo de 2023. Desde 2012, el consumo ha experimentado un notable crecimiento [33%], año en el que se consumieron 45.000 toneladas mensuales, para 2023 se observó crecimiento en el segmento de granel (5,1%)

y redes de distribución urbanas (15,4%), mientras que el segmento de envasado experimentó una ligera disminución (-1,2%). La reducción en envasado probablemente se debe en parte al incremento en consumo en redes, pero particularmente a las condiciones macroeconómicas del país, que han afectado la capacidad de pago de los usuarios de GLP. Durante 2022, 2023 y parte de 2024, el consumo de GLP a través de redes de distribución urbana ha mostrado un crecimiento promedio de 17,5%. Este aumento se ha visto respaldado por el subsidio al consumo y los incentivos otorgados por el Gobierno Nacional para la cofinanciación de proyectos de infraestructura y conexión. (p. 32) [11].

Ilustración 1. Ventas de GLP reportadas al Sistema Único de Identificación



Nota. Adaptado de “Panorama nacional del GLP” (p.32), por la Asociación Colombiana de GLP, 2025, *Guía del gas 2025*.

Elementos de un sistema de GLP

Venegas & Ayabaca (2019) señalan que:

Almacenamiento y Embalaje. Según Venegas & Ayabaca (2019), el almacenamiento corresponde al componente de la cadena encargado de contener el combustible GLP. En planta se provisiona en tanques estacionarios y enseguida se embala en cilindros (por su

peso pueden transportarse fácilmente por un ser humano y se utilizan por recambio) y cisternas de unidades móviles que alimentan tanques (aquellos que se ubican fijos en una instalación y para su funcionamiento deben ser abastecidos desde tanques cisterna por medio de mangueras).

Transferencia o trasiego. Según Venegas & Ayabaca (2019), el trasiego hace referencia a la transferencia de producto desde un tanque o cisterna a otro contenedor por medio de tuberías o conductores de distribución con el apoyo de bombas o compresores y controlado por válvulas, reguladores de presión y elementos de medición o contadores.

Equipos de consumo. Según Venegas & Ayabaca (2019), estos equipos, también llamados gasodomésticos, son los artefactos que utilizan el GLP para satisfacer una necesidad por parte del ser humano. Por su capacidad de generar energía o por su aplicación, estos pueden ser residenciales, comerciales e industriales.

Sistemas de protección o prevención. Según Venegas & Ayabaca (2019), los sistemas de protección son dispositivos usados con el fin de controlar los parámetros de seguridad como presión y temperatura en las diferentes etapas de la cadena, instalados en los contenedores y en los conductores para prevenir accidentes y minimizar riesgos por el manejo del combustible.

Cadena de valor del Gas Licuado de petróleo

En Colombia, el desarrollo del mercado de GLP se articula mediante una cadena de valor integrada por cuatro actividades: 1) producción e importación, 2) almacenamiento, 3) distribución y expendio al público.

Producción e importación

En Colombia, las empresas dedicadas a la comercialización y distribución del gas licuado de petróleo obtienen el producto en los campos de Ecopetrol o lo importan desde Estados Unidos, Trinidad y Tobago o Republica Dominicana, esta decisión depende básicamente de la oferta, ya que Ecopetrol asigna un volumen de venta a cada empresa para determinado periodo. Ya sea nacional o importado, El Gas Licuado de Petróleo (GLP) está compuesto principalmente por hidrocarburos como el propano (C_3H_8) y el butano (C_4H_{10}), cuya proporción varía según el método de obtención y proveedor, por ello, al contar con mezclas distintas, se pueden esperar discrepancias en las propiedades fisicoquímicas de los lotes de gas, lo cual debe ser considerado en la gestión logística del producto, ya que variables como presión y temperatura son determinantes en temas como control de inventarios y la seguridad del proceso.

Almacenamiento

Se entiende por almacenamiento de GLP la acción de reunir y conservar el gas en infraestructuras diseñadas para tal fin, tales como tanques estacionarios fijos instalados en plantas de envasado, tanques estacionarios fijos ubicados en las instalaciones del cliente o en cisternas destinadas al transporte, para ello el producto debe conservarse en fase líquida, lo que se logra incrementando la presión del gas y conservando la temperatura ambiente; refrigerando el gas a presión ambiente o almacenando el producto semi refrigerado y parcialmente presurizado. Estos contenedores pueden ubicarse por encima o por debajo del suelo, requiriendo condiciones particulares dependiendo la elección. Los recipientes utilizados en el servicio público domiciliario de GLP deben ajustarse a los lineamientos establecidos en la Resolución 40245. Su conformidad debe ser respaldada mediante certificación emitida por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) o por entidades extranjeras reconocidas en acuerdos de

equivalencia bajo el marco de la norma ISO 17067:2013. La vigilancia de este cumplimiento corresponde a la Superintendencia de Industria y Comercio.

CILINDROS. Según CREG (2023), un cilindro es un recipiente usado en la prestación del servicio público domiciliario de gas licuado de petróleo, con capacidad entre 5 y 46 kilogramos de gas, puede ser metálico o de construcción compuesta.

TANQUES ESTACIONARIO. Según CREG (2023), un tanque es un recipiente usado en la prestación del servicio público domiciliario de gas licuado de petróleo, con capacidad superior a los 46 kilogramos de gas.

Distribución y expendio al público

En esta etapa el gas licuado de petróleo es cargado en los centros de producción mediante sistemas presurizados integrados por: Un tanque estacionario, una bomba para producto en fase líquida y un compresor que impulsa el producto en fase vapor. El gas se almacena en la cisterna de un tracto camión que cuenta con una capacidad aproximada de 15.000 galones y se moviliza por carretera hasta la planta de envasado. En la planta de envasado se cargan las unidades móviles o carrotanques y se realiza el llenado de los cilindros, el gas a granel se expende al público mediante carrotanque o unidad móvil, realizando un trasiego en sitio para cargar los contenedores ubicados en las instalaciones del cliente. Por otro lado, la entrega de gas envasado en cilindros se realiza puerta a puerta en las instalaciones del usuario final.

METODOLOGIA

Este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de analizar las tecnologías actualmente utilizadas en el almacenamiento, envasado y distribución del gas licuado de petróleo (GLP), así como revisar la normativa vigente que regula los protocolos de seguridad industrial. Además, se

buscó identificar prácticas eficientes y explorar las tendencias que contribuyen a mejorar los procesos logísticos en este sector. Este estudio se llevó a cabo mediante un enfoque cualitativo y documental, basado en la revisión de fuentes técnicas, normativas y académicas relacionadas con la logística del Gas Licuado de Petróleo. La metodología empleada se estructuró en cuatro fases: (1) planteamiento de las preguntas de investigación, (2) recopilación de información relevante, (3) interpretación de los hallazgos, y (4) elaboración de recomendaciones. En esta sección se detallan las dos primeras etapas, mientras que los resultados obtenidos y las propuestas serán abordados en apartados posteriores.

(1) Planteamiento de las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación fueron planteadas para resolver los objetivos de nuestro estudio, permitiendo explorar los componentes técnicos, normativos y operativos del gas licuado de petróleo, nos basamos en el propósito consolidado en el párrafo anterior y su enfoque claro sobre seguridad, normativas y tecnología utilizadas en la logística del sector para avanzar en la primera etapa, donde se enunciaron las tres interrogantes que ordenaran el progreso de este documento:

- **P1:** ¿Cuáles son las metodologías y estrategias de seguridad más reconocidas en la industria del GLP y como se alinean con los requisitos normativos aplicables para este sector en Colombia?
- **P2:** ¿Actualmente, ¿cuáles son las tecnologías más utilizadas por la industria del GLP para el almacenamiento, el envasado y la distribución de producto, y cómo contribuyen a la eficiencia de estos procesos?
- **P3:** ¿Cuáles son las nuevas tendencias que impulsan mejoras en la seguridad y eficiencia del almacenamiento y distribución de GLP

(2) Recolección de la información

La segunda etapa presenta la búsqueda de leyes, resoluciones, normas técnicas, guías, artículos académicos, tesis y casos reales de incidentes y de éxito relacionados con la logística del gas licuado de petróleo en las bases de datos: SCOPUS y SCIENCEDIRECT (para artículos académicos), PROQUEST y EBSCOHOST (para tesis y casos de estudio) y REDALYC, SCIELO, DIALNET (documentos de acceso abierto en español), usando las siguientes palabras clave: *GLP, Logística, Normativa, Transporte, Almacenamiento, Envasado, Tecnología, Seguridad, Monitoreo, Sensores IOT* y generando diferentes ecuaciones de búsqueda con diversos operadores booleanos que permitieron incluir, combinar y excluir información de acuerdo con el interés y propósito de nuestra investigación.

Criterios de inclusión y de exclusión

Durante esta fase del proceso investigativo, se lleva a cabo la selección cuidadosa de los datos, asegurando que cada fuente consultada sea pertinente y contribuya de manera significativa a la resolución de las preguntas de investigación previamente establecidas, para lo cual se consideraron tres criterios de inclusión: (1) El contenido principal se refiere al gas licuado de petróleo y la información incorpora alguno de los componentes de la cadena de suministro. (2) La información presenta la matriz legal o una descripción de la normativa de la industria, estrategias de seguridad industrial o de procesos, casos de éxito, tecnologías aplicadas o tendencias a futuro para un manejo seguro y eficiente del gas licuado de petróleo y (3) La información incluye modelos de gestión aplicables al sector. En forma similar, con el propósito de prescindir de los estudios que no se ajustan al enfoque, diseño o población objetivo y evitar

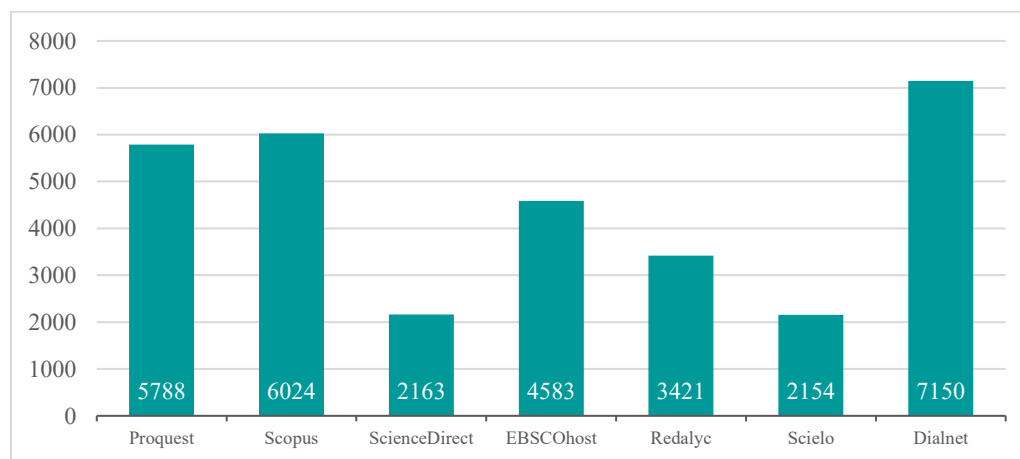
que se incluyan datos que podrían distorsionar los resultados o introducir sesgos, se descartaron los documentos que cuentan con alguna de las siguientes características: (1) Presentan el desarrollo técnico del proceso de obtención de GLP y profundizan en las propiedades del producto como poder calorífico, eficiencia energética y otros que no se relacionen con las preguntas de investigación. (2) Presentan modelos de tipo económico o ambiental relacionados con costos, presupuestos, transición energética y sostenibilidad. (3) Incluyen aplicaciones del GLP o modificaciones de sistemas energéticos. Estos criterios de exclusión permitieron centrar el análisis en evidencias de alta calidad y relevancia temática consolidando una homogeneidad metodológica entre los estudios seleccionados que para efectos prácticos no debe superar los 50 documentos.

RESULTADOS

(3) Análisis de los Resultados

Considerando las bases de datos previamente mencionadas y aplicando los criterios base de búsqueda, palabras clave, [logística], [envasado], [almacenamiento], [transporte], [normatividad], [tendencias], [tecnología], [GLP], [Gas Licuado de petróleo] y [Gases combustibles] tanto en español como su correspondiente en Inglés, se obtuvo como respuesta de los buscadores un total de 31283 resultados, distribuidos entre artículos de revista, tesis, artículos de libro y libros.

Ilustración 2. Resultados obtenidos en los buscadores de las bases de datos consultadas



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

Posteriormente, aplicando los criterios de exclusión establecidos en la metodología previamente descrita y en alineación con los objetivos del estudio, se eliminaron aquellos documentos cuyo contenido se centraba exclusivamente en (1) el desarrollo técnico del proceso de producción del GLP, así como en aspectos químicos del producto, tales como su poder calorífico y eficiencia energética, que si bien son datos importantes para la creación de un marco teórico claro, no se relacionan directamente con las preguntas de investigación por lo que no es

conveniente acuñar muchos datos con información similar. También se eliminaron los documentos que (2) presentan modelos de tipo económico o ambiental relacionados con costos, presupuestos, transición energética o sostenibilidad y los que (3) incluyen en su contenido aplicaciones del GLP o modificaciones de sistemas energéticos.

Los criterios de exclusión nombrados permitieron identificar los datos, documentos o estudios que no deben formar parte del análisis, con el fin de garantizar la validez, la coherencia y la relevancia de los resultados evitando factores que generen confusión y limitando la cantidad de documentos.

Tras aplicar estos filtros se obtuvieron 41 artículos, los cuales fueron sometidos a una clasificación taxonómica rigurosa que permitió ubicar, entender y comparar mejor la información disponible, para lo cual se adelantó una revisión superficial de los documentos aplicando un enfoque sistemático que garantizó la relevancia, calidad metodológica y aplicabilidad práctica en el proceso de investigación, identificando la información, conceptos y soportes que se requieren para consolidar el estudio.

Organización de la información.

Con el objetivo de promover una comprensión integral de la información recopilada, se planteó la elaboración de una matriz analítica que posibilita una lectura global de los documentos revisados. Esta herramienta metodológica permite organizar y vincular los contenidos de manera estratégica, orientándolos hacia la resolución de las preguntas de investigación previamente formuladas, por ello, el primer paso fue identificar los conceptos generales del estudio, definiendo así un primer nivel de clasificación o Clase y enseguida se segregaron los datos mediante la construcción de unas subcategorías o subclases las cuales adentran aún más en los

elementos fundamentales de las preguntas de investigación creando así la matriz de análisis taxonómico que se presenta en la tabla 4.

Clases

1. Elementos de la cadena de suministro de interés para el estudio
2. Contribución del documento al cumplimiento de los objetivos del estudio
3. Características de los datos o tipo de documento
4. Modelos de gestión a los que pueda referirse el documento

El primer nivel comprende (1) Los elementos de la cadena de suministro, (2) tipo de contribución, (3) características de los datos y (3) modelos de gestión. Dentro de cada nivel, los artículos son caracterizados en varias subcategorías, el primero de ellos, elementos de la cadena de suministro, comprende algunas de las actividades que se requieren para lograr satisfacer las necesidades de los consumidores del gas licuado de petróleo, aunque la cadena cuenta con un mayor número de componentes, el estudio se enfoca únicamente en aquellos que representan un alto riesgo de pérdidas por eventos de seguridad industrial en las operaciones (almacenamiento, embalaje y distribución).

El segundo nivel, tipo de contribución, hace referencia directa a las preguntas de investigación, dado que cada uno de los documentos seleccionados ofrece un aporte relevante para dar solución, orientando la investigación hacia diferentes resultados, ya sea entender el producto en estudio para identificar las singularidades que se deben tener en cuenta al analizar los documentos y datos (caracterización del GLP), Conocer la normatividad que regula la

industria para garantizar métodos seguros, así como las estrategias utilizadas en el sector para reconocer los peligros y controlar los riesgos de las actividades (seguridad industrial), Identificar las técnicas aplicadas actualmente para un almacenamiento, embalaje y distribución seguro del gas licuado de petróleo (tecnologías aplicadas) o Explorar las nuevas tendencias que permitirán a futuro configurar procesos con soluciones eficientes y confiables, superando las técnicas que implementan las empresas de alto desempeño de este sector actualmente (nuevas tendencias).

El tercer nivel, las características de los datos, organiza la información por fuente esto organiza mejor la información, dando mayor confiabilidad y contexto a los resultados. Los artículos científicos suelen aportar enfoques teóricos más desarrollados, las tesis por su parte ofrecen estudios de caso detallados o innovadores, los informes técnicos se orientan a la aplicación práctica en contextos específicos y las estadísticas oficiales brindan datos confiables para validar o contrastar resultados, de esta manera el proceso de selección logro integrar diversos tipos de fuentes logrando una visión tanto operativa que académica.

Finalmente, el cuarto y último nivel, modelos de gestión, se orienta a la consolidación de la cuarta etapa del estudio, la cual se relaciona con la presentación de las recomendaciones, en ella se integra y sobrepone la información para determinar que acciones podrían representar un aporte relevante para el conocimiento útil de empresas, reguladores y profesionales del sector logístico, promoviendo modelos de gestión más eficientes y responsables para la industria del Gas Licuado de Petróleo.

Tabla 4. Matriz de clasificación taxonómica de documentos

REFERENCIA	1.Elemento SCM			2. Tipo de contribución				3. Características de los datos				4. Modelos de gestión		
	Almacenamiento	Embalajes	Distribución	Características del producto	Seguridad Industrial	Tecnologías aplicadas	Nuevas tendencias	Artículo	Tesis	Informes técnicos	Estadísticas de gobierno	Planificación corporativa	Mejora continua	Digitalización avanzada
1	X			X					X			X		
2	X				X			X						
3	X			X					X			X		
4		X		X				X						
5	X	X							X			X		
6		X							X			X	X	
7		X				X		X						X
8		X							X				X	
9		X	X					X					X	
10			X	X	X				X					
11				X						X	X			
12				X	X					X				
13	X			X	X			X						
14	X	X		X	X			X				X		
15	X		X	X				X						
16	X				X				X					
17					X					X				
18				X	X					X				
19					X			X						
20					X			X						
21					X		X	X						X
22	X				X			X						
23					X			X						
24				X	X					X				
25					X				X				X	
26						X			X					
27						X		X						
28					X	X		X						
29						X		X					X	
30	X						X	X						
31				X			X		X					
32							X	X						
33								X				X		
34								X				X		
35										X		X		
36								X					X	
37										X			X	
38										X			X	
39								X						X
40								X						X
41						X		X						X

Nota. Tabla elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

Análisis Taxonómico

El cumplimiento de los atributos de cada subclase fue seleccionado en la matriz con una “X” en las celdas respectivas. En este sentido, la Ilustración 3 presenta el número de marcaciones identificadas en cada documento analizado, lo que permite visualizar la densidad informativa de las fuentes. Por su parte, la Ilustración 4 muestra, mediante un gráfico combinado, la cantidad de documentos cuyo contenido principal está relacionado con el gas licuado de petróleo, incorporando además alguno de los componentes definidos en la cadena de suministro. (2) La información presenta la matriz legal o una descripción de la normativa de la industria, estrategias de seguridad industrial o de procesos, casos de éxito, tecnologías aplicadas o tendencias a futuro para un manejo seguro y eficiente del gas licuado de petróleo o (3) la información incluye modelos de gestión aplicables al sector, estos filtros corresponden a los criterios de inclusión definidos para cada nivel o clase.

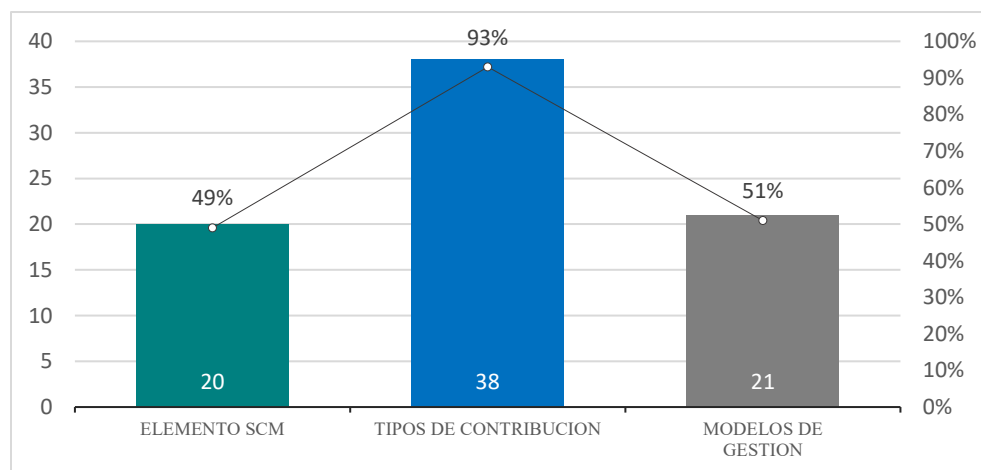
Ilustración 3. Marcaciones por documento



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

Durante el proceso de clasificación taxonómica se identificó que el 49 % de los documentos analizados abordan al menos uno de los tres componentes de la cadena de suministro definidos para este estudio. Por su parte, el 51 % se enfoca en la descripción de modelos de gestión, mientras que un 93 % aporta de manera directa a la resolución de las preguntas de investigación planteadas. Esta distribución evidencia la pertinencia de la taxonomía desarrollada, confirmando su eficacia para organizar y categorizar de forma precisa los documentos seleccionados.

Ilustración 4. Documentos acuñados por nivel o clase



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

La categoría denominada “Elemento de la Cadena de Suministro (SCM)” tiene como finalidad reconocer aquellos documentos que contribuyen a una comprensión estructurada de la cadena de suministro. Asimismo, esta clase permite vincular la información contenida en las fuentes con tecnologías emergentes o tendencias del mercado, facilitando su análisis en función de los objetivos del estudio, de esta manera se encontraron 20 documentos, 10 de los cuales se enfocan principalmente en actividades relacionadas con el almacenamiento del producto, esto corresponde al 50%. Las fuentes incluyen tesis y artículos con proyectos aplicados en la industria

de GLP que serán un aporte esencial para el propósito del estudio, ya que su contenido refuerza los conceptos que permiten comprender los requerimientos normativos de seguridad y nos guiaran en la búsqueda de tecnologías aplicables.

Según Sornoza & Moreira (2022), “una gran ventaja del gas licuado es que puede mantenerse en fase líquida conteniéndolo a baja presión y temperatura, esto reduce los costos de inventario, pues se pueden almacenar grandes cantidades de producto en tanques estacionarios, pero, conlleva otros riesgos, pues al ser liberado el líquido se expande 270 veces, facilitando la concentración de una atmosfera peligrosa y la generación de bajas temperaturas en el punto de salida” (p.138). El artículo ofrece datos técnicos importantes relacionados con la presión de diseño y control de temperatura, así como recomendaciones para la manipulación segura de tanques y cilindros que serán incluidas más adelante en la siguiente sección del documento.

El 35% de los documentos seleccionados se relaciona con el envasado o embalaje del producto, estos artículos se orientan en la problemática del control de las ventas y de inventario, proponiendo la incorporación de dispositivos de diferentes características para la medición de producto, pues tomando como referencia las propiedades del GLP mencionadas en la línea precedente, se puede deducir que las condiciones de temperatura ambiente alteran el rendimiento del producto mientras es almacenado, cambios que se hacen aún más notorios al transferir el gas de un contenedor a otro, por lo que es fundamental garantizar la mayor precisión posible en el registro de la salida de producto con el propósito de seguir la trazabilidad de este efecto, y establecer estrategias como mezclas de GLP con diferentes proveedores o el uso de tanques refrigerados que permitan mantener puntos de equilibrio.

Según Fernandez, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “Una alternativa tecnológica para la medición automática de nivel en tanques de almacenamiento de GLP consiste en sistemas que

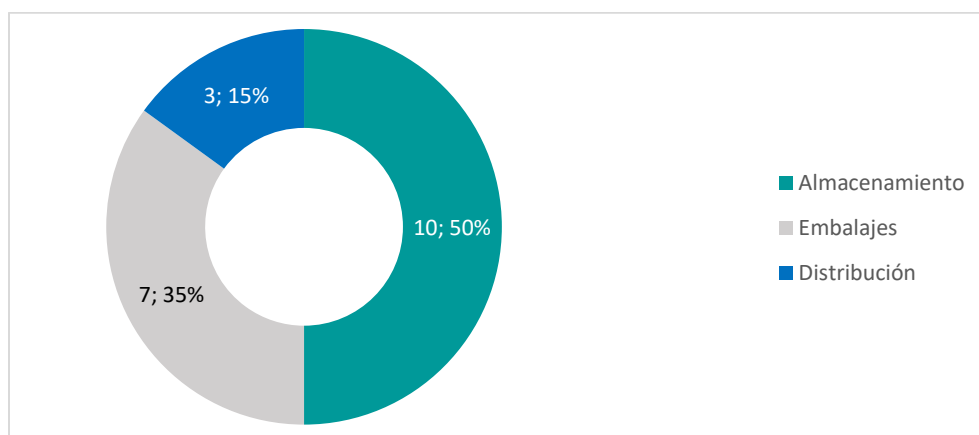
permiten gestionar el inventario en tiempo real. Estos dispositivos monitorean los niveles de líquido en función de la tabla de aforo correspondiente, y registran parámetros críticos como la temperatura y la presión, necesarios para calcular el volumen corregido a condiciones de referencia. Su capacidad de medición abarca tanto la fase líquida como la gaseosa del producto, lo que facilita el control preciso de las operaciones de entrada y salida, asegurando niveles seguros de almacenamiento. Además, estos sistemas cuentan con certificación para supervisar la transferencia de custodia basada en la capacidad del tanque, especialmente en situaciones donde no se dispone de flujómetros o existen dificultades en la medición durante los procesos de recepción y entrega”. (p- 4).

El 15% restante corresponde a tres documentos que incluyen en su contenido indicaciones sobre la distribución y entrega a cliente. Los títulos presentan información sobre los dos tipos de distribución de GLP que se implementan en Colombia. En recipientes portátiles llamados cilindros, que generalmente son de uso doméstico y tienen una capacidad de hasta 46 kilogramos, se envasan en planta, se transportan por carretera y se entregan al cliente puerta a puerta, y en recipientes fijos llamados tanques, la distribución a granel, es una modalidad generalmente de uso industrial que se apoya en unidades móviles con cisternas que contienen el producto que se transfiere a tanques estacionarios ubicados en las instalaciones del cliente.

Según Venegas, Ayabaca , Salvatore, Tipanluisa, & Farías (2024), “En esta fase de la cadena de suministro de GLP, se destaca como aspecto crítico la responsabilidad del proveedor en cuanto a la seguridad del producto, la cual no concluye con la entrega, sino que se extiende durante todo el proceso de consumo. El documento técnico contempla especificaciones detalladas sobre el diseño, los materiales y los procedimientos de inspección aplicables a los tanques asignados al cliente. Asimismo, subraya la relevancia de la correcta ubicación de estos

contenedores y de los dispositivos de seguridad asociados. Entre estos últimos, se enfatiza el papel fundamental de los reguladores de presión, considerados por el autor como el componente central de una instalación de GLP. Estos dispositivos permiten compensar las fluctuaciones de presión en la línea de suministro (aguas arriba) y garantizan la entrega del caudal y presión adecuados hacia el punto de consumo (aguas abajo), contribuyendo así a la eficiencia operativa y a la seguridad del sistema” (p. 88). El artículo es un compendio de datos técnicos relevantes y recomendaciones de seguridad, que serán incluidos en los siguientes apartados donde se detallan las principales contribuciones identificadas en la revisión de esta literatura.

Ilustración 5. Documentos que contienen los elementos de la cadena de suministro



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

38 documentos ofrecen una contribución directa a las preguntas de investigación, estos fueron identificados en la Clase, Tipo de Contribución. El 74% de este conjunto de datos aportó conceptos relevantes de seguridad industrial y características del producto, lo que permitió limitar el alcance del estudio y dar respuesta al primer interrogante. A partir del conocimiento de las propiedades fisicoquímicas del GLP y de los requisitos legales establecidos para este sector, se revisaron estrategias de seguridad industrial y de procesos aplicadas a esta cadena de suministro.

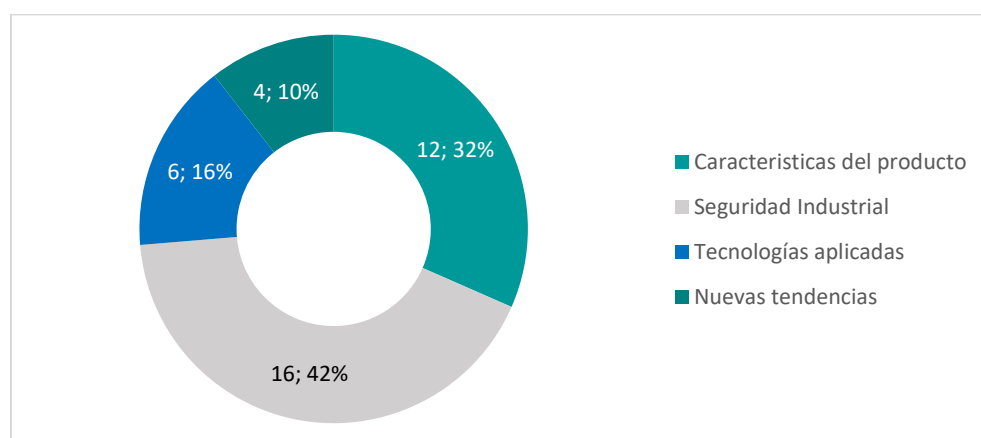
(Arnal, Albert, Sancho, & Garcia, 2017)

Según Arnal, Albert, Sancho, & Garcia (2017), “La seguridad en instalaciones que manejan sustancias explosivas ha experimentado avances significativos a lo largo del tiempo. En particular, se ha fortalecido la gestión de riesgos asociados a la generación de atmósferas explosivas, aspecto que incide directamente en las prácticas de manipulación del Gas Licuado de Petróleo. Estos progresos han contribuido a establecer protocolos más rigurosos y tecnologías más seguras en el diseño, operación y mantenimiento de sistemas vinculados a estos procesos, los autores desarrollan un proyecto orientado a su aplicación en una empresa del sector petroquímico, específicamente en una planta dedicada al almacenamiento y llenado de Gases Licuados del Petróleo. El documento establece una metodología detallada para garantizar el cumplimiento de la normativa ATEX, iniciando con el análisis de la distribución física de la planta a partir de los planos estructurales y los diagramas de proceso. A continuación, se realiza la identificación de peligros y la evaluación de riesgos inherentes, con el objetivo de delimitar las áreas clasificadas según el tipo de atmósfera explosiva presente. Finalmente, se propone la selección de equipos adecuados para cada zona, conforme a los requisitos técnicos y de seguridad establecidos por la normativa vigente. Este documento es uno de los insumos considerados en el estudio, y junto con otras fuentes bibliográficas, aporta datos relevantes que serán sintetizados y presentados en el siguiente apartado” (p. 2100).

El 16 % describe las tecnologías que actualmente están siendo aplicadas en el mercado, como es el caso de los detectores de fugas, los sistemas de monitoreo SCADA o sensores IOT para control de inventario. Por otro lado, apenas un 10% presenta nuevas tendencias o tecnologías emergentes, una cifra muy baja de documentos que incluyen proyectos de mejora continua y una aplicación de software para optimizar inventarios, publicada por Inter empresas.

Según Interempresas (2021), “esta innovación como la primera aplicación de software para la gestión de inventario multiplataforma del mundo para sistemas de medición de tanques que proporciona un acceso seguro e inmediato a los datos, al poner la información en tiempo real a disposición de un mayor número de interesados por medio de teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras, esta solución para móvil fácil de usar permite tomar mejores decisiones y mejorar la eficiencia y la seguridad operativa” (p. 60).

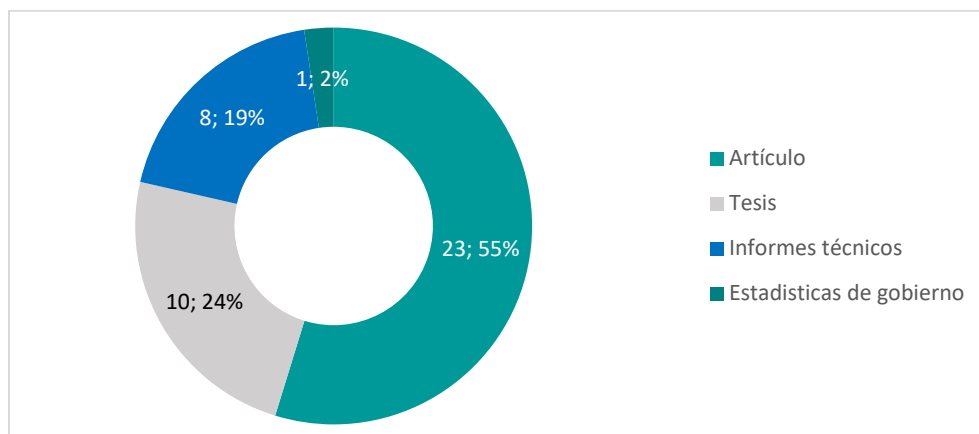
Ilustración 6. Aporte de los documentos al propósito del estudio



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

En cuanto al tipo de fuente de información, tras la clasificación se seleccionaron 41 documentos en total, de los cuales el 55% son artículos que proveen información reciente y especializada sobre el gas licuado de petróleo y aportan significativamente en la construcción de un marco conceptual justificando las decisiones metodológicas tomadas, el 24% son tesis, el 19% son informes técnicos y el 2% corresponde a estadísticas de gobierno, concluimos que las bases de datos son poco densas en este último tipo de información, lo cual resulta desafortunado, ya que la data estadística permitiría contrastar resultados y transponer el estudio con otros enfoques orientados en investigaciones previas.

Ilustración 7. Tipo de fuente de información



Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

La selección de un modelo de gestión es una decisión estratégica que impacta directamente en la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de cualquier organización o proceso logístico, por lo cual su comprensión resulta muy importante para la consolidación de las recomendaciones de este estudio, a partir de los criterios de inclusión establecidos, se identificaron ocho documentos vinculados a la planificación corporativa. Estos materiales tienen como finalidad orientar a las organizaciones en la formulación de sus metas estratégicas, el diseño de sus políticas internas y la estructuración de planes de acción coherentes con su visión institucional.

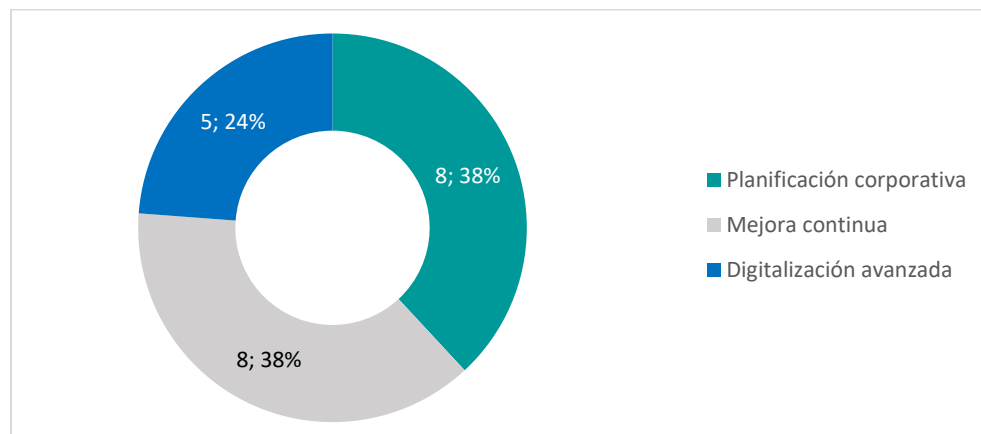
Según Adaniya (2019), se plantea un modelo basado en la metodología de dinámica de sistemas, orientado a analizar el abastecimiento de gas licuado de petróleo (GLP) en el contexto peruano. Esta propuesta permite simular diversos escenarios futuros, considerando las interacciones entre múltiples factores que inciden en la cadena de suministro del GLP, y ofrece una herramienta útil para la formulación de políticas públicas y estrategias de gestión energética.

Igualmente, 8 de los documentos seleccionados incluyen modelos de mejora continua, los cuales representan el 38%, estos son enfoques sistemáticos para mejorar continuamente el producto, servicio y procesos de las plantas de envasado de GLP.

Según Montesinos, Vásquez, Ivonne, & Gracida (2020) “las herramientas del Ciclo de Deming para el mejoramiento y optimización en el área de control de inventarios aplicadas a la empresa objeto de estudio, permitieron reconocer las principales causas que originan el bajo rendimiento del área de inventarios, las cuales anteriormente no estaban identificadas” (p. 1882).

Finalmente 5 archivos incluyen la aplicación de modelos de digitalización avanzada, presentando algunas herramientas que permiten a las organizaciones transformar profundamente sus procesos, estructuras y capacidades mediante la administración sistemática de datos, aunque apenas representan el 24% de la información obtenida para este nivel, claramente serán de gran importancia para la construcción de recomendaciones que faciliten alinear la operación con los objetivos estratégicos, garantizando la seguridad operativa, el cumplimiento de la normativa aplicable, junto con el fortalecimiento de la eficiencia logística, constituyen los ejes centrales de esta propuesta. Por ello, los elementos específicos que conforman sus aportes serán desarrollados en la sección siguiente.

Ilustración 8. Documentos que describen modelos de gestión

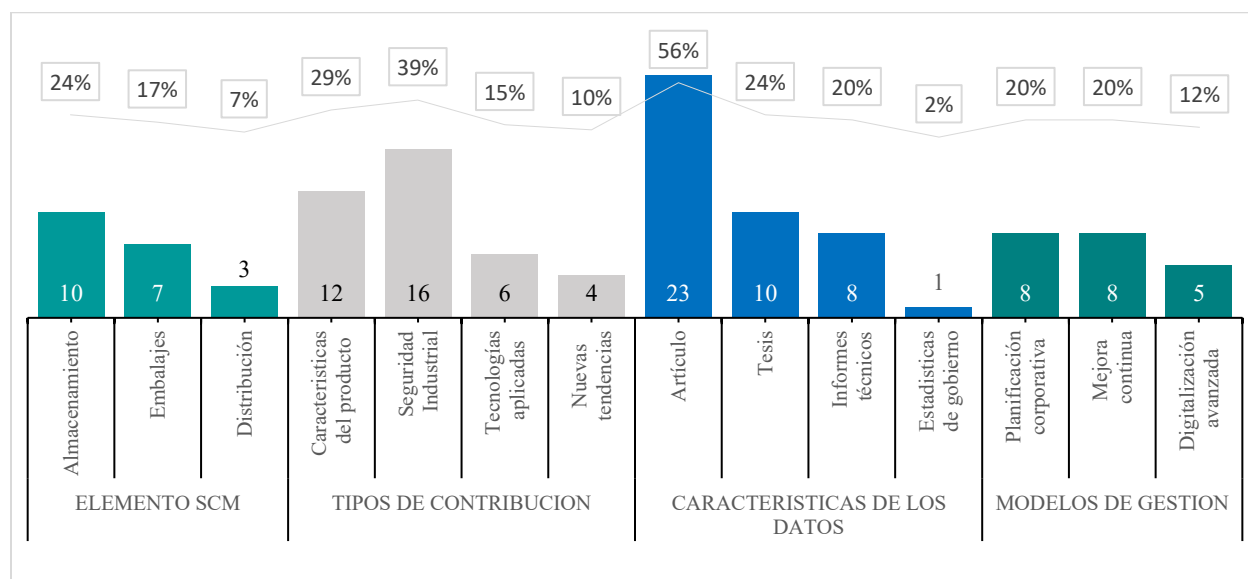


Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

La Ilustración 9 describe la selección de las categorías o subclases, lo que se puede interpretar como un análisis vertical de la matriz taxonómica. Durante la lectura del gráfico destacan algunos resultados si consideramos que la altura de las barras indica la distribución de las subclases, observamos que la más alta representa los artículos como fuente de información, 23 documentos se encuentran en esta subclase lo que corresponde al 56% de los documentos.

Del total de información analizada, el 39% se concentra en aspectos relacionados con los requerimientos normativos, así como en la identificación, análisis y control de riesgos. Por otro lado, un 24% corresponde a documentos que abordan las características del almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP). En cuanto a la búsqueda de estadísticas gubernamentales, esta arrojó únicamente un resultado, mientras que los datos obtenidos en las demás subcategorías presentan una distribución relativamente uniforme.

De esta manera se concluye que la información recolectada presenta un fuerte enfoque hacia la gestión de riesgos, mientras de la distribución del producto y la digitalización avanzada muestran menor presencia, en cuanto al tipo de documento, los artículos lideran la muestra, lo que sugiere que el corpus seleccionado tiene un alto rigor académico, las tesis y estadísticas gubernamentales son menos frecuentes, pero se cuenta con suficientes archivos para garantizar el respaldo metodológico y contextual, por otro lado, la planificación corporativa aparece moderadamente y la mejora continua así como la digitalización avanzada están presentes pero dispersas.

Ilustración 9. Documentos seleccionados por subclase

Nota. Ilustración elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

En resumen, la mayor densidad de datos se ubica en las referencias que abordan almacenamiento, seguridad y características del producto, documentos [1, 3, 13, 14], la digitalización avanzada aparece con mayor frecuencia en estudios recientes o artículos de enfoque tecnológico [6, 7, 25, 41], los documentos que combinan embalaje, tendencias y planificación corporativa [9 y 28] podrían constituir bases para propuestas de innovación logística en GLP. Estos artículos y tesis demuestran el papel estratégico del GLP en la transición energética y la importancia del control de los riesgos críticos en su logística, considerando su alta inflamabilidad y condiciones operativas exigentes. Aunque Colombia cuenta con un marco normativo sólido, su implementación enfrenta desafíos y brechas operacionales y culturales que favorecen incidentes prevenibles en donde la incorporación de tecnologías emergentes ofrece una vía prometedora para mejorar la trazabilidad, seguridad y eficiencia. En los siguientes apartados se detallan las principales contribuciones identificadas en la revisión de literatura sobre los temas mencionados basado en el perfil de la Ilustración 9.

DISCUSIÓN

Seguridad Industrial y Regulación del Gas Licuado de Petróleo

Caracterización del producto

A partir de la información disponible, el Gas Licuado del Petróleo puede definirse como una combinación de hidrocarburos livianos, principalmente propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). La proporción entre estos componentes varía según los métodos de producción y las condiciones de refinación en origen. Sin embargo, dicha composición suele modificarse durante las etapas de almacenamiento y distribución, ya que las empresas encargadas del envasado ajustan las mezclas en sus plantas con el propósito de regular parámetros como la presión y el volumen. Esta práctica busca optimizar el desempeño energético del producto, manteniendo un balance económico conveniente, especialmente en respuesta a las fluctuaciones estacionales y a las dinámicas del mercado.

Según Picon & Solano (2024), “Desde una perspectiva operativa, la administración de una instalación dedicada al almacenamiento y distribución de gas licuado de petróleo requiere la integración de diversas disciplinas, entre ellas la ingeniería de procesos, la seguridad en el entorno laboral, el cumplimiento de regulaciones ambientales y la coordinación organizacional, dado el rango de inflamabilidad del GLP, que oscila entre el 2.1% y 9.5% en aire, y su densidad relativa superior al aire (1.5 a 2 veces), existe un elevado potencial de acumulación de vapores inflamables en áreas con ventilación limitada, ya sea por fallas de contención en tanques, pérdidas por válvulas o fisuras en líneas de conducción” [24]. Los peligros latentes en estas instalaciones incluyen eventos de combustión espontánea, deflagraciones y explosiones tipo

BLEVE (Explosión de Vapor de Líquido en Ebullición), cuya energía de impacto puede superar en decenas de toneladas el TNT equivalente, esto sumado a que fugas no detectadas oportunamente pueden exponer al personal operativo a atmósferas tóxicas, hipoxia, parálisis respiratoria, y en casos extremos, envenenamiento agudo o muerte, según los niveles de ppm y tiempo de exposición.

Marco Normativo de Gas Licuado de Petróleo

En Colombia, el manejo del GLP abarca procesos de almacenamiento, envasado y distribución que deben cumplir con estándares establecidos para asegurar su correcta operación y minimizar riesgos, están reguladas principalmente por la resolución 40245, 40247 y 40246 de 2016, la Norma Técnica Colombiana 3853, y otras normas internacionales como las ASME VIII, DOT CFR-49 así como la ISO 9001:2015 para gestión de calidad. Esta normatividad detalla los rasgos de diseño de las plantas y las características de los recipientes o contenedores ofreciendo especificaciones acerca del espesor mínimo de las paredes de su material, resistencia a la presión interna y pruebas no destructivas a las cuales deben ser sometidos, como ensayos radiográficos, ultrasonido y partículas magnéticas.

Además, existe la CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas, la cual fue establecida en 1994 como entidad técnica del Gobierno nacional, mediante las facultades otorgadas por las Leyes 142 y 143 de ese mismo año. Esta institución, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, tiene como propósito ejercer la regulación técnica e imparcial de los servicios públicos domiciliarios asociados a la energía eléctrica, el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP) y los combustibles líquidos. Su marco legal y misional está orientado a garantizar que dichos servicios se presten de forma continua, eficiente y segura al mayor número posible de

usuarios, mediante esquemas tarifarios adecuados y condiciones regulatorias que promuevan la inversión, la expansión de infraestructura y el cumplimiento de estándares técnicos. Con ello, la CREG procura armonizar los derechos de los usuarios a tarifas razonables con la necesidad de establecer condiciones que permitan a los prestadores del servicio garantizar estándares de calidad, ampliar la cobertura y asegurar la viabilidad operativa a largo plazo.

Esta función regulatoria resulta clave en el contexto del GLP, dada la necesidad de establecer condiciones de operación seguras, esquemas de distribución eficaces y lineamientos técnicos precisos que respondan tanto a las exigencias industriales como a las políticas de masificación del gas combustible en Colombia.

Seguridad de Procesos

Según Lacayo (2015), “la Asociación de Fabricantes de Productos Químicos de Estados Unidos (CMA) en 1985, plantea que la seguridad en los procesos industriales implica la gestión adecuada de los riesgos derivados de fallos operativos o técnicos que pueden provocar la liberación accidental de sustancias peligrosas. En las industrias de procesos, los peligros más significativos suelen originarse por la pérdida de contención de algún componente del sistema, lo que puede generar fugas de fluidos con propiedades inflamables, combustibles o tóxicas, y que además poseen altos niveles de energía debido a condiciones extremas de presión o temperatura. Cuando estas fugas ocurren de forma repentina y en grandes volúmenes, pueden desencadenar eventos como explosiones, emisiones de gases tóxicos o impactos ambientales severos, cuyos efectos pueden trascender los límites físicos de las instalaciones industriales y afectar a comunidades cercanas. Durante los años ochenta, el sector de petróleo y gas comprendió que la implementación de tecnologías orientadas a la seguridad de procesos no era suficiente por sí sola

para prevenir incidentes graves; era necesario complementarlas con una gestión integral de la seguridad. En este contexto, la gestión del riesgo se define como un enfoque estructurado y racional que permite establecer el marco de referencia, identificar, analizar, evaluar, tratar, monitorear y comunicar los riesgos inherentes a cualquier actividad o proceso. Este enfoque busca que las organizaciones reduzcan sus vulnerabilidades y aprovechen las oportunidades de mejora.” [25].

A continuación, presentaremos algunos apartados del conjunto de los documentos revisados, que hacen referencia a estos conceptos.

Identificación de peligros

La identificación de peligros en una planta de GLP es un proceso crítico para garantizar la seguridad del personal, las instalaciones y el entorno, bajo este contexto la herramienta básica para la gestión de riesgos es la matriz IPVR, la cual, según la legislación colombiana, se puede desarrollar bajo cualquier metodología, siendo la más recomendada la GTC 45, que es la *Guía Técnica Colombiana* para la identificación de peligros y valoración de riesgos en seguridad y salud en el trabajo desarrollada por ICONTEC y el Consejo Colombiano de Seguridad, la guía define una metodología sistemática para identificar peligros en todas las actividades de una empresa (rutinarias y no rutinarias) y permite valorar los riesgos según su probabilidad y severidad, facilita la priorización de controles y la asignación de recursos para mitigar riesgos y está alineada con el Decreto 1072 de 2015, que regula el SG-SST en Colombia.

La identificación de peligros realizada por los profesionales de seguridad industrial de la compañía, además de incluir todos los riesgos fisicoquímicos relacionados con todas las

actividades que integran los procesos, debe considerar su dimensión organizacional, donde la gestión del cambio, la cultura preventiva y la capacitación continua son elementos críticos.

Dado el alto nivel de riesgo asociado, se sugiere que las instalaciones de Gas Licuado de Petróleo (GLP) fortalezcan su matriz IPVR mediante la incorporación de metodologías de análisis como HAZOP, HAZID, BOW TIE, LOPA, entre otras. Estas herramientas permiten detectar desviaciones en los procesos y valorar la eficacia de las barreras de seguridad existentes, utilizando enfoques tanto cualitativos como cuantitativos, apoyados en software especializado y sistemas de gestión integrados.

Es fundamental que estas estrategias incluyan la participación del personal operativo, promoviendo su involucramiento en la implementación de medidas, la realización de capacitaciones, simulacros y otras actividades orientadas a mejorar la prevención y la capacidad de respuesta ante emergencias. Asimismo, resulta clave llevar a cabo auditorías internas de los procedimientos operativos, con el fin de verificar la eficiencia del sistema de seguridad de procesos y prevenir incidentes de gran magnitud. Todo esto debe estar alineado con la identificación temprana de peligros, la evaluación sistemática de riesgos y la aplicación de controles adecuados, contribuyendo así al fortalecimiento de una cultura organizacional centrada en la prevención.

Es pertinente señalar que cualquier instalación industrial dedicada al procesamiento, manejo o transporte de sustancias peligrosas enfrenta el riesgo de incidentes en distintas fases operativas. Estos eventos pueden originarse por causas naturales, errores humanos, accidentes en el transporte, fallos en los equipos o deficiencias en los procesos, y pueden variar en su nivel de gravedad, que sin distinción del tamaño de la organización y pese a la alta efectividad de las estrategias y medidas preventivas que implemente, pueden presentarse, dado que no existe

actualmente una metodología capaz de eliminar por completo los riesgos, siempre persiste una probabilidad, aunque mínima, de que se presente una falla con efectos adversos significativos.

Según De la Peña (2014), “uno de los incidentes más significativos a nivel mundial ocurrió el 4 de junio de 1989 en Ufa, Rusia. En esa ocasión, la ruptura de un gaseoducto que transportaba Gas Licuado de Petróleo provocó la liberación masiva de propano y butano. Al ser gases más densos que el aire, se concentraron en el valle donde convergían dos líneas ferroviarias. Cuando dos trenes que se desplazaban en direcciones opuestas atravesaron la nube de gas, el contacto entre las locomotoras y las vías generó chispas que actuaron como fuente de ignición. Esto desencadenó una serie de deflagraciones intensas y rápidas, resultando en una tragedia que cobró la vida de 575 personas”. En este contexto, la incorporación de nuevas tecnologías que complementen las estrategias tradicionales de identificación de peligros y que fortalezcan la seguridad de procesos es indispensable.

Según Silva, Barrandeguy, & Quintana (2017), “las investigaciones realizadas en Los Ángeles y publicadas en la revista Ciencia y Trabajo, indican que el empleo de herramientas de simulación como SLAB VIEW resulta fundamental para prever el comportamiento de nubes inflamables o tóxicas. Esta capacidad de anticipación contribuye significativamente a la toma de decisiones operativas, al diseño de planes de contingencia y a la definición precisa de áreas de exclusión. La detección temprana de condiciones peligrosas, junto con una evaluación precisa de los posibles efectos de emisiones accidentales, representa un avance relevante en la gestión de la seguridad de procesos dentro del sector del Gas Licuado de Petróleo. SLAB VIEW, desarrollado específicamente para modelar emisiones más densas que el aire, permite observar la evolución temporal del evento y calcular la extensión total del impacto. Además, su sistema es capaz de

simular distintos tipos de liberaciones: continuas, de duración limitada o instantáneas, lo que lo convierte en una herramienta integral para la planificación y respuesta ante emergencias” [28].

Según Viton (2024), “las herramientas de modelamiento requieren el respaldo de sistemas especializados de detección de fugas, los cuales deben integrar sensores de alta sensibilidad, alarmas incorporadas y cumplir con la normativa vigente en Colombia. Estos dispositivos deben contar con funcionalidades avanzadas, entre ellas: - Autodiagnóstico continuo, que permite verificar en tiempo real el estado operativo de los sensores mediante estaciones ubicadas estratégicamente a lo largo del proceso. - Interfaz RS485, que asegura la comunicación digital con sistemas SCADA, facilitando la visualización del comportamiento del sistema, el análisis de datos históricos y otras funciones operativas clave. - Alarmas escalonadas, diseñadas para activarse progresivamente según la concentración de gas (entre el 5 % y el 15 % del Límite Inferior de Explosividad – LIE), en concordancia con los protocolos operativos normalizados y los sistemas de alarma documentados en el plan de emergencias y el sistema de gestión de la planta. Además de los sistemas de monitoreo continuo, es indispensable disponer de equipos portátiles de detección, los cuales son esenciales para realizar inspecciones en instalaciones de clientes, ejecutar tareas de mantenimiento preventivo en redes de distribución o tanques, y garantizar la seguridad personal en ambientes industriales, logísticos y residenciales”.

Según Viton (2024), “la inteligencia artificial aplicada al análisis predictivo permite anticipar fallas potenciales antes de que se manifiesten, lo que facilita la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y reduce significativamente los periodos de inactividad. Este enfoque resulta esencial para preservar la seguridad y la continuidad operativa en ambientes industriales de alto riesgo. Las metodologías basadas en aprendizaje automático (ML) y modelos de series temporales han demostrado ser altamente eficaces en los esquemas de Inspección

Basada en Riesgos (RBI), especialmente en el sector de hidrocarburos. Estas herramientas permiten determinar con mayor precisión el nivel de riesgo asociado a equipos críticos, estimar la vida útil remanente (RUL) de componentes, optimizando la planificación de mantenimiento y priorizar intervenciones técnicas según la probabilidad y el impacto de fallos. El empleo de algoritmos de clasificación como árboles de decisión, regresión logística y máquinas de vectores de soporte (SVM) representa un avance significativo en la evaluación de condiciones operativas, permitiendo identificar el estado de los activos y el grado de severidad de posibles fallas con mayor exactitud”.

Según Viton (2024), “el uso de estas tecnologías permite realizar estimaciones más certeras sobre el comportamiento de los sistemas, lo que facilita la adopción de esquemas de mantenimiento anticipado. Esto se traduce en una disminución considerable de los periodos de inactividad y una optimización de los costos operativos. La integración de soluciones basadas en inteligencia artificial dentro de los procesos logísticos del GLP marca un cambio estratégico hacia modelos de gestión más preventivos, eficientes y con mayor capacidad de trazabilidad. Al permitir el análisis predictivo, la detección automatizada de fallos, la simulación de escenarios de emergencia y la auditoría inteligente, la IA fortalece la seguridad operacional y optimiza la toma de decisiones, alineándose con estándares internacionales y promoviendo una cultura de riesgo basada en evidencia. Se recomienda la adopción progresiva de soluciones basadas en inteligencia artificial dentro de los procesos logísticos y de seguridad del GLP. Esta tecnología permite:

- Monitoreo predictivo de fallos y condiciones operativas críticas mediante algoritmos entrenados con datos históricos.

- Evaluación automatizada de riesgos con sistemas que identifican anomalías en tiempo real y actualizan matrices de criticidad.
- Simulación de escenarios de emergencia, permitiendo validar protocolos ante eventos como fugas, incendios o fallos estructurales.
- Auditoría inteligente de cumplimiento normativo, acelerando la revisión documental y la trazabilidad de operaciones.
- Interoperabilidad con tecnologías avanzadas como sensores IOT, SCADA y tanques inteligentes para una visión holística del sistema.

La incorporación de estas tecnologías no solo fortalece los estándares de seguridad y garantiza el cumplimiento normativo, sino que también impulsa una transformación cultural dentro de la organización. Este enfoque fomenta prácticas orientadas a la mejora constante, promueve la transparencia en los procesos y refuerza el compromiso con la sostenibilidad como eje estratégico”. [21]

Control del Riesgo

De acuerdo con las teorías del fuego y otros modelos que basados en principios fisicoquímicos definen la combustión como una reacción exotérmica de oxidación que explica cómo se inicia, se propaga y se extingue un incendio, podemos concluir que otro aspecto fundamental en la prevención de eventos mayores con gas licuado de petróleo es el control de fuentes de ignición.

Según Arnal, Albert, Sancho, & Garcia (2017), “a lo largo del tiempo, las medidas de seguridad en instalaciones que manejan gases con potencial explosivo han experimentado mejoras sustanciales, especialmente en lo relacionado con la protección en atmósferas explosivas. Estos avances han sido posibles gracias a la implementación de equipos certificados bajo la normativa ATEX, la cual establece un marco integral que no solo define qué constituye una atmósfera explosiva y los factores que la generan, sino que también contempla la clasificación de sustancias peligrosas, la delimitación de zonas de riesgo y la adopción de protocolos específicos para operación, mantenimiento y reparación. La normativa ATEX también introduce un sistema de identificación estandarizado que permite marcar tanto las áreas con riesgo de explosión como los equipos que operan en dichas zonas. Este enfoque contribuye significativamente a minimizar la generación de chispas en entornos donde pueden existir concentraciones de gas licuado de petróleo (GLP), reduciendo así la probabilidad de incidentes. Para lograr la conformidad con ATEX en plantas de envasado de GLP, es indispensable contar con un conocimiento detallado de múltiples conceptos técnicos y parámetros operativos. Esta conformidad se fundamenta en dos referencias normativas clave: las recomendaciones prácticas 505 del Instituto Americano del Petróleo (API, 1997) y la norma UNE-EN 60079, publicada por AENOR en 2009 y 2010”.

Según Arnal, Albert, Sancho, & Garcia (2017), entre los diversos conceptos y criterios establecidos en las normativas mencionadas, uno de los más relevantes es la clasificación de zonas peligrosas. Esta categorización se realiza considerando dos factores principales: la frecuencia con la que puede generarse una atmósfera explosiva y el tiempo durante el cual dicha atmósfera permanece presente en el entorno. En función de estos parámetros, se delimitan áreas

específicas dentro de las instalaciones, lo que permite adoptar medidas de protección adecuadas y seleccionar equipos compatibles con el nivel de riesgo asociado a cada zona.

Tabla 5. Clasificación de atmósferas

Gases / vapores			Polvos / Fibras	
CLASE I	ZONA 0	ATEX presente de modo permanente, o por un periodo de tiempo prolongado o con frecuencia	ZONA 20	
	ZONA 1	Es probable la formación ocasional, en condiciones normales de explotación, de una ATEX	ZONA 21	
	ZONA 2	No es probable, en condiciones normales de explotación de una ATEX, o en caso de formarse solo permanece durante un breve periodo de tiempo	ZONA 22	
			CLASE II	

Nota. De Puesta en conformidad ATEX de una instalación de almacenamiento de gases licuados de petróleo, por Arnal, J., Albert, C., Sacho, M. y García, B. (2017). 21 congreso internacional de proyectos de gerencia e ingeniería.

Según Arnal, Albert, Sancho, & Garcia (2017), “antes de iniciar cualquier procedimiento, es fundamental contar con un conocimiento detallado de la distribución física de la planta de gas licuado de petróleo, a partir de los planos de la instalación, se realiza una segmentación por áreas funcionales como almacenamiento y llenado y se calcula la superficie correspondiente a cada una. Este análisis permite identificar la presencia de materiales inflamables o combustibles, así como evaluar sus propiedades y el nivel de riesgo que representan en la formación de atmósferas explosivas. Posteriormente, se procede a localizar los equipos e infraestructuras que contienen dichas sustancias, junto con los peligros que implican. La industria que maneje o transporte material con potencial explosivo debe pensar que todas las tuberías, bombas, drenajes, zanjas y sistemas de contención ante fugas se consideran una fuente de emisión de gas. Estas fuentes se ubican sobre el plano de la planta y se vinculan a zonas clasificadas según el nivel de riesgo: Zona 0, Zona 1 o Zona 2. La integración de todas estas zonas permite establecer la delimitación

general de las áreas ATEX dentro de la planta. Para obtener la certificación ATEX en una instalación de GLP, se requiere un enfoque técnico riguroso, adaptado a las particularidades del proceso y conforme a la normativa vigente en Colombia. Esta incluye lo estipulado en las Resoluciones 40246, 40247 y 40248 de 2016 emitidas por el Ministerio de Minas y Energía. Además, es obligatorio realizar una evaluación técnica por parte de entidades acreditadas ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), como ICONTEC, que otorgan los certificados de calidad de proceso y producto, así como la certificación de conformidad exigida por la Superintendencia de Industria y Comercio para operar legalmente instalaciones de almacenamiento y envasado de GLP”. [18]

Según Ayabaca, Celi, & Rocha (2018), “el fenómeno conocido como BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) ocurre cuando el gas licuado de petróleo (GLP) en estado líquido, contenido dentro de un tanque, comienza a hervir debido a una exposición prolongada al fuego. Este calentamiento excesivo genera una presión interna elevada, que puede provocar la ruptura del punto más débil del recipiente. Como resultado, el contenido del tanque tanto en fase líquida como en vapor se libera de forma súbita, generando una explosión violenta. Una vez liberado, el líquido se expande de manera significativa, con una relación volumétrica aproximada de 273 a 1 (Pérez Carmona, 2001). Si hay presencia de fuego en el entorno, los vapores se inflaman instantáneamente, intensificando el incendio y liberando una gran cantidad de energía, acompañada por la dispersión de fragmentos del tanque (Eckhoff, 2014). Este tipo de explosión representa un riesgo extremo, ya que puede causar destrucción masiva en su radio de acción (Shariff, Wahab & Rusli, 2016). A nivel global, se han documentado numerosos incidentes relacionados con BLEVE, lo que ha llevado a que organismos de seguridad y control refuercen sus medidas preventivas. En instalaciones de GLP, el manejo de la fase líquida se considera el

aspecto más crítico en términos de seguridad. Por ello, las normativas técnicas exigen que los recipientes de almacenamiento se ubiquen lejos de fuentes de ignición o de cualquier agente que pueda agravar un escenario con fuego. Además, dichas normativas contemplan la implementación de sistemas de protección diseñados para reducir la probabilidad de que se presenten eventos con fuego en las inmediaciones de los tanques. Estas medidas incluyen barreras físicas, sistemas de enfriamiento, sensores térmicos y protocolos de emergencia que buscan mitigar el riesgo de una BLEVE”. [22]

Medidas de prevención.

Las estrategias preventivas para garantizar un manejo seguro del gas licuado de petróleo (GLP) se centran en la detección temprana de fugas y en la supervisión constante de variables críticas como la presión y la temperatura. Una de las acciones más elementales dentro de este enfoque es la incorporación de dispositivos reguladores, que permiten mantener estos parámetros dentro de rangos operativos seguros.

Según Ayabaca, Celi, & Rocha (2018), “los dispositivos reguladores de presión cumplen una función esencial en los sistemas de distribución de GLP, ya que permiten ajustar automáticamente la presión del gas desde niveles elevados en la entrada hasta valores más bajos y estables en la salida, garantizando que se mantenga dentro de los rangos operativos definidos para un flujo específico. Estos equipos pueden ser de tipo fijo o ajustable, y forman parte de configuraciones de regulación de una sola etapa con un único regulador o de doble etapa, que incorporan tanto un regulador de presión media como otro de presión baja. En el contexto de instalaciones de GLP, el regulador de presión se considera un componente clave, ya que compensa las fluctuaciones de presión en la línea de suministro y asegura que el gas llegue con

las condiciones adecuadas para su uso. Además de regular la presión, los sistemas deben estar preparados para enfrentar factores externos como variaciones térmicas o la proximidad de fuentes de calor, incluyendo incendios. Tal como se ha mencionado, uno de los riesgos más críticos en el almacenamiento de GLP es la ocurrencia de una BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), fenómeno que se presenta cuando un recipiente a presión, sometido a sobrecalentamiento, sufre una ruptura repentina y libera una gran cantidad de líquido o vapor a la atmósfera, generando una explosión de alto impacto. Por esta razón, es indispensable implementar medidas de protección que reduzcan la probabilidad de exposición al fuego y garanticen la integridad de los recipientes de almacenamiento.”.

Según Venegas, Ayabaca , Salvatore, Tipanluisa, & Farías (2024), “una medida de seguridad esencial en las instalaciones de almacenamiento de GLP consiste en implementar sistemas de enfriamiento mediante agua. Estos sistemas están diseñados para reducir el riesgo de que se produzca una BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) en caso de que se presente fuego en las cercanías de los recipientes a presión. Su función principal es mantener la temperatura del recipiente dentro de límites seguros, retardando el sobrecalentamiento del contenido y dando tiempo suficiente para que las autoridades competentes puedan intervenir y controlar el incendio antes de que se genere una explosión catastrófica” [15].

Según Sornoza & Moreira (2022), “según diversas fuentes consultadas, incluyendo lo expuesto por Arias (2019), se ha identificado una coincidencia en cuanto a la influencia crítica de la temperatura en los procesos de almacenamiento y transporte del gas propano. Se destaca que los recipientes destinados a contener este tipo de gas deben mantenerse presurizados con el fin de evitar la pérdida de vapores. Además, es obligatorio que cuenten con válvulas de seguridad para el alivio de presión, las cuales permiten liberar pequeñas cantidades de vapor cuando se detecta

un aumento excesivo de presión interna, ya sea por acumulación natural o por efectos térmicos externos. Estas válvulas de alivio están diseñadas para activarse de manera automática en caso de que la presión interna del tanque exceda el límite establecido por su diseño, que comúnmente se sitúa en torno a los 250 psi. Su función es esencial para prevenir situaciones de riesgo, como explosiones, al permitir una descarga controlada que estabilice las condiciones dentro del recipiente.” [2].

Según Sornoza & Moreira (2022), de acuerdo con Armijos (2020), el manejo del GLP exige una serie de controles rigurosos debido a su alta inflamabilidad. El transporte y la distribución de este combustible deben realizarse con extrema precaución, ya que factores como la temperatura y las condiciones climáticas pueden provocar dispersión del gas y desencadenar situaciones de alto riesgo. Para mitigar estos posibles eventos catastróficos, se recomienda el uso de herramientas como los softwares ALOHA y MARPLOT, que permiten estimar el área de impacto y la magnitud de una eventual emergencia. En cuanto al almacenamiento, Rincón (2020) sugiere seguir los lineamientos establecidos en la norma API-650, la cual contempla criterios técnicos para conservar sustancias inflamables en ambientes suficientemente frescos, reduciendo así la probabilidad de ignición accidental por mezcla de vapores con el aire. Por su parte, Márquez (2017) propone la instalación de un sistema de monitoreo en sitio que permita observar en tiempo real las condiciones térmicas dentro de los tanques. Este sistema incluiría la programación de un controlador lógico programable (PLC) modelo S7-1200, junto con la configuración de una interfaz KTP-400 para la visualización de variables físicas, además del desarrollo de la documentación técnica correspondiente. Finalmente, Retuerto (2017) advierte que, incluso con medidas de seguridad implementadas, el almacenamiento de GLP conlleva un riesgo residual. Este puede originarse tanto por fallas en los equipos como por errores humanos.

No obstante, el uso de tanques estacionarios representa una alternativa más segura frente al sistema de cilindros intercambiables, ya que disminuye significativamente los peligros asociados al transporte y la manipulación directa por parte del usuario final. [2]

Tecnologías aplicadas al gas licuado de petróleo

Tecnologías utilizadas en el almacenamiento

Sistemas de medición estáticos

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “en los tanques de almacenamiento se instalan sistemas de medición estática que estiman el volumen de los recipientes calibrados a través de sensores de nivel magnéticos, ultrasónicos, de radar guiado o hidrostáticos. La medición estática requiere la conversión del nivel medido a volumen, utilizando tablas de aforo específicas para cada tanque, y posteriormente la corrección por temperatura y presión para obtener el volumen corregido a condiciones base. Este método es común en almacenamiento estacionario y terminales de distribución”. [29]

Sistemas de medición automática

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “los Sistemas Automáticos para la Medición de Nivel (SAMN) utilizados en tanques de almacenamiento de GLP permiten llevar un control preciso del inventario en tiempo real. Esto se logra mediante el seguimiento continuo del nivel del líquido, basado en tablas de calibración previamente certificadas. Además, estos sistemas incorporan sensores que registran variables esenciales como la temperatura y la presión,

tanto en la fase líquida como en la gaseosa, lo que facilita el cálculo del volumen ajustado a condiciones estándar. Gracias a estas capacidades, se obtiene una supervisión completa de las operaciones de entrada, salida y del volumen total almacenado. En casos donde la planta no dispone de instrumentos de medición adecuados o enfrenta dificultades con los flujómetros durante procesos de carga o descarga, los SAMN pueden validar la transferencia del producto utilizando la capacidad nominal del tanque como referencia. La infraestructura de sensores y dispositivos se comunica con el sistema digital mediante el protocolo Modbus, lo que permite procesar, almacenar y monitorear los datos de forma eficiente. En términos generales, los SAMN desempeñan funciones esenciales dentro del sistema automatizado de gestión de inventarios, entre ellas: Supervisión en línea del inventario, Control de trasiegos, Monitoreo de la fase líquida, Registro de variables del producto: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), presión (bar), Activación de alarmas por niveles críticos, Cálculo de volúmenes ajustados a temperatura de referencia, conforme a normas API/OIML, Balance automático de operaciones de carga y descarga y Almacenamiento de datos del sistema y generación de reportes históricos”. [29]

Sensores IOT

Según Plasencia, Perryman, & Rabanillo (2020), “la Internet de las cosas (IOT) se refiere a una red compuesta por dispositivos informáticos, equipos mecánicos y digitales, así como objetos, seres vivos o personas, todos ellos capaces de comunicarse entre sí mediante identificadores únicos. Esta interconexión permite el intercambio de datos sin necesidad de intervención directa entre humanos o entre humanos y computadoras. Su fundamento teórico radica en incorporar sensores y conectividad a cualquier elemento físico, lo que eventualmente puede incluir funciones de procesamiento autónomo (Guillén, 2016)”. [30]

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “el almacenamiento de GLP está evolucionando rápidamente para responder desafíos de seguridad, eficiencia energética, sostenibilidad y digitalización, siendo el principal enfoque el uso de tanques inteligentes y monitoreo IOT, estos sensores integrados permiten la medición continua de nivel, presión y temperatura del producto, de igual manera la conectividad remota vía LTE-M o NB-IOT facilita la gestión en tiempo real, mejora la trazabilidad, reduce pérdidas y optimiza la logística de reabastecimiento. El nivel del depósito de GLP se determina con alta precisión y sin necesidad de contacto físico, utilizando un sensor basado en el efecto Hall. Este dispositivo se instala directamente en la brida del flotador ya presente, reemplazando al indicador de nivel convencional. La unidad transmisora compacta está protegida y homologada para su uso en la zona ATEX 1 y puede montarse en la boca de acceso para tanques subterráneos y bajo la cubierta protectora o en el exterior para tanques elevados. El sensor y el transmisor pueden montarse en el depósito rápidamente y sin cableado complejo: Sujeta el sensor con 2 tornillos, coloca la antena con la base magnética, conecta el transmisor con el pack de baterías. Los nuevos diseños de tanques incorporan aceros de alta resistencia y recubrimientos anticorrosivos que prolongan la vida útil de la infraestructura. Se destacan configuraciones esféricas, verticales y modulares, que optimizan la capacidad de almacenamiento en función del espacio disponible, estas mejoras se alinean con la norma API 2510 para instalaciones de almacenamiento de GLP a presión”.

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “se integran sistemas de recuperación de vapores, válvulas de baja pérdida y paneles solares para abastecer componentes eléctricos. Estas medidas contribuyen a la reducción de emisiones fugitivas y al cumplimiento de

estándares ambientales exigidos por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y protocolos internacionales como LEED y BREEAM. La aplicación de modelos como SLAB VIEW permite simular dispersión atmosférica en caso de fuga, apoyando el diseño de zonas de exclusión y planes de emergencia. Los gemelos digitales complementan esta funcionalidad al ofrecer una representación virtual de los tanques, permitiendo análisis estructurales, térmicos y de comportamiento dinámico en distintos estados operativos. Se implementan sistemas robotizados en carga y descarga de GLP, junto con válvulas automáticas gobernadas por controladores lógicos programables (PLC). Estas soluciones aumentan la seguridad al reducir la intervención humana en áreas de riesgo y mejoran la eficiencia operativa en terminales y centros de distribución”.

Sistemas de monitoreo en tiempo real

Según Picon & Solano (2024), “en lo relacionado con seguridad industrial, la implementación de tecnologías de detección electroquímica, infrarroja y catalítica de gases ha permitido mejorar la sensibilidad y tiempo de respuesta ante fugas. Estos sistemas son integrados con plataformas SCADA, lo que habilita una actuación remota en válvulas de corte, alarmas sonoras y protocolos de evacuación automatizada. Tal como señalan Quintero et al. (2022), la incorporación de estos dispositivos puede reducir en más del 70% la probabilidad de acumulación peligrosa, especialmente si se combinan con inspecciones preventivas y mantenimiento predictivo basado en análisis vibracional y termografía infrarroja”. [24]

Tecnologías utilizadas en el envasado

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “la medición durante el trasvase de Gas Licuado constituye una etapa esencial dentro de la cadena de valor, particularmente en lo que respecta a la transferencia de custodia, la seguridad de las operaciones y la gestión de inventarios. Este procedimiento no solo asegura la transparencia comercial entre las partes involucradas, sino que también desempeña un papel clave en la protección industrial, la conformidad con normativas vigentes, la optimización logística y la mejora de la experiencia del cliente. Errores de medición pueden derivar en pérdidas económicas, conflictos contractuales o incluso condiciones inseguras que comprometen la integridad de las instalaciones, por ello, contar con tecnologías certificadas, calibradas y adecuadamente seleccionadas fortalece la confiabilidad operacional y permite adoptar buenas prácticas de gerencia integrada en la industria del GLP” [29].

En el contexto colombiano, el sector del Gas Licuado de Petróleo ha incorporado diversas soluciones tecnológicas y metodologías orientadas a lograr una medición exacta del combustible. Estas prácticas se aplican tanto en las etapas de transferencia de custodia donde se requiere precisión para garantizar acuerdos comerciales justos como en los procedimientos internos de gestión de inventarios, contribuyendo a una operación más eficiente y segura. Esta medición es fundamental para garantizar la trazabilidad, la transparencia comercial y la seguridad operativa en toda la cadena de valor.

Según Fernández, Turiño, Mendoza, & Gómez (2022), “La tecnología de medición utilizada en el proceso de envasado se conoce como **Sistemas de medición dinámica**, su propósito es cuantificar el flujo de GLP en tiempo real a través de tuberías, utilizando dispositivos que miden masa o volumen directamente y son esenciales en operaciones de

carga/descarga, transferencia entre agentes y procesos de facturación. Según el Instituto Americano de Petróleo (API), específicamente el Manual de estándares para la producción del petróleo (MPMS). En el ámbito de la medición dinámica del Gas Licuado de Petróleo (GLP), se identifican cuatro categorías principales de instrumentos utilizados: los medidores de desplazamiento positivo, los medidores de turbina, los medidores de flujo másico basados en el principio de Coriolis y los medidores ultrasónicos. Cada uno de estos dispositivos ofrece características particulares que los hacen adecuados para distintas condiciones operativas y niveles de precisión requeridos en procesos de transferencia y control. Todos los sistemas de medición deben cumplir con los requisitos establecidos por la OIML R117 (Organización Internacional de Metrología Legal) y las disposiciones de la CREG en Colombia, las cuales exigen que, la trazabilidad se realice de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI), los equipos cuenten con certificados de calibración periódica y que usen patrones certificados para dar cumplimiento a las clases de exactitud: Clase 0.3, Transferencia de custodia ($\pm 0.3\%$ sistema, $\pm 0.2\%$ medidor) y Clase 1.0: Dispensadores automotrices o medición a temperaturas superiores a -10°C . La normativa API define una estructura escalonada de patrones de medición que inicia con los patrones primarios (nivel 1), considerados como referencia fundamental, y se extiende hasta sistemas avanzados (nivel 7) que incorporan ajustes a las lecturas del medidor para calcular el volumen neto estándar utilizado en operaciones de transferencia de custodia. Esta progresión asegura la integridad y precisión de los datos en cada fase del proceso de medición. Las operaciones de transferencia de GLP requieren sistemas de medición altamente confiables, respaldados por programas de calibración que garanticen trazabilidad técnica y verificable. La elección del método de calibración ya sea en laboratorio o directamente en campo debe considerar aspectos regulatorios, legales, técnicos y comerciales, con el fin de asegurar la validez

de los resultados obtenidos. Cuando las partes involucradas en una transacción comercial emplean tecnologías de medición distintas, se vuelve indispensable que las mediciones sean precisas y trazables. Esto permite establecer una base común de confianza y entendimiento, facilitando el acuerdo entre quien entrega y quien recibe el producto”. [29]

Tecnologías utilizadas en la distribución

Seguimiento GPS

En la industria de distribución de GLP, los sistemas de seguimiento satelital son herramientas clave para mejorar la seguridad, trazabilidad y eficiencia logística. Las funciones básicas deben incluir por lo menos la ubicación en tiempo real de cada vehículo en ruta, el monitoreo de hábitos de conducción (velocidad, frenado brusco, tiempos de operación) y la programación de mantenimientos preventivos, ya que esta información hace parte de los requisitos legales establecidos en la normativa de seguridad vial en Colombia. También es conveniente contar con alertas por desvíos de ruta o de paso por zonas restringidas, así como cualquier otra data que permita la optimización de las rutas y del consumo de combustible, además existen sistemas que integran el control de temperatura y presión en compartimentos de carga, así como otros parámetros de comportamiento del vehículo con sensores IOT elevando su potencial.

Trazabilidad de producto

Durante la distribución de GLP los sistemas de registro de ventas son fundamentales para garantizar trazabilidad, cumplimiento normativo y eficiencia operativa. Las ventas de producto a granel son monitoreadas mediante sistemas de medición dinámica que permiten cuantificar el

flujo de GLP en tiempo real a través de las tuberías de la unidad móvil, estos medidores incluyen un dispositivo electrónico que garantiza la impresión de la factura y el registro de salida del producto. La venta de cilindros por su parte es monitoreada mediante la identificación de un código grabado en el cuello del cilindro, este código permite el registro de sus movimientos, el ingreso a planta vacío, la entrega a distribuidor y la recepción del cliente. Este identificador generalmente se traduce a un código de barras para facilitar la lectura, en algunos casos se utilizan los sensores RFID que en conexión con una impresora permiten obtener la factura y registro de salida del producto.

Automatización de procesos

Según Bravo, Aguilar, Rios, Aguilar, & Rivas (2011), “en las últimas décadas, tanto la automatización industrial como la gestión integrada de la producción han sido objeto de constante evolución y análisis. La transición hacia esquemas de automatización distribuidos ha sido impulsada por el avance sostenido de las plataformas de Tecnología de la Información, cuyas arquitecturas han recorrido un amplio espectro: desde los sistemas centralizados tipo mainframe, pasando por la era de los computadores personales con aplicaciones autónomas, hasta consolidarse en modelos Cliente-Servidor y, más recientemente, en estructuras basadas en Arquitectura Orientada a Servicios (SOA). Este progreso ha generado la necesidad de que los sistemas empresariales no solo se interconecten, sino que colaboren activamente mediante el intercambio de datos y funciones, habilitando una automatización verdaderamente integrada a nivel organizacional. Al mismo tiempo, los dispositivos encargados del control de procesos han incrementado su capacidad de procesamiento, permitiendo que aplicaciones empresariales se ejecuten directamente sobre ellos. Esta evolución ha favorecido la descentralización de las plataformas tecnológicas, fortaleciendo la flexibilidad y escalabilidad de los entornos industriales

contemporáneos. La Gestión Integrada de la Producción en el Sector Energético, en el contexto de la industria del petróleo y gas, especialmente bajo el enfoque de Gerencia Integrada de Yacimientos, ha desarrollado modelos que conectan todos los sistemas de información corporativos, con el objetivo de ofrecer una visión integral del negocio. Esta integración abarca desde datos geológicos y petrofísicos del yacimiento, hasta indicadores dinámicos de producción en tiempo real y métricas operativas clave. La gerencia integrada adquiere un papel estratégico, al coordinar de forma sinérgica los procesos productivos, logísticos, regulatorios y tecnológicos, su finalidad es garantizar eficiencia operativa, seguridad industrial y sostenibilidad del sistema. Entre los elementos clave de esta gestión destacan: La planificación de la producción: sincronizando la demanda estimada con la capacidad instalada para optimizar recursos y programar operaciones eficientemente, el mantenimiento predictivo: aplicado tanto a plantas de envasado como a tanques inteligentes, anticipando fallos y minimizando tiempos de inactividad y la integración SCADA + IOT: combinando sistemas de supervisión con tecnologías inteligentes para monitorear variables críticas en tiempo real y facilitar decisiones basadas en datos confiables”. [27]

Tabla 6. Aplicaciones de los sensores IOT en la industria

AREA	APLICACIÓN	BENEFICIO
Almacenamiento: Monitoreo de tanques	Sensores de nivel conectados, cámaras OCR sobre medidores	Optimiza Inventarios y rutas de suministro
Distribución: Detección de fugas	Sensores de presión y gas con alertas en tiempo real	Mejora la seguridad de procesos
Mantenimiento: Detección de fallas	Análisis de datos históricos y patrones de fallos	Minimiza paradas
Distribución: Logística del transporte	Plataformas integradas con algoritmos de optimización	Reduce costos de transporte
Distribución Servicio al cliente	Análisis de consumo en tiempo real	Permite implementar mejoras en marketing

Nota. Tabla elaborada por el autor con datos recopilados durante el estudio

Nuevas tendencias en el almacenamiento y distribución del GLP

Optimización de Rutas y procesos

Según Bazán, y otros (2019), “la planificación del transporte, entendida como un proceso decisional, parte del reconocimiento de una cantidad limitada de Gas Licuado de Petróleo que debe ser distribuida eficientemente entre múltiples puntos de demanda. Este enfoque busca aplicar criterios de optimización como minimizar costos o tiempos para lograr una asignación adecuada de recursos. Este mismo modelo puede adaptarse al ámbito de la planificación de la producción, donde el objetivo es identificar la mejor combinación posible entre diversas plantas de envasado, cada una con características operativas particulares. En este contexto, los modelos de asignación permiten definir la configuración óptima entre agentes (por ejemplo, vehículos o centros de producción) y tareas específicas, con el fin de alcanzar metas como la reducción de tiempos de operación, disminución de costos logísticos o incremento de la rentabilidad. Dado que estos modelos suelen involucrar múltiples variables y restricciones como distancias, capacidades, condiciones climáticas y normativas de seguridad, se requiere el uso de herramientas computacionales avanzadas. Estas permiten simular escenarios, calcular rutas óptimas y coordinar eficientemente con estaciones de servicio y puntos de distribución, evitando tiempos muertos y mejorando la continuidad operativa.”. [34]

Modelos de Optimización

Según Cortés, Ramos, & González (2020), “el análisis de procesos constituye una herramienta fundamental para identificar debilidades dentro de los sistemas de producción. A través de este diagnóstico, es posible diseñar estrategias orientadas a reducir o eliminar dichas

deficiencias, lo que se traduce en una mejora significativa de la eficiencia operativa. Este enfoque permite un uso más racional de los recursos disponibles como materias primas, energía y equipos de trabajo y contribuye al incremento del rendimiento del personal, así como a la mejora de las condiciones materiales en las que se desempeñan. La intensificación de procesos tiene como objetivo principal su optimización. Para lograrlo, se recurre al desarrollo de modelos matemáticos que representan el comportamiento real de los sistemas productivos. Estos modelos permiten simular escenarios, evaluar alternativas y tomar decisiones fundamentadas en datos concretos. Por ello, resulta esencial abordar el concepto de modelación de procesos como base para implementar mejoras sostenibles y adaptativas en entornos industriales.” [35].

Para optimizar el proceso de abastecimiento, almacenamiento, venta y distribución de GLP en cilindros, es clave definir una función objetivo que integre variables técnicas, logísticas, económicas y de seguridad. En cuanto al abastecimiento debemos considerar el costo del gas, el tiempo de aprovisionamiento y la disponibilidad del producto, ya que Ecopetrol asigna una carga específica a cada cliente. Las variables vinculadas al almacenamiento de GLP deben contemplar tanto los aspectos de seguridad como la temperatura y la presión, que influyen directamente en la medición del volumen dentro del tanque como los factores operativos y económicos. Entre estos últimos se incluyen los costos asociados al almacenamiento, la frecuencia de rotación del producto y el nivel de riesgo relacionado con posibles fugas. Considerar todos estos elementos es esencial para garantizar una gestión eficiente, segura y rentable del inventario.

En cuanto a la distribución del producto la función objetivo debe considerar las rutas, la capacidad de los medios de transporte, costos y frecuencia de entrega. Además, la metodología requiere definir las restricciones del proceso como la capacidad de planta, límites normativos, disponibilidad de vehículos, horarios de entrega y unos indicadores clave para realizar

seguimiento a la implementación. Las herramientas más recomendadas son: programación lineal, simulación dinámica y algoritmos de optimización.

Según Montesinos, Vásquez, Ivonne, & Gracida (2020), “el ciclo de Deming, también denominado ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), representa una herramienta estratégica de gestión que impulsa la mejora continua dentro de los procesos organizacionales. Esta metodología se basa en un enfoque sistemático que permite identificar oportunidades de optimización, implementar soluciones, evaluar resultados y ajustar acciones de manera progresiva. Su carácter iterativo lo convierte en un pilar fundamental para fortalecer la calidad, aumentar la eficiencia operativa y fomentar una cultura de aprendizaje constante en las organizaciones. Esta metodología propuesta por Edward Deming (1989) y ampliado por autores como Summer (2006), permite implementar ajustes progresivos en proyectos y operaciones, promoviendo la eficiencia y la excelencia operativa. Para su aplicación, se recurre a herramientas de análisis que facilitan la identificación de fortalezas y áreas susceptibles de mejora dentro de la organización. Entre las herramientas más empleadas en la gestión y mejora de procesos destacan el diagrama de causa-efecto, también conocido como diagrama de Ishikawa o de espina de pescado, que permite identificar y organizar las posibles causas de un problema, el diagrama de Pareto, fundamentado en el principio 80/20, que ayuda a priorizar los factores más relevantes que generan la mayoría de los efectos. y el análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) que ofrece una visión estratégica del entorno interno y externo de una organización. A estas se suman los flujogramas y esquemas de procesos, que facilitan la visualización secuencial de actividades y la detección de puntos críticos o redundancias. Estas herramientas permiten descomponer cada etapa del ciclo y evaluar su impacto en el desempeño global. Los hallazgos derivados de este análisis proporcionan una base sólida para estructurar iniciativas de

mejora orientadas, promover una cultura institucional enfocada en la excelencia y potenciar el rendimiento organizacional a través de la cooperación entre equipos, el intercambio de saberes y el compromiso conjunto. En este escenario, los controles internos adquieren una importancia clave: disponer de información precisa sobre el funcionamiento real de las operaciones y asegurar la adherencia a los protocolos establecidos permite a la organización obtener una perspectiva más estratégica y fundamentada de su gestión”. [36]

Aplicación de software para inventarios de tanques

Según Interempresas (2021), “en el ámbito del almacenamiento de líquidos en tanques, los registros de medición de producto suelen estar confinados en plataformas tecnológicas obsoletas, con acceso limitado a unos pocos usuarios especializados. No obstante, para avanzar hacia una transformación digital efectiva y elevar el rendimiento operativo, es fundamental que las organizaciones habiliten el acceso ágil y transversal a dichos datos. Este acceso debe extenderse no solo al personal operativo en campo y a los niveles gerenciales, sino también a áreas clave como ventas, compras y finanzas, así como a actores externos relevantes: proveedores, clientes, comercializadores, propietarios del producto e incluso entidades regulatorias”.

Según Interempresas (2021), “una muestra destacada de soluciones tecnológicas para la gestión de inventarios es el software Rosemount TankMaster, diseñado para recopilar datos en tiempo real sobre variables como nivel, temperatura y presión en tanques de almacenamiento. A partir de esta información, el sistema realiza cálculos precisos de volumen y masa, fundamentales para el control de inventario y la transferencia de custodia. La versión móvil de esta herramienta se integra fácilmente con la infraestructura existente, aportando funcionalidades como acceso remoto, conectividad en red y visualización compartida. Esto permite monitorear el

estado de los tanques en tiempo real y obtener una visión integral de toda la planta. Entre sus principales características se encuentran la organización de tanques por grupos, la personalización de parámetros visibles y la creación de listas de seguimiento para unidades críticas. Además, permite configurar distintos niveles de acceso para usuarios según sus funciones, y cuenta con opciones para generar y exportar informes detallados.[32]

La cadena de suministro del gas licuado de petróleo está siendo transformada por tecnologías emergentes que permiten una mayor eficiencia, seguridad y sostenibilidad, la aplicación de la internet de las cosas y los sensores inteligentes optimizará el monitoreo en tiempo real de tanques, detectará fugas y automatizará las alertas, mientras que la automatización de los procesos con la inclusión de drones y RPA, mejorará las inspecciones de los sistemas de distribución e interacciones operativas. Por otro lado, las mejoras en los sistemas de gestión energética enfocaran las decisiones basadas en KPIS, mientras que tecnologías de combustión avanzada y tanques inteligentes con materiales compuestos elevaran el rendimiento y reducirán riesgos.

CONCLUSIONES

El GLP es estratégico en la transición energética, pero su manejo presenta riesgos significativos en la cadena logística, especialmente durante almacenamiento, trasiego y transporte debido a su naturaleza inflamable y condiciones operacionales extremas.

El marco normativo colombiano es robusto, aunque su aplicación en terreno puede ser desigual, afectada por la falta de capacitación, vigilancia limitada y ausencia de tecnologías avanzadas en muchas empresas del sector.

Existen brechas operacionales y culturales que contribuyen a incidentes prevenibles, como fallas humanas, errores sistemáticos y deficiencias en el uso de protocolos, lo cual pone en riesgo vidas, infraestructura y medio ambiente.

Las tecnologías emergentes (IOT, monitoreo en tiempo real, sensores inteligentes) representan una gran oportunidad para optimizar la seguridad, trazabilidad y eficiencia en los procesos logísticos del GLP.

Una gestión técnica e informada, basada en evidencia normativa y experiencias exitosas, es clave para fortalecer una cultura de prevención, lograr eficiencia operativa y consolidar un manejo responsable del recurso.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la incorporación de sistemas integrados de monitoreo en tiempo real, equipados con sensores de presión, temperatura y detección de fugas conectados mediante tecnología IOT, esto permitirá anticipar posibles fallos operativos y responder con mayor eficacia. Esta infraestructura inteligente facilitara además una supervisión continua de las condiciones del sistema, optimizando la toma de decisiones y fortaleciendo la seguridad operativa a través de alertas tempranas y análisis predictivo.

Fortalecer los programas de formación y certificación técnica, orientados a operadores, transportistas y personal logístico en normativas, protocolos y respuesta ante emergencias con GLP.

Auditar periódicamente el cumplimiento normativo y las buenas prácticas, utilizando matrices de evaluación técnica que permitan identificar desviaciones y oportunidades de mejora en cada etapa de la cadena logística.

Promover la adopción de estándares internacionales complementarios, como las guías del NFPA, API o UNE, que amplían los criterios de seguridad y eficiencia más allá de la legislación local.

Incentivar la innovación en el envasado y embalaje del GLP, a través de investigación aplicada, pruebas piloto y alianzas con desarrolladores tecnológicos para crear soluciones más seguras, modulares y eficientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adaniya, B. (2019). Abastecimiento de gas licuado de petróleo. Análisis causal de los factores que lo impactan mediante análisis multivariable. *[Tesis doctoral, Universidad del Perú]*.
- Arnal, J., Albert, C., Sancho, M., & Garcia, B. (2017). Puesta en conformidad ATEX de una instalación de almacenamiento de gases licuados del petróleo. *21 Congreso Internacional de proyectos de gerencia e ingeniería* (págs. 2099-2111). Cádiz: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ayabaca, C., Celi, S., & Rocha, J. (2018). El riesgo en el almacenamiento de GLP en el Ecuador. *INNOVA*, págs. 19-29.
- Bazán, P., Prado, C., Beltran, R., Sanchez, L., Jonathan, R., & Reyes, S. (2019). Propuesta de mejora en la producción y Distribución de Gas Licuado de Petróleo usando herramientas de model de optimización. *LACCEI*, págs. 1-9.
- Bravo, C., Aguilar, J., Rios, A., Aguilar, J., & Rivas, F. (2011). Arquitectura basada en Inteligencia artificial distribuida para la gerencia integrada de producción industrial. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, págs. 405-417.
- Cortés, R., Ramos, F., & González, E. (2020). Métodos de solución para problemas de optimización multiobjetivo en refinerías de petróleo. *Universidad Cienfuegos*, págs. 75-90.
- De la Peña, J. (2014). *Russia Beyond*. Obtenido de https://es.rbth.com/sociedad/2014/06/30/25_anos_del_accidente_de_tren_mas_grave_de_la_historia_de_rusia_41365

- Fernandez, J., Turiño, E., Mendoza, R., & Gómez, A. (2022). Cadena de trazabilidad de las mediciones de flujo de gas licuado de petróleo en la unión Cuba petróleo. *Centro Nacional de Investigaciones científicas*, págs. 2221-2442.
- GASNOVA. (2025). *Panorama Nacional del GLP*. Colombia: Guía del Gas.
- Interempresas. (2021). Nueva aplicación de software para inventarios de tanques de Emerson mejora la eficiencia operativa. *Tecnología y equipamiento para la industria química*, págs. 60-61.
- Lacayo, J. (2015). Caracterización de los modelos de administración de la seguridad de procesos. Sector petroquímico de cartagena caso (Cabot colombiana y Ecopetrol refinería de Cartagena. [Tesis doctoral, Universidad Tecnológica del Bolívar.
- Ministerio de Minas y Energía. (15 de Agosto de 2025). *Ministerio de Minas y Energía*.
Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co>
- Montesinos, S., Vásquez, C., Ivonne, E., & Gracida, E. (2020). Mejora Continua en una empresa en México: Estudio desde el ciclo Deming. *Revista Venezolana de Gerencia*, págs. 1863-1883.
- Picon, L., & Solano, J. (2024). Riesgos laborales de la planta de gas licuado de petróleo de una planta de ceramica en Cuenca Ecuador. *RUNAS*, págs. 1-16.
- Plasencia, R., Perryman, N., & Rabanillo, M. d. (2020). Sistema IoT para el control del nivel de tanques en aguas de la Habana. *Revista Cubana de Transformación digital*, págs. 38-52.
- Silva, A., Barrandeguy, M., & Quintana, J. (2017). Modelación de riesgos hacia los trabajadores y comunidad por emisiones de gas licuado de petróleo, utilizando software Slab View en la ciudad de los Angeles, Chile. *Ciencia & Trabajo*, págs. 183-187.

- Sornoza, J., & Moreira, D. (2022). Importancia del control de la temperatura de almacenamiento en tanques refrigerados de propano. *SAPIENZA*, págs. 131-139.
- Venegas, D., & Ayabaca, C. (2019). Análisis de almacenamiento en sistemas de Gas licuado de petróleo. *INGENIUS*, págs. 113-121.
- Venegas, D., Ayabaca, C., Salvatore, R., Tipanluisa, L., & Farías, Ó. (2024). Sistemas de gas licuado de petróleo: Una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento. *Ingenius*, págs. 81-94.
- Vitón, A. (2024). Evaluación de la eficiencia de las técnicas de inteligencia artificial para la evaluación proactiva de riesgos en petróleo y gas. *DATA & METADATA*, págs. 1-10.