Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, para reducir la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Yerson Eduardo GUERRA LOPEZ

ASESOR

José Manuel GARCIA PANTIGOZO

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guerra, Y. (2026). *Implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, para reducir la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	YERSON EDUARDO GUERRA LOPEZ
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72239200
URL de ORCID	-
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	JOSÉ MANUEL GARCIA PANTIGOZO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06078851
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5142-2164
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	JOSE ANGEL PORLLES LOARTE
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25629269
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	JULIO NUÑEZ VENEGAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07042855
Datos de investigación	
Línea de investigación	NO APLICA

Grupo de investigación	NO APLICA
Agencia de financiamiento	SIN FINANCIAMIENTO
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Los Olivos Entidad: Empresa de servicios logísticos dedicada al transporte criogénico de CO_2 líquido Latitud: -11.77453 Longitud: -76.98543
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2026 - abril 2019
URL de disciplinas OCDE	**https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02** **https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01**

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "VI Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2026-I", bajo la Presidencia del **Dr. José Ángel Porlles Loarte;** el **Mg. Oscar Julio Núñez Venegas (Miembro)** y el **Ing. José Manuel García Pantigozo (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, para reducir la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por el bachiller en Ingeniería Química: **GUERRA LOPEZ, YERSON EDUARDO;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

Diecisiete 17

(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 20 de junio del 2026

Dr. JOSÉ ÁNGEL PORLLES LOARTE
Presidente

Mg. OSCAR JULIO NÚÑEZ VENEGAS
Miembro

Ing. JOSÉ MANUEL GARCÍA PANTIGOZO
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **José Manuel García Pantigozo** en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N°000008-2026-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la tesis cuyo título es **Implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, para reducir la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos**, presentado por el bachiller: **Yerson Eduardo Guerra Lopez**, para optar el título Profesional de Ingeniero Químico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 4% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención de título Profesional de Ingeniero Químico.

Lima, 21 de julio de 2026

UNMSM
Firmado digitalmente por GARCIA PANTIGOZO Jose Manuel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.07.2026 10:37:03 -05:00

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: **José Manuel García Pantigozo**

DNI : 06078851

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mis padres, Pedro y Elizabeth,

por ser el sustento incondicional de cada uno de mis pasos,

cuyo esfuerzo y sacrificio son el motor que impulsa

todo lo que soy y aspiro a ser.

A mi hermana Nathaniel,

por su apoyo constante y el aliento

que acompañó cada etapa de este proceso.

A Deisy María, mi compañera de vida

cuyo soporte incondicional representó una fortaleza invaluable

en los momentos de mayor exigencia académica.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la fortaleza y la claridad que guían cada etapa de este camino.

A mis padres, Pedro y Elizabeth, y a mi hermana Nathaniel, por su respaldo constante e incondicional a lo largo de este proceso. Su presencia constituyó un fundamento indispensable para la conclusión de este trabajo.

A Deisy María, mi compañera de vida por su apoyo permanente y su aliento en los momentos de mayor exigencia académica.

Al Ing. José Manuel García Pantigozo, asesor de esta investigación, por su orientación rigurosa, su disposición permanente y el compromiso profesional con el que condujo cada etapa del desarrollo de este trabajo.

A la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por la formación académica brindada, la cual constituyó el sustento teórico y metodológico de la presente investigación.

A la organización donde se llevó a cabo la presente investigación, por la oportunidad brindada para aplicar los conocimientos adquiridos en un entorno operacional real, contribuyendo así al desarrollo académico y a la mejora continua de sus procesos operativos y de gestión.

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN 1

I.1. Introducción 1

I.2. Planteamiento del Problema 2

I.3. Objetivos 23

I.4. Importancia, Justificación y Alcance de la Investigación 24

I.5. Limitaciones de la Investigación 31

II. REVISIÓN DE LITERATURA 34

II.1. Marco Teórico 34

II.2. Antecedentes del Estudio 43

II.3. Bases Teóricas 48

II.4. Definición de Términos 64

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 66

III.1. Hipótesis 66

III.2. Variables 66

III.3. Operacionalización de las Variables 67

IV. MATERIALES Y MÉTODOS 74

IV.1. Área de Estudio 74

IV.2. Diseño de Investigación 76

IV.3. Población y Muestra 78

IV.4. Procedimientos e Instrumentos de Recolección de Información 78

IV.5. Análisis Estadístico 80

IV.5.1. Justificación de la prueba de McNemar exacta 80
IV.5.2. Confiabilidad de los instrumentos 81
IV.5.3. Plan de análisis estadístico 82
IV.5.4. Índice de cumplimiento compuesto (ICC) 85
V. RESULTADOS 86
V.1. Nota Metodológica sobre la Construcción de la Línea Base del Pretest 86
V.2. Resultados del Pretest (Marzo 2026 — 60 Observaciones) 87
V.3. Implementación del SGC e Índice de Cumplimiento 88
V.4. Resultados del Postest (Abril 2026 — 60 Observaciones) 89
V.5. Comparación Pretest–Postest y Contrastación de Hipótesis 91
VI. DISCUSIÓN 99
VI.1. Discusión de los Resultados 99
VI.2. Contrastación con Estudios Previos 101
VI.3. Implicancias Prácticas y Teóricas 102
VI.4. Líneas de Investigación Futura 102
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 103
VII.1. Conclusiones 103
VII.2. Recomendaciones 104
VIII. REFERENCIAS 106
IX. ANEXOS 113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Matriz de operacionalización de la variable independiente* *68*

Tabla 2. *Matriz de operacionalización de la variable dependiente* *71*

Tabla 3. *Coordenadas geográficas de los puntos de ruta de la flota*..... *74*

Tabla 4. *Estadísticos descriptivos comparativos pretest–postest por categoría de desv* *82*

Tabla 5. *Plan de análisis estadístico: hipótesis, pruebas y estadísticos a reportar* *83*

Tabla 6. *Formulación del contraste estadístico hipótesis específicas H.1, H.2 y H.3*..... *84*

Tabla 7. *Parámetros del análisis de potencia a priori (G*Power)* *80*

Tabla 8. *Registro semanal de viajes y desviaciones críticas — Mes pretest (marzo 2026)* *87*

Tabla 9. *Índice de cumplimiento del SGC por dimensión — inicio y fin de la intervención* *88*

Tabla 10. *Registro semanal de viajes y desviaciones críticas — Mes postest (abril 2026)* ... *89*

Tabla 11. *Comparación de indicadores FDC P/T entre fase pretest y postest*..... *91*

Tabla 12. *Comparación de indicadores FDC P/T entre fase pretest y postest*..... *93*

Tabla 13. *Tabla de contingencia para H.1: desviaciones SP + BP* *94*

Tabla 14. *Tabla de contingencia para H.2: desviaciones de baja presión BP*..... *95*

Tabla 15. *Tabla de contingencia para H.3: desviaciones recurrentes* *96*

Tabla 16. *Síntesis de la contrastación de hipótesis* *98*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. *Diagrama de Ishikawa* *13*

Figura 2. *Corredor operativo* *75*

Figura 3. *Diagrama del diseño preexperimental* O_1 *X* O_2 ..... *77*

Figura 4. *Comparación del FDC por tipo de desviación crítica* *90*

Figura 5. *Tendencia semanal del FDC P/T durante pretest y postest* *91*

Resumen

El transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna enfrenta una elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T), ocasionadas por el deterioro del aislamiento perlita-vacío, competencias insuficientes del personal operativo y ausencia de un sistema formal de gestión basado en riesgos. El presente estudio tuvo como objetivo determinar en qué medida la implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) conforme a la norma ISO 9001:2015, con énfasis en las cláusulas 6.1, 7.2, 7.3, 9.1 y 10.3, redujo la FDC P/T en una empresa de servicios logísticos de Lima, Perú, con operaciones en el corredor de embotelladoras de Lima Metropolitana y Lima Norte. Se adoptó un diseño preexperimental de un solo grupo con medición pretest–postest (O_1 X O_2), con n = 60 viajes por fase (3 tractos × 20 días hábiles), correspondientes a marzo y abril de 2026. El indicador FDC P/T —cociente entre viajes con desviación crítica y total de viajes, expresado por cada 1 000 viajes— se redujo de 566,7 a 166,7 desviaciones por cada 1 000 viajes, equivalente a una reducción relativa del 70,6 %. La prueba de McNemar exacta evidenció una diferencia estadísticamente significativa (OR = 7,0; IC 95 %: 2,5–20,0; $p < 0,001$). Las reducciones por categoría fueron: sobrepresiones SP+BP, 66,7 % ($p < 0,001$; OR = 7,7); baja presión BP, 75,0 % ($p = 0,035$; OR = 7,0); y llenado no conforme LNC, 80,0 %. La eliminación del 90,9 % de los casos de recurrencia ($p = 0,001$; OR corregido = 21,0) confirmó el impacto sistémico del SGC. Los resultados respaldan la hipótesis general y las tres hipótesis específicas. Se concluye que un SGC ISO 9001:2015 orientado explícitamente a riesgos termodinámicos del CO_2 criogénico es implementable y eficaz en flotas pequeñas bajo contexto logístico peruano, aportando un modelo integrador replicable para el sector.

Palabras clave: gestión de calidad, ISO 9001:2015, transporte criogénico, CO_2 líquido, riesgos operacionales, desviaciones de presión, McNemar, PDCA.

Abstract

Cryogenic transportation of liquid CO_2 in tank trucks is affected by a high frequency of critical pressure and temperature deviations (FDC P/T), caused by degradation of perlite-vacuum insulation systems, insufficient technical competence of operational personnel, and the absence of a structured risk-based management framework. This study aimed to determine the extent to which the implementation of a Quality Management System (QMS) under ISO 9001:2015, with emphasis on clauses 6.1, 7.2, 7.3, 9.1, and 10.3, reduced the FDC P/T indicator in a logistics service company operating in Lima, Peru. A single-group pre-experimental design with pretest–posttest measurement (O_1 X O_2) was adopted, with n = 60 trips per phase (3 tractors × 20 working days), covering March and April 2026. The FDC P/T indicator—calculated as the ratio of trips with at least one critical deviation to total trips, expressed per 1,000 trips—decreased from 566.7 to 166.7 deviations per 1,000 trips, representing a relative reduction of 70.6 %. The exact McNemar test confirmed statistical significance (OR = 7.0; 95 % CI: 2.5–20.0; $p < 0.001$). Category-specific reductions were: overpressure events SP+BP, 66.7 % ($p < 0.001$; OR = 7.7); low-pressure BP events, 75.0 % ($p = 0.035$; OR = 7.0); and non-conforming filling LNC, 80.0 %. Elimination of 90.9 % of recurrence cases ($p = 0.001$; corrected OR = 21.0) confirmed the systemic impact of the QMS. All three specific hypotheses were supported. It is concluded that an ISO 9001:2015 QMS explicitly oriented toward the thermodynamic risks of cryogenic CO_2 is implementable and effective in small fleets within the Peruvian logistics context, offering a replicable integrative model for the sector.

Keywords: quality management system, ISO 9001:2015, cryogenic transport, liquid CO_2, operational risks, pressure deviations, McNemar test, PDCA cycle.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Introducción

La presente investigación aborda un problema de alta relevancia técnica, operacional y económica en el sector logístico de gases industriales en el Perú: la elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna, y la ausencia de un sistema estructurado de gestión que permita reducirla de manera sostenida.

El dióxido de carbono líquido se transporta a condiciones termodinámicas estrictas: presión de 15–22 bar y temperatura de −20 °C a −30 °C. Cualquier desviación de estos parámetros compromete la seguridad de los conductores, la integridad del producto y la continuidad del servicio logístico.

La empresa de servicios logísticos objeto de estudio opera tractos y conductores especializados en criogenia para el transporte terrestre de CO_2 líquido. Las cisternas criogénicas pertenecen al cliente (empresa de gases industriales), mientras que la empresa es responsable del tracto, el conductor y los procedimientos operativos.

A pesar de contar con conductores certificados MATPEL y procedimientos básicos de operación, la organización enfrenta desviaciones recurrentes en los parámetros termodinámicos del producto. Estas ocurren principalmente durante las fases de acople, tránsito y descarga, en especial en rutas con alta radiación solar, elevada altitud y variaciones térmicas pronunciadas.

El análisis técnico y documental de la operación identifica tres grupos de causas concurrentes que explican la elevada frecuencia de estas desviaciones, cada una de las cuales actúa de forma independiente pero se potencia con las demás.

En primer lugar, causas técnicas asociadas al deterioro del sistema de aislamiento y de los dispositivos de seguridad: la flota presenta una antigüedad media superior a 15 años sin renovación sistemática del aislamiento perlita-vacío, lo que incrementa progresivamente la ganancia de calor y, con ello, la frecuencia de activaciones de las válvulas de alivio de presión. En segundo lugar, causas operacionales derivadas de la competencia insuficiente del personal en la manipulación de válvulas criogénicas y en los procedimientos de recuperación de presión, situación que se agrava por la ausencia de un perfil formal de competencias técnicas específicas para la operación criogénica de CO_2. En tercer lugar, causas sistémicas relacionadas con la ausencia de un sistema estructurado de gestión basado en riesgos conforme a la norma ISO 9001:2015, que impide identificar, priorizar y tratar las amenazas operacionales antes de que se materialicen en eventos de desviación.

La implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) bajo la norma ISO 9001:2015, con énfasis en las cláusulas 6.1 (acciones para abordar riesgos y oportunidades), 7.2–7.3 (competencia y toma de conciencia del personal) y 9.1–10.3 (seguimiento, medición y mejora continua), proporciona el marco sistémico para transformar la gestión de las desviaciones.

La implementación de este marco sistémico transforma el tratamiento de las desviaciones: cada evento registrado deja de ser una incidencia puntual para convertirse en una oportunidad de mejora estructural, consolidando el tránsito de una gestión reactiva hacia una gestión proactiva y basada en evidencia.

I.2. Planteamiento del Problema

Determinación del Problema

a) Situación problemática a nivel mundial

La problemática mundial del transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna radica en las desviaciones críticas de presión y temperatura, causadas por la infiltración térmica a través del aislamiento de los tanques.

El CO_2 se transporta típicamente a −20 °C y 15–25 bar. Cualquier aumento de temperatura —por radiación solar, conducción o convección— genera boil-off, eleva la presión y activa válvulas de alivio con pérdidas de hasta el 10 % de la carga en trayectos largos.

Estas desviaciones generan inestabilidades termodinámicas, formación de fases mixtas y activaciones frecuentes de sistemas de seguridad. En consecuencia, se incrementan los costos operativos, las emisiones fugitivas y los riesgos de liberación no controlada.

En el contexto del crecimiento exponencial de proyectos de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), el transporte por carretera de CO_2 sigue siendo indispensable para conectar fuentes de emisión con sitios de almacenamiento en distancias cortas a medias y volúmenes medianos. Sin embargo, la ausencia de una gestión integral de riesgos operacionales convierte estas desviaciones en eventos recurrentes que comprometen simultáneamente la integridad de los equipos de contención, la seguridad del personal conductor y la viabilidad económica del servicio logístico (Al Baroudi et al., 2021).

A nivel mundial, la pérdida de presión durante el transporte de CO_2 líquido representa uno de los riesgos más graves y sistemáticamente subestimados del sector. Este fenómeno responde a una característica termodinámica singular del CO_2: cuando la presión interior desciende por debajo del punto triple —5,18 bar a −56,6 °C—, el fluido pasa directamente a fase sólida (hielo seco), sin transitar por una fase líquida estable, obstruyendo válvulas, líneas de conducción y sistemas de alivio de presión.

La obstrucción progresiva de los sistemas de seguridad genera sobrepresiones diferenciales que pueden provocar la rotura de tuberías o rupturas catastróficas del recipiente. Las consecuencias documentadas son de extrema gravedad: asfixias fatales de conductores que

intentan ventilar manualmente los tanques en condición de pérdida de presión, explosiones por acumulación de CO_2 gaseoso en espacios confinados, y liberaciones masivas del fluido en vías públicas o zonas densamente pobladas.

Las empresas logísticas de menor tamaño, que operan la mayoría de las flotas cisterna, carecen frecuentemente de procedimientos estandarizados para identificar y recuperar tanques en condición "low-pressure". Esta problemática se agrava en regiones con climas extremos o rutas con vibraciones intensas que aceleran la degradación del aislamiento (Asian Industrial Gases Association, 2011).

Un segundo riesgo crítico a nivel global es la sobrepresión durante las operaciones de llenado de los camiones cisterna. El proceso de carga puede superar fácilmente la presión máxima de trabajo admisible (MAWP) del recipiente cuando no se monitorea en tiempo real la presión del tanque receptor, situación especialmente frecuente en instalaciones que carecen de sistemas de interbloqueo automático o que operan con mangueras de un solo circuito.

En el caso del CO_2, el uso de mangueras duales (líquido + retorno de vapor) es estándar. Sin embargo, errores operativos o fallos en los sistemas de interbloqueo generan sobrepresiones que activan discos de ruptura o válvulas de alivio, liberando CO_2 gaseoso y creando niebla fría que reduce la visibilidad.

La ausencia de sistemas independientes de protección —como válvulas de cierre automático o sensores redundantes— es común en flotas de países en desarrollo, donde el mantenimiento predictivo es limitado. Estas desviaciones durante el llenado representan hasta el 30 % de las no conformidades reportadas en auditorías de seguridad de gases industriales (European Industrial Gases Association, 2023).

La incertidumbre en la gestión de riesgos operacionales en el transporte por carretera de CO_2 líquido se refleja en la escasa integración de análisis cuantitativos de probabilidad y consecuencia en los sistemas de gestión existentes.

Los costos de transporte por camión son altamente sensibles a la frecuencia de desviaciones críticas. Cada evento de alivio de presión implica pérdidas de producto, tiempos muertos, inspecciones obligatorias y posibles multas regulatorias. Asimismo, las liberaciones accidentales generan impactos ambientales y sanitarios: la exposición a concentraciones >5 % v/v de CO_2 causa pérdida de conocimiento en minutos.

La mayoría de las empresas logísticas operan bajo normas de transporte de mercancías peligrosas (ADR, DOT, etc.), pero carecen de un marco sistemático de gestión de riesgos operacionales que identifique amenazas específicas del CO_2. Esta brecha explica por qué la tasa de desviaciones críticas no ha disminuido significativamente a pesar del aumento del volumen transportado (Knoope, 2015).

La expansión mundial acelerada de proyectos CCUS está generando una demanda de transporte de CO_2 que superará los 100 millones de toneladas métricas por año en la próxima década, según estimaciones del sector. En este escenario, el transporte por carretera en camiones cisterna mantendrá su relevancia estratégica como solución de conectividad para fuentes pequeñas y medianas que no justifican infraestructura de ductos dedicada.

Sin la implementación de un SGC ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales (cláusula 6.1), las desviaciones de presión y temperatura continuarán siendo la principal causa de no conformidades, incidentes y costos evitables.

La norma ISO/TR 27918:2018 reconoce que el riesgo en la cadena de transporte de CO_2 debe abordarse durante todo el ciclo de vida, incluyendo la fase logística por carretera, y recomienda la integración de análisis HAZOP, bow-tie y matrices de riesgo en los sistemas de gestión empresariales. La ausencia de esta integración genera una brecha de competitividad y seguridad que el presente trabajo busca cerrar (International Organization for Standardization, 2018).

b) Situación problemática a nivel latinoamericano

La problemática del transporte criogénico de CO_2 líquido en América Latina se caracteriza por su escala muy limitada y su dependencia casi exclusiva de operaciones pequeñas y fragmentadas, sin la infraestructura logística especializada que existe en regiones con mayor desarrollo de proyectos CCUS. En Argentina, por ejemplo, el transporte de CO_2 se realiza únicamente a pequeña escala, sin infraestructura de ductos ni terminales especializadas de carga y descarga, lo que obliga a operar con flotas envejecidas y de bajo nivel tecnológico.

Esto implica flotas de cisternas muchas veces envejecidas, sin sistemas redundantes de monitoreo de presión y temperatura, operadas por empresas que atienden principalmente la industria de bebidas y alimentos. Las rutas andinas o amazónicas, con grandes variaciones térmicas y altitudes extremas, aceleran la degradación del aislamiento perlita-vacío.

La falta de proyectos CCUS a escala industrial significa que no existe experiencia acumulada ni inversión en sensores IoT, válvulas automáticas o procedimientos estandarizados de recuperación de presión baja. En consecuencia, cualquier desviación crítica se traduce en pérdidas económicas directas, emisiones fugitivas y riesgos para los conductores (PtX-Hub, 2024).

Los riesgos asociados al manejo de líquidos criogénicos durante el transporte por carretera son particularmente graves en el contexto latinoamericano, donde la escasa capacitación técnica especializada y la ausencia de protocolos regionales unificados crean condiciones propicias para la ocurrencia de eventos de alta consecuencia. Esta situación no es exclusiva de un país: constituye un patrón estructural observable en toda la región.

Mannan (2012) documenta que las cisternas de CO_2 líquido que pierden presión pueden pasar rápidamente a fase sólida, obstruyendo válvulas y generando sobrepresiones diferenciales que rompen tuberías o provocan rupturas catastróficas.

La mayoría de las flotas en países como Perú, Colombia o México operan bajo las disposiciones genéricas del ADR o el DOT, sin procedimientos operativos específicamente diseñados para las particularidades del CO_2 criogénico. Esta brecha formativa y operativa multiplica significativamente la probabilidad de que ocurran eventos graves, especialmente en rutas con tráfico pesado, climas extremos o escasa cobertura de servicios de emergencia especializados (Mannan, 2012).

Las brechas regulatorias y de infraestructura para el transporte de CO_2 por carretera representan un obstáculo crítico en los países con mayor potencial CCUS de la región, como México y Brasil. Aunque existen experiencias de inyección de CO_2 para EOR desde hace décadas (IEA, 2016), el transporte por camión cisterna sigue siendo marginal.

No existen normativas específicas que exijan monitoreo continuo de presión y temperatura, sistemas de interbloqueo en llenado ni análisis de riesgos operacionales integrados. Las empresas logísticas medianas y pequeñas operan con equipos que no cumplen los estándares actuales de MAWP y aislamiento, sin obligación legal de implementar gestión de riesgos según ISO 31000 o cláusula 6.1 de ISO 9001:2015.

Esta situación genera una alta probabilidad de desviaciones críticas, con consecuencias económicas —pérdidas de producto, tiempos muertos, multas— y ambientales —liberaciones no controladas— que desincentivan el desarrollo del segmento (IEA, 2016).

En América Latina Sur (Perú, Bolivia, Chile, Argentina), las empresas de gases industriales líderes —Linde, Air Liquide— mantienen certificaciones ISO 9001 e ISO 45001. Sin embargo, la gestión de riesgos operacionales específicos del CO_2 criogénico sigue siendo incipiente.

Los informes de sostenibilidad revelan que las flotas operan con procedimientos genéricos de mantenimiento y capacitación, sin énfasis en la identificación de amenazas termodinámicas como infiltración térmica, formación de hidratos o corrosión por impurezas.

En Perú, las rutas desde plantas de producción en Lima o Callao hacia clientes del sector bebidas e industria alimentaria atraviesan zonas de alta radiación solar y cambios bruscos de altitud. Estas condiciones aceleran las desviaciones de presión, pero no cuentan con planes de mitigación sistemáticos ni KPI de frecuencia de alivio. Las auditorías internas detectan no conformidades recurrentes que se corrigen reactivamente, dejando a las empresas logísticas vulnerables ante el aumento esperado de volúmenes de CO_2 (Linde, 2024).

La expansión incipiente de proyectos CCUS en América Latina exigirá en la próxima década volúmenes de transporte por carretera que superarán la capacidad actual de las flotas existentes. Sin embargo, la mayoría de las empresas de servicios logísticos operan bajo marcos de gestión fragmentados y sin análisis cuantitativos de riesgo específicos para CO_2 líquido criogénico.

La norma ISO 9001:2015 (cláusula 6.1) y la ISO/TR 27918:2018 ofrecen el marco para cerrar esta brecha. Su adopción con enfoque en riesgos termodinámicos sigue siendo excepcional en la región, lo que genera competitividad reducida, mayores costos por desviaciones críticas y un riesgo elevado de accidentes.

En consecuencia, implementar un SGC ISO 9001:2015 con énfasis explícito en gestión de riesgos operacionales se convierte en una necesidad estratégica regional para garantizar seguridad, eficiencia y viabilidad económica del transporte por carretera de CO_2 líquido (Milieu Ltd, 2016).

c) Situación problemática a nivel nacional

La problemática del transporte criogénico de CO_2 líquido en el Perú se caracteriza por su escala muy reducida y su concentración en un número limitado de operadores especializados: Linde, Air Liquide, Oxifam y un conjunto de distribuidoras locales. La producción se concentra geográficamente en plantas ubicadas en Lima y Callao, mientras que

los clientes industriales del sector pesquero, minero y de bebidas carbonatadas se distribuyen en distintas provincias del país.

Las rutas de distribución obligan a cruzar la cordillera de los Andes, con cambios de altitud que pueden alcanzar los 4 800 m.s.n.m. y variaciones térmicas extremas entre la costa y la sierra. Estas condiciones incrementan el diferencial de presión atmosférica exterior y la ganancia de calor por convección y conducción, acelerando la infiltración térmica en los tanques perlita-vacío y generando boil-off no controlado que se manifiesta en desviaciones críticas de presión y temperatura durante el tránsito.

La mayoría de las cisternas en operación carecen de sistemas de monitoreo remoto mediante IoT o alarmas automáticas de presión y temperatura. En ausencia de estos mecanismos, las desviaciones solo se detectan al arribar al cliente o en el momento en que se activan las válvulas de alivio, situación que genera pérdidas de producto estimadas entre el 8 y el 12 % de la carga en trayectos largos (Linde Gas Perú, 2020). Este problema se agrava por la antigüedad de la flota nacional, que en muchos casos supera los 15 años sin renovación sistemática del sistema de aislamiento, lo que deteriora progresivamente la eficiencia térmica de los recipientes (Moubray, 2001).

Los riesgos asociados a la pérdida de presión durante el transporte por carretera son particularmente graves en el contexto peruano. Cuando la presión interna cae por debajo del punto triple del CO_2 (5,18 bar / −56,6 °C), el fluido pasa rápidamente a fase sólida, obstruyendo válvulas, líneas de alivio y sistemas de descarga.

Esto genera sobrepresiones diferenciales que pueden romper tuberías o provocar rupturas catastróficas del tanque. En rutas peruanas con vibraciones intensas y mantenimiento predictivo limitado, la probabilidad de esta condición aumenta significativamente.

Los conductores, muchas veces sin entrenamiento específico en "low-pressure recovery", intentan ventilar manualmente, exponiéndose a atmósferas con >10 % v/v de CO_2

que causan pérdida inmediata de conocimiento. La ausencia de procedimientos estandarizados nacionales explica la recurrencia de eventos casi-fatales en flotas pequeñas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Las brechas regulatorias y de infraestructura son críticas. El DS 021-2008-MTC clasifica correctamente el CO_2 líquido refrigerado como mercancía peligrosa clase 2.2 y exige vehículos con requisitos técnicos adicionales, permisos MATPEL, señalización y planes de emergencia.

Sin embargo, el reglamento no establece obligaciones específicas de monitoreo continuo de presión y temperatura, sistemas de interbloqueo automático en llenado ni análisis cuantitativos de riesgo operativo. Las empresas medianas y pequeñas cumplen lo mínimo legal, pero carecen de sensores redundantes, registradores de datos o procedimientos de recuperación de presión baja.

Esta ausencia normativa explica por qué las desviaciones críticas representan la principal causa de no conformidades internas y tiempos muertos en la logística de gases industriales en el Perú (Linde, 2024).

Las empresas líderes del sector en el Perú —Linde, Air Liquide— mantienen certificaciones ISO 9001:2015 e ISO 45001 para sus operaciones logísticas. Sin embargo, la gestión de riesgos operacionales específicos del CO_2 criogénico sigue siendo incipiente.

Los procedimientos de mantenimiento y capacitación son genéricos y no incorporan análisis de amenazas termodinámicas. En rutas desde Lima hacia la sierra, las condiciones de alta radiación solar y cambios bruscos de presión atmosférica generan desviaciones recurrentes que se corrigen reactivamente.

La ausencia de un SGC orientado explícitamente a riesgos operacionales según la cláusula 6.1 de la ISO 9001:2015 deja a las flotas peruanas vulnerables ante el aumento futuro de volúmenes de CO_2 (Linde, 2024).

El Perú cuenta con potencial real de proyectos CCUS en sectores cementero, siderúrgico y minero (captura de 1–3 $MtCO_2$/año estimada en el horizonte 2030–2040). El transporte por carretera seguirá siendo indispensable para conectar fuentes dispersas con sitios de utilización o almacenamiento geológico.

Sin embargo, la mayoría de las empresas logísticas operan bajo marcos de gestión fragmentados y sin análisis de riesgos operacionales específicos para CO_2 líquido criogénico. La norma ISO 9001:2015 (cláusula 6.1) y las recomendaciones de ISO/TR 27918:2018 ofrecen el marco ideal para cerrar esta brecha.

En consecuencia, implementar un SGC ISO 9001:2015 con énfasis en gestión de riesgos operacionales se convierte en una necesidad estratégica nacional (Santa Cruz, 2023).

d) Descripción del problema central

La empresa de servicios logísticos objeto del presente estudio provee tractos y conductores para el transporte de cisternas criogénicas de CO_2 líquido propiedad del cliente. El fluido debe mantenerse dentro de un rango termodinámico estricto: presión entre 15 y 22 bar, y temperatura entre −20 °C y −30 °C.

Si bien el aislamiento y los dispositivos de seguridad de las cisternas son responsabilidad del cliente, la operación durante el transporte recae íntegramente sobre el personal operativo de la empresa: verificación preoperacional, conducción en ruta, manipulación de válvulas y reporte de incidencias.

El problema central identificado es la elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante las operaciones de acople, tránsito y descarga, detectadas o generadas durante la operación bajo responsabilidad del operador logístico (Nguyen et al., 2025; Bakhtiar et al., 2023).

Estas desviaciones se manifiestan en tres formas principales.

La primera es la sobrepresión (SP): toda condición en que la presión interior supera el rango operativo de 15–22 bar o activa la válvula de alivio. En CO_2 bifásico, esto constituye simultáneamente evidencia de temperatura del fluido por encima del límite admisible, dado que presión y temperatura de saturación son termodinámicamente dependientes (NIST, 2023).

La segunda es la baja presión o condición low-pressure (BP): presión interior que desciende hasta comprometer la descarga del producto, con riesgo de congelación de conexiones u obstrucción de líneas. La tercera es el llenado no conforme (LNC): operación de carga en que no se ejecuta el procedimiento de retorno de vapor, generando una sobrepresión diferencial que activa la válvula de alivio o compromete la integridad del sistema.

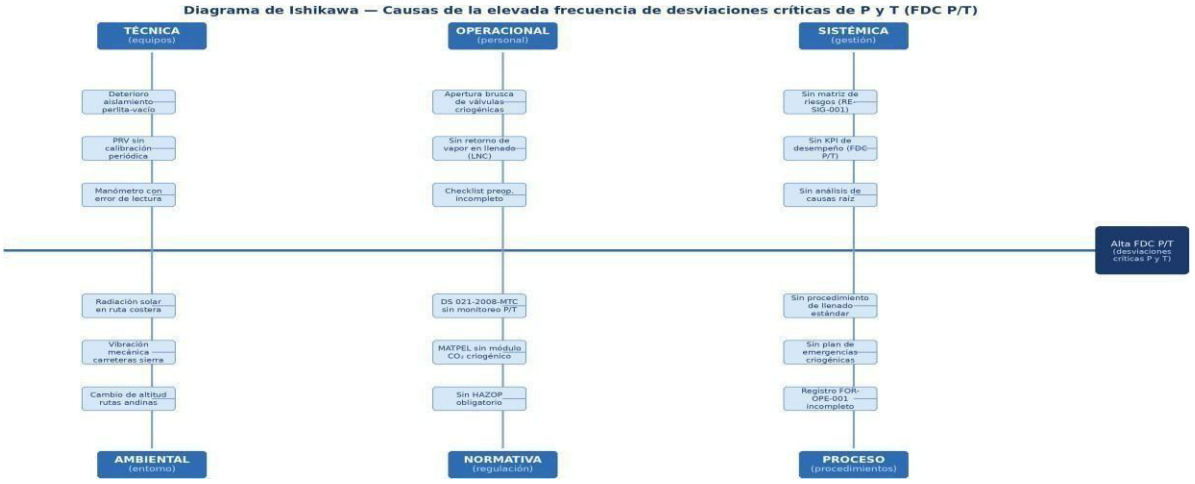
Estos eventos no son esporádicos ni atribuibles exclusivamente a condiciones climáticas excepcionales. Se presentan con una frecuencia recurrente a lo largo del ciclo operativo de la flota, constituyendo el indicador más sensible de un sistema de gestión que aún opera de manera reactiva, sin mecanismos formales de identificación anticipada, priorización y tratamiento sistemático de los riesgos operacionales inherentes al transporte criogénico de CO_2 (Nguyen et al., 2025; Bakhtiar et al., 2023).

e) Causas del Problema

El análisis técnico y documental de las operaciones de la empresa permite identificar tres grupos de causas que explican la elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura.

Figura 1

Diagrama de Ishikawa (causa-efecto) — causas de la elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T) durante el transporte criogénico de CO_2 líquido.



Nota. Elaboración propia basada en EIGA (2023), AIGA (2011), Nguyen et al. (2025) e ISO 9001 (2015).

Causas técnicas vinculadas al deterioro del sistema de aislamiento y de los dispositivos de seguridad. La flota de cisternas presenta una antigüedad media superior a 15 años sin renovación sistemática del sistema de aislamiento perlita-vacío.

El deterioro del vacío intersticial —por pérdida de hermeticidad, envejecimiento del material absorbente o daños mecánicos— incrementa la ganancia de calor desde el entorno (heat ingress) y eleva progresivamente la tasa de boil-off a valores entre tres y cinco veces superiores a los especificados por el fabricante (Nguyen et al., 2025).

Este deterioro no es detectable visualmente durante las inspecciones convencionales. En ausencia de un programa de mantenimiento preventivo con periodicidad definida, los conductores solo perciben el problema cuando ya se ha materializado una desviación crítica.

De manera complementaria, las válvulas de alivio de presión (PRV) no cuentan con un programa de calibración periódica documentado. Esto eleva el riesgo de activaciones

prematuras o tardías, generando tanto liberaciones innecesarias de producto como condiciones de sobrepresión no mitigadas (EIGA, 2023).

Causas operacionales vinculadas a la competencia y actuación del personal. La manipulación incorrecta de válvulas criogénicas durante la transferencia de CO_2 líquido —errores en la apertura de válvulas de retorno de vapor, cierre prematuro de válvulas de llenado o inadecuada interpretación de lecturas de presión— constituye la causa principal de las desviaciones críticas de baja presión (AIGA, 2011).

El personal operativo carece de un perfil de competencias técnicas formalmente definido para la operación criogénica de CO_2. Su actuación depende de la experiencia acumulada individualmente, sin verificación objetiva del desempeño ni capacitación práctica periódica.

La formación disponible se limita a las certificaciones genéricas MATPEL exigidas por el DS N.° 021-2008-MTC. No incluye competencias específicas como el reconocimiento de señales de pérdida de presión, el procedimiento de recuperación de tanques en condición low-pressure o la comprensión de la termodinámica básica del CO_2 en torno al punto triple.

Esta brecha formativa incrementa significativamente la probabilidad de errores humanos en maniobras de transferencia (Psomas & Antony, 2015). Asimismo, los checklists preoperacionales no incluyen la verificación de parámetros críticos específicos del CO_2 criogénico, permitiendo que cisternas con presiones fuera del rango óptimo inicien su trayecto sin intervención correctiva.

Causas sistémicas vinculadas a la ausencia de un sistema formal de gestión basada en riesgos. La empresa carece de un sistema estructurado conforme a la norma ISO 9001:2015.

No existe una identificación formal de las amenazas operacionales específicas del transporte criogénico de CO_2 —degradación del aislamiento, fallas en instrumentos de lectura, vibraciones en rutas deterioradas, formación de tapones de hielo seco o errores durante el

retorno de vapor en el proceso de llenado— ni una matriz de riesgos operacionales que permita priorizar según criterios objetivos de probabilidad e impacto.

La ausencia de indicadores clave de desempeño (KPI) formalmente definidos —como la frecuencia de desviaciones críticas por 1 000 viajes (FDC P/T) o la tasa de boil-off— impide detectar tendencias negativas antes de que se materialicen en incidentes.

Cuando ocurre una desviación crítica, la empresa no dispone de un proceso sistemático de análisis de causas raíz ni de verificación de eficacia de las acciones correctivas. En consecuencia, los mismos eventos se repiten sobre los mismos equipos, evidenciando la ausencia de mecanismos efectivos de aprendizaje organizacional (Tarí et al., 2012).

f) Efectos y Consecuencias del Problema

Las desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 generan impactos de diversa naturaleza que afectan simultáneamente la seguridad, la continuidad operativa, la calidad del producto y la viabilidad económica del servicio logístico.

En el plano de la seguridad, las consecuencias más graves son potencialmente fatales. Cuando la presión interior desciende por debajo del punto triple del CO_2 (5,18 bar / −56,6 °C), el fluido pasa a fase sólida, obstruyendo válvulas, líneas de alivio y sistemas de descarga.

Esto genera sobrepresiones diferenciales que pueden romper tuberías o provocar rupturas catastróficas del tanque. Los conductores sin entrenamiento específico intentan ventilar manualmente, exponiéndose a concentraciones superiores al 10 % v/v de CO_2 que causan pérdida inmediata de conocimiento (AIGA, 2011).

En el otro extremo, las sobrepresiones no controladas activan los dispositivos de alivio, liberando CO_2 gaseoso en la vía pública. En condiciones de espacio confinado o ventilación deficiente, las concentraciones pueden superar los límites de exposición de la ACGIH (5 000 ppm para 8 horas) y producir efectos de asfixia en terceros (Linde, 2023).

En el plano de la calidad del producto, las desviaciones de baja presión producen ciclos de evaporación y recondensación parcial del CO_2, lo que favorece la concentración de impurezas en la fase líquida y el incremento del contenido de humedad por encima de los límites admisibles. Este efecto es especialmente relevante en el segmento de la industria de bebidas carbonatadas, donde la pureza del CO_2 es un parámetro crítico de calidad.

Esto compromete el cumplimiento de la especificación del CO_2 de grado alimentario (E 290) que exigen los clientes de la industria de bebidas carbonatadas, conforme a los estándares de la International Society of Beverage Technologists (ISBT), que establecen una pureza mínima de 99,9 %.

Los rechazos en la recepción generan costos directos de devolución y disposición que erosionan la rentabilidad del servicio (Alshahrani y Husain, 2024).

En el plano operativo y económico, las desviaciones críticas desencadenan una cadena de impactos que afectan la continuidad y rentabilidad del servicio. Cada evento implica la inmovilización obligatoria de la unidad para inspección técnica, con los correspondientes tiempos muertos no planificados. Las pérdidas de producto por activación de válvulas de alivio se estiman entre el 8 y el 12 % de la carga en trayectos largos, cifra que se acumula de manera significativa a lo largo de la operación mensual de la flota.

Asimismo, se generan mayor frecuencia de intervenciones de mantenimiento correctivo y potenciales sanciones regulatorias por parte del MTC y SUTRAN. La pérdida de confianza de los clientes industriales —especialmente en los segmentos de bebidas y minería— se traduce en deterioro de la posición competitiva de la empresa (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

En el plano ambiental, las liberaciones no controladas de CO_2 durante eventos de alivio de presión representan emisiones fugitivas de un gas de efecto invernadero que, aunque clasificado como clase 2.2 (no inflamable, no tóxico) bajo el ADR y el DS 021-2008-MTC,

contribuye al calentamiento global y puede generar acidificación local en las áreas de liberación. En el contexto del crecimiento de los proyectos de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), estas pérdidas resultan especialmente contraproducentes desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental (Al Baroudi et al., 2021).

g) Incidencia Espacial y Temporal del Problema

Espacialmente, el problema se manifiesta con mayor intensidad en los corredores de distribución que conectan las plantas de carga de CO_2 líquido en Lima y Callao con los clientes del sector pesquero, minero y de bebidas carbonatadas en Lima Metropolitana, Callao e Ica.

Las rutas que atraviesan tramos de alta radiación solar en la franja costera y segmentos con cambios bruscos de altitud —hasta 4 800 m.s.n.m. en corredores andinos— representan los puntos críticos de mayor incidencia de desviaciones de presión. Las rutas deterioradas generan vibraciones continuas que aceleran adicionalmente la degradación del aislamiento perlita-vacío (Nguyen et al., 2025; AIGA, 2011).

Intraoperativamente, las desviaciones de presión se presentan con mayor frecuencia en dos momentos críticos: (i) las operaciones de conexión y desconexión de mangueras en planta de carga, por procedimientos deficientes o equipos deteriorados; y (ii) el tránsito en rutas de alta altitud, donde la variación de la presión atmosférica exterior afecta el diferencial de presión del sistema criogénico (EIGA, 2023).

Temporalmente, el problema es de carácter continuo y recurrente, no vinculado a estacionalidades discretas sino a la operación cotidiana de la flota.

La intensidad de las desviaciones de baja presión por ganancia de calor se acentúa durante los meses de verano austral (diciembre–marzo), cuando las temperaturas ambientales en la costa peruana pueden superar los 30 °C, incrementando el diferencial térmico entre el entorno y el producto.

La ausencia de un sistema formal de registro y seguimiento impide cuantificar con exactitud la tendencia histórica del indicador. No obstante, los registros operativos y los reportes de mantenimiento evidencian una recurrencia sostenida que no ha mostrado reducción significativa en los últimos años (Bakhtiar et al., 2023).

h) Intentos de Solución al Problema

La empresa ha ensayado respuestas parciales al problema que, si bien han generado mejoras puntuales, no han logrado reducir de manera sostenida y sistemática la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura, precisamente por carecer de un enfoque integrado y basado en riesgos.

En el ámbito del mantenimiento, la empresa ha aplicado intervenciones correctivas sobre los equipos con tasas de boil-off elevadas: recargas de vacío intersticial en cisternas seleccionadas y sustitución de válvulas de alivio deterioradas.

Sin embargo, estas intervenciones se ejecutan de manera reactiva —una vez que el deterioro ya ha generado desviaciones detectables— y no responden a un programa preventivo con periodicidad definida ni criterios de priorización basados en antigüedad o historial de desviaciones por unidad.

En consecuencia, las cisternas con aislamiento degradado continúan operando entre intervenciones correctivas, exponiendo las operaciones a riesgos perfectamente previsibles y tratables (Nguyen et al., 2025).

En el ámbito de la capacitación, la empresa ha realizado charlas de seguridad periódicas sobre el manejo de mercancías peligrosas y ha renovado las certificaciones MATPEL del personal conforme a los plazos del DS 021-2008-MTC.

No obstante, estas acciones formativas no incluyen competencias técnicas específicas para la operación criogénica de CO_2: reconocimiento de señales de condición low-pressure,

procedimientos de recuperación de presión, interpretación de la curva de saturación del CO_2 o maniobras de transferencia con retorno de vapor.

Tampoco se verifica el desempeño operacional mediante observación en campo con evidencia documentada. La toma de conciencia del personal sobre las consecuencias físicas de una desviación no ha sido abordada de forma sistemática (Psomas & Antony, 2015).

En el ámbito del control operacional, la empresa ha implementado formatos de registro de viaje y listas de verificación preoperacionales de carácter genérico.

Sin embargo, estos instrumentos no definen umbrales formales de desviación crítica como criterios de acción, no están vinculados a un flujo de análisis de causas raíz ni a planes de acción con responsable y fecha de cierre, y su seguimiento es discontinuo.

Como resultado, los eventos de desviación registrados no se convierten en insumo para el aprendizaje organizacional. Su tratamiento se limita a la corrección inmediata del síntoma observable, sin identificar ni eliminar la causa raíz subyacente (Tarí et al., 2012).

En el ámbito normativo, la empresa cumple con los requisitos mínimos del DS N.° 021-2008-MTC, que clasifica el CO_2 líquido refrigerado como mercancía peligrosa clase 2.2 y exige vehículos con requisitos técnicos adicionales, permisos MATPEL, señalización y planes de emergencia.

Sin embargo, como lo señala el análisis regulatorio del sector, esta norma no establece obligaciones específicas de monitoreo continuo de presión y temperatura, sistemas de interbloqueo automático en llenado ni análisis cuantitativos de riesgo operativo. Por tanto, el cumplimiento legal vigente es condición necesaria pero insuficiente para controlar la frecuencia de desviaciones críticas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2008).

La constatación de que los intentos de solución parciales implementados hasta la fecha no han producido una reducción sostenida evidencia la necesidad de un enfoque cualitativamente diferente.

Este enfoque es la implementación de un SGC ISO 9001:2015 con énfasis explícito en la gestión de riesgos operacionales (cláusula 6.1), la competencia y toma de conciencia del personal (cláusulas 7.2 y 7.3) y los mecanismos de seguimiento, medición y mejora continua (cláusulas 9.1 y 10.3).

Este enfoque sistémico transforma la gestión de las desviaciones de reactiva a proactiva, convirtiendo cada evento registrado en una oportunidad de mejora estructural (Cződörová y Gnap, 2023; Tarí et al., 2012).

Todo ello evidencia la necesidad urgente de implementar un enfoque estructurado que permita reducir de manera significativa y sostenida la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura, optimizar la operación del transporte criogénico de CO_2 y garantizar la seguridad, la calidad del producto y la viabilidad económica del servicio logístico de la empresa.

i) A nivel de la empresa

A nivel empresarial, la problemática se evidencia en una empresa de servicios logísticos que provee tractos y conductores especializados para el transporte de CO_2 líquido criogénico en cisternas propiedad del cliente.

La operación depende del desempeño del conductor durante el acople, el tránsito y la descarga. A pesar de contar con conductores certificados MATPEL, la organización enfrenta desviaciones recurrentes en los parámetros termodinámicos del producto, especialmente en rutas con fuerte radiación solar, alta altitud o variaciones térmicas pronunciadas.

Estas condiciones incrementan el riesgo de boil-off, aumento de presión interna, activación de válvulas de alivio y pérdidas de producto que son reportadas por el cliente.

Adicionalmente, se han registrado episodios en los que la presión tiende a descender por debajo de los niveles operativos mínimos al arribar al cliente, generando riesgo de formación de hielo seco en líneas y válvulas. Esto provoca retrasos en las entregas y obliga a ejecutar maniobras adicionales para restablecer los parámetros óptimos del sistema. La empresa aún no cuenta con un sistema formal para analizar causas raíz ni para monitorear la frecuencia de estas desviaciones, por lo que los incidentes se gestionan de manera reactiva, dependiendo en gran medida de la experiencia del conductor y del personal operativo.

Otro aspecto crítico es la variabilidad en la competencia técnica del personal encargado del llenado, la transferencia y el aseguramiento de las conexiones criogénicas. La manipulación incorrecta de válvulas, la falta de estandarización en los checklists y la ausencia de evaluaciones periódicas de competencia incrementan la probabilidad de errores humanos que pueden derivar en situaciones de sobrepresión, baja presión o fallas durante la descarga en las instalaciones del cliente.

A nivel sistémico, la empresa carece de un sistema estructurado de gestión basado en riesgos. En consecuencia, no existe una identificación formal de las amenazas operacionales inherentes al proceso —degradación del aislamiento, fallas en instrumentos de lectura, vibraciones continuas en rutas deterioradas, formación de tapones de hielo seco, errores durante el retorno de vapor en el proceso de llenado o deficiencias en el mantenimiento preventivo—. La ausencia de este enfoque sistemático impide priorizar los riesgos según criterios objetivos de probabilidad e impacto, definir planes de mitigación específicos y verificar la eficacia de las acciones implementadas en ciclos sucesivos de mejora.

Esta situación genera impactos de múltiple naturaleza. Desde el plano operativo, se producen retrasos en la entrega del producto, inmovilizaciones de unidades y paradas no

programadas que incrementan el consumo de combustible. Desde el plano económico, las devoluciones por no conformidad y las potenciales sanciones regulatorias erosionan la rentabilidad del servicio, mientras que desde el plano reputacional, la recurrencia de incidencias deteriora la relación de confianza con los clientes industriales. La empresa reconoce que la ausencia de un SGC con énfasis en riesgos operacionales limita estructuralmente su capacidad para controlar las desviaciones críticas y asegurar la estabilidad del CO_2 durante toda la cadena logística.

Todo ello evidencia la necesidad urgente de implementar un enfoque estructurado que permita reducir estas desviaciones y optimizar la operación del transporte criogénico de CO_2.

Formulación del Problema

Problema general

P.G.: ¿En qué medida la implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, reducirá la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos?

Problemas específicos

P.E.1. ¿En qué medida la implementación del requisito de acciones para abordar riesgos y oportunidades (ISO 9001:2015, cláusula 6.1) influye en la frecuencia de desviaciones críticas de presión originadas por fallos en el sistema de aislamiento térmico de las cisternas criogénicas?

P.E.2. ¿De qué manera la implementación de los requisitos de competencia y toma de conciencia del personal (ISO 9001:2015, cláusulas 7.2 y 7.3) se asocia con la frecuencia de

desviaciones críticas de baja presión asociadas a la incorrecta manipulación de válvulas criogénicas durante las operaciones de transferencia de CO_2 líquido?

P.E.3. ¿Cuál es la contribución de la implementación de los mecanismos de seguimiento, medición, análisis y mejora (ISO 9001:2015, cláusulas 9.1 y 10.3) en la reducción de la recurrencia de desviaciones críticas de presión y temperatura en el transporte criogénico de CO_2 líquido?

I.3. Objetivos

Objetivo general

O.G.: Determinar en qué medida la implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, reducirá la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos.

Objetivos específicos

O.E.1. Determinar en qué medida la implementación del requisito de acciones para abordar riesgos y oportunidades (ISO 9001:2015, cláusula 6.1) influye en la frecuencia de desviaciones críticas de presión originadas por fallos en el sistema de aislamiento térmico de las cisternas criogénicas.

O.E.2. Determinar de qué manera la implementación de los requisitos de competencia y toma de conciencia del personal (ISO 9001:2015, cláusulas 7.2 y 7.3) impacta en la frecuencia de desviaciones críticas de baja presión asociadas a la incorrecta manipulación de válvulas criogénicas durante las operaciones de transferencia de CO_2 líquido.

O.E.3. Determinar cuál es la contribución de la implementación de los mecanismos de seguimiento, medición, análisis y mejora (ISO 9001:2015, cláusulas 9.1 y 10.3) en la reducción

de la recurrencia de desviaciones críticas de presión y temperatura en el transporte criogénico de CO_2 líquido.

I.4. Importancia, Justificación y Alcance de la Investigación

I.4.1. Importancia de la Investigación

La presente investigación reviste importancia en cuatro dimensiones complementarias —empresarial, sectorial, académica y regulatoria— que se desarrollan a continuación. Cada una de ellas fundamenta, desde un ángulo distinto, la pertinencia técnica, social y científica del estudio.

Desde la perspectiva empresarial, la investigación aporta a la empresa de servicios logísticos una solución estructural a un problema gestionado hasta la fecha de forma reactiva. La elevada frecuencia de desviaciones críticas genera costos evitables: pérdidas de producto estimadas entre el 8 y el 12 % de la carga en trayectos largos, inmovilización de unidades, intervenciones de mantenimiento correctivo no planificadas y deterioro de la confianza del cliente industrial.

La implementación de un SGC ISO 9001:2015 con énfasis en gestión de riesgos operacionales transforma esta dinámica reactiva en una cultura de prevención. La organización adquiere instrumentos sistemáticos para identificar, priorizar y tratar las amenazas termodinámicas del CO_2 criogénico antes de que se materialicen en eventos con consecuencias operativas, económicas o de seguridad.

Esta transformación fortalece la posición competitiva de la empresa en un mercado caracterizado por altas exigencias técnicas y clientes con estrictos requisitos de conformidad de producto.

Desde la perspectiva del sector logístico de gases industriales en el Perú, la investigación aporta evidencia aplicada sobre las condiciones operacionales reales del

transporte criogénico de CO_2 líquido en el país. Las características propias del corredor de distribución estudiado —rutas costeras con alta irradiancia solar, corredores andinos con variaciones de altitud de hasta 4 800 m.s.n.m. y carreteras con superficies deterioradas— no cuentan, a la fecha, con protocolos nacionales estandarizados de gestión de riesgos termodinámicos. Esta brecha convierte al estudio en una contribución técnicamente relevante y de potencial replicabilidad en el sector.

La mayoría de las empresas de servicios logísticos que operan cisternas de CO_2 cumplen los requisitos mínimos del DS N.° 021-2008-MTC sin contar con un marco sistemático de identificación y tratamiento de los riesgos específicos de este fluido.

En ese sentido, la presente investigación aporta evidencia, en un contexto real y replicable, de que la adopción de la cláusula 6.1 de la ISO 9001:2015 con enfoque termodinámico puede constituir una respuesta técnicamente fundamentada y operativamente viable a esta brecha.

Desde la perspectiva académica, la investigación aporta al campo de la Ingeniería Química y de la gestión de la calidad un modelo integrador que articula, por primera vez en el contexto latinoamericano, el pensamiento basado en riesgos de la norma ISO 9001:2015 con los fundamentos termodinámicos específicos del transporte criogénico de CO_2 líquido.

Dicha articulación integra el comportamiento termodinámico del fluido en torno a su punto triple (−56,6 °C y 5,18 bar), los mecanismos de heat ingress en sistemas de aislamiento perlita-vacío deteriorados y las condiciones físicas que favorecen la formación de CO_2 sólido en válvulas y líneas de descarga, parámetros que constituyen la base científica para la definición del indicador FDC P/T utilizado en el estudio.

Escasamente documentada en la literatura científica latinoamericana, esta articulación proporciona una base teórica y empírica para futuras investigaciones sobre gestión de riesgos

en el transporte terrestre de fluidos criogénicos, campo cuya relevancia crecerá ante la expansión de los proyectos CCUS en la región.

Desde la perspectiva regulatoria y de seguridad, la investigación pone en evidencia las limitaciones del marco normativo vigente —el DS N.° 021-2008-MTC— para controlar la frecuencia de desviaciones termodinámicas en cisternas de CO_2. El reglamento no establece obligaciones específicas de monitoreo continuo de presión y temperatura, sistemas de interbloqueo en llenado ni análisis cuantitativos de riesgo operativo.

Al documentar el efecto observado de la implementación de un SGC ISO 9001:2015 sobre la reducción del indicador FDC P/T, la investigación genera evidencia objetiva que puede orientar futuras actualizaciones regulatorias del sector, contribuyendo a elevar los estándares de seguridad del transporte terrestre de mercancías peligrosas clase 2.2 en el Perú.

I.4.2. Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica desde tres perspectivas complementarias —teórica, práctica y metodológica—, cada una de las cuales fundamenta, desde un ángulo distinto, la pertinencia y la necesidad de llevar a cabo el estudio propuesto.

Justificación teórica

En primer lugar, el presente estudio aporta al conocimiento científico al operacionalizar, en un contexto criogénico de alto riesgo, el marco normativo de la ISO 9001:2015, cuyo eje articulador es el pensamiento basado en riesgos como principio transversal a toda la norma (ISO 9001, 2015; Tarí et al., 2012). Esta operacionalización se articula con ISO 31000 (2018) y el ciclo PDCA, integrando las cláusulas 6.1, 7.2, 7.3, 9.1 y 10.3 en el transporte criogénico de CO_2 líquido, y aportando evidencia empírica sobre la eficacia conjunta de estas cláusulas en la reducción de desviaciones críticas de presión y temperatura (Psomas y Antony, 2015; Curso ISO 9001:2015, 2022; ISO 31000, 2018; EIGA, 2023; AIGA, 2011).

En segundo lugar, la investigación cumple con el objetivo principal teórico de avanzar, cuestionar y enriquecer marcos conceptuales existentes, al someter a contraste empírico la premisa de que el pensamiento basado en riesgos debe impregnar cada cláusula y proceso del sistema de gestión, y no limitarse a un módulo periférico (ISO 9001, 2015; Tarí et al., 2012). Al demostrar que la implementación sistemática de la planificación de riesgos (6.1), la competencia y toma de conciencia del personal (7.2 y 7.3) y el seguimiento, medición y mejora (9.1 y 10.3) se asocia con una reducción estadísticamente significativa de eventos de sobrepresión, baja presión y recurrencia, el estudio enriquece y matiza los marcos teóricos sobre gestión basada en riesgos en operaciones criogénicas (Psomas y Antony, 2015; ISO 31000, 2018; Curso ISO 9001:2015, 2022).

En tercer lugar, este trabajo de tesis importa directamente a la comunidad académica, investigadores y docentes de ingeniería y gestión de la calidad, al ofrecer un modelo integrador que articula, por primera vez en el contexto latinoamericano, el pensamiento basado en riesgos de la ISO 9001:2015 con los fundamentos termodinámicos específicos del transporte criogénico de CO_2 líquido y con herramientas de gestión de riesgos como la matriz probabilidad × impacto conforme a ISO 31000:2018 (Tarí et al., 2012; ISO 9001, 2015; ISO 31000, 2018). La utilización de la matriz de riesgos RE-SIG-001 y del indicador FDC_PT como evidencia cuantitativa convierte este estudio en un referente teórico y metodológico de especial valor en entornos universitarios y científicos interesados en sistemas de gestión basados en riesgos aplicados a operaciones de alto riesgo (Psomas y Antony, 2015; Curso ISO 9001:2015, 2022; EIGA, 2023; AIGA, 2011).

Justificación práctica

Este estudio es útil porque demuestra, en un contexto real de transporte criogénico de CO_2 líquido, que la gestión eficaz de riesgos y oportunidades conforme a la cláusula 6.1 de la ISO 9001:2015 permite anticiparse a fallos catastróficos asociados al aislamiento térmico y

reducir desviaciones críticas de presión (Tarí et al., 2012). Esta transición desde la corrección hacia la prevención mejora seguridad, continuidad operativa, costos empresariales y protección de comunidades expuestas a mercancías peligrosas.

Se cumple el objetivo de mejorar una situación concreta, porque la investigación aborda la elevada frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido y demuestra que la implementación práctica de las cláusulas 6.1, 7.2, 7.3, 9.1, 9.2, 10.2 y 10.3 reduce significativamente estos eventos (Tarí et al., 2012; Psomas y Antony, 2015). La evidencia empírica muestra menos errores humanos en la manipulación de válvulas y menor recurrencia de desviaciones, logrando una mejora operativa concreta, medible y sostenible.

Este trabajo es relevante para empresas de logística de gases industriales, operadores de CO_2 criogénico, compañías usuarias del gas (pesqueras, bebidas, minería), aseguradoras y organismos reguladores responsables del transporte de materiales peligrosos (Tarí et al., 2012; Psomas y Antony, 2015). También interesa a gobiernos locales y entidades formadoras de operadores, porque evidencia que la competencia validada del personal y las auditorías internas sistemáticas son herramientas eficaces para reducir desviaciones críticas y fortalecer la seguridad en rutas criogénicas de alto riesgo.

Justificación metodológica

Este estudio es útil para las empresas, porque operacionaliza la matriz de riesgos como herramienta central para evaluar la madurez de la gestión de riesgos en transporte criogénico de CO_2, permitiendo identificar, priorizar y cuantificar riesgos mediante escalas de probabilidad e impacto (Alshahrani y Husain, 2024). La línea base pretest–postest, integrada con el requisito 9.1.3 de la ISO 9001:2015, genera indicadores de desempeño que evidencian reducción de desviaciones, fortaleciendo la seguridad operacional, la protección de comunidades expuestas y la continuidad del servicio logístico (Tarí et al., 2012).

El objetivo principal mejora una situación real y concreta mediante el diseño preexperimental de un solo grupo con medición pretest–postest que permite medir el impacto real de las cláusulas 7.2 y 7.3 sobre la frecuencia de desviaciones críticas de baja presión en cisternas criogénicas en operación, aun sin grupo de control equivalente (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). La verificación de la competencia mediante observación en campo, correlacionada con FOR-OPE-001 y analizada con la prueba de McNemar exacta, orienta intervenciones concretas que disminuyen errores humanos y mejoran directamente la gestión diaria del riesgo (Psomas y Antony, 2015).

Este trabajo le interesa a las empresas de transporte criogénico, clientes industriales de CO_2, aseguradoras y organismos reguladores, porque la matriz RE-SIG-001 y el indicador FDC PT entregan evidencia cuantitativa para priorizar controles, justificar inversiones y ajustar planes de mantenimiento sobre bases estadísticas (Alshahrani y Husain, 2024). También es relevante para gobiernos y entidades normativas, pues el uso de instrumentos validados (FOR-OPE-001, lista ISO 9001:2015) y del coeficiente Kappa de Cohen ilustra cómo traducir el enfoque de riesgos en decisiones y políticas verificables.

I.4.3. Alcance de la investigación

La presente investigación se delimita en tres dimensiones claramente definidas —espacial, temporal y temática—, cuya delimitación precisa es indispensable para interpretar correctamente el alcance de los resultados y sus condiciones de replicabilidad. A continuación se desarrolla cada dimensión.

Alcance espacial. La investigación se desarrolla en una empresa de servicios logísticos con sede en el distrito de Los Olivos, Lima, que provee tractos y conductores especializados para el transporte terrestre de CO_2 líquido criogénico en cisternas propiedad del cliente (empresa de gases industriales). Las rutas objeto de análisis corresponden a los corredores de distribución que conectan las plantas de carga ubicadas en Lima y Callao con clientes del sector

pesquero, de bebidas carbonatadas e industrial en Lima Metropolitana, Callao e Ica, incluyendo tramos costeros con alta radiación solar y segmentos con variaciones de altitud que pueden alcanzar los 4 800 m.s.n.m. en corredores andinos de distribución eventual. Las operaciones de acople, tránsito y descarga realizadas bajo responsabilidad directa del personal operativo de la empresa constituyen el espacio operacional específico sobre el cual se miden las variables de estudio.

Alcance temporal. La investigación abarca dos períodos de medición diferenciados por el diseño preexperimental pretest-postest adoptado. El período pretest corresponde a los registros operacionales disponibles antes de la implementación del SGC ISO 9001:2015, que constituyen la línea base del indicador de frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T). El período postest comprende el mes de abril de 2026, con un total de 60 observaciones registradas mediante el formato FOR-OPE-001 tras la implementación de las acciones derivadas de las cláusulas 6.1, 7.2, 7.3, 9.1 y 10.3 de la norma. Es importante precisar que los resultados obtenidos reflejan la eficacia inicial del SGC en su primera fase de madurez, y no su desempeño consolidado, el cual requiere múltiples ciclos PDCA adicionales para alcanzar niveles óptimos de reducción sostenida de las desviaciones.

Alcance temático. La investigación se circunscribe a la implementación de un SGC conforme a la norma ISO 9001:2015, con énfasis explícito en cinco cláusulas directamente vinculadas a la problemática estudiada.

La cláusula 6.1 se aplica a la identificación formal y el tratamiento sistemático de los riesgos termodinámicos específicos del transporte criogénico de CO_2, incluyendo el deterioro del aislamiento perlita-vacío, la formación de tapones de hielo seco en válvulas y líneas de descarga, y la sobrepresión diferencial durante las operaciones de llenado por ausencia del procedimiento de retorno de vapor.

Las cláusulas 7.2 y 7.3 se aplican a la reducción de errores humanos en la manipulación de válvulas criogénicas durante las operaciones de transferencia. Las cláusulas 9.1 y 10.3 se aplican a la reducción de la recurrencia de desviaciones mediante el tratamiento sistemático de no conformidades y la verificación de eficacia de acciones correctivas.

La investigación no aborda la gestión del sistema de aislamiento ni los dispositivos de seguridad de las cisternas, cuya responsabilidad recae en el cliente propietario. Tampoco incluye el análisis de otros fluidos criogénicos ni la evaluación de sistemas de monitoreo remoto IoT, los cuales quedan propuestos como líneas de investigación futura.

I.5. Limitaciones de la Investigación

La presente investigación presenta las siguientes limitaciones. En primer lugar, el diseño preexperimental de un solo grupo no permite la conformación de un grupo de control aleatorizado, lo que limita el control de variables externas que podrían incidir en los resultados (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). No obstante, esta limitación es inherente al contexto organizacional estudiado, donde la empresa opera con una única flota activa durante el período de investigación.

La segunda limitación está relacionada con la extensión del período de observación postest. Un mes de seguimiento —abril 2026, 60 observaciones— es metodológicamente aceptable en un diseño preexperimental para establecer tendencias iniciales y verificar la dirección del efecto. No obstante, los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a la primera fase de madurez del SGC y no reflejan su desempeño consolidado.

Indicadores de largo plazo, como la reducción sostenida de la tasa de boil-off o la eliminación total de causas de recurrencia, requieren múltiples ciclos PDCA adicionales para consolidarse. La norma ISO 9001:2015 reconoce que la madurez plena de un sistema de gestión

basado en riesgos exige al menos tres a cuatro ciclos completos de implementación, revisión y mejora, horizonte temporal que supera los dos meses cubiertos por el diseño adoptado.

Los resultados de la presente investigación deben interpretarse como evidencia de la eficacia inicial del SGC, no como su efecto máximo.

La tercera limitación concierne a la confidencialidad de los datos operacionales de la empresa, que impide la divulgación de información específica sobre rutas, clientes y conductores individuales, restringiendo el nivel de detalle en el reporte de resultados. Sin embargo, esta restricción no afecta la validez interna de la investigación, dado que el análisis se realiza sobre datos agregados mediante el indicador FDC P/T, cuya naturaleza estadística es independiente de la identificación de las operaciones individuales y preserva plenamente la trazabilidad del proceso de medición.

En cuarto lugar, la disponibilidad y continuidad de los registros operacionales depende del cumplimiento del personal conductor en el llenado del formato FOR-OPE-001 al término de cada viaje. Los viajes con registros incompletos son declarados explícitamente en el análisis de resultados y excluidos del cálculo del indicador FDC P/T, lo cual mitiga el impacto de esta limitación sobre la representatividad estadística de las métricas obtenidas.

En quinto lugar, la construcción de la línea base del pretest se fundamentó en el análisis retrospectivo de registros operacionales preexistentes —hojas de ruta, reportes de incidencias y comunicaciones del grupo de coordinación WhatsApp de la empresa—, dado que en el período previo a la implementación del SGC no existía un instrumento estandarizado de registro de desviaciones. Esta modalidad de construcción de línea base es metodológicamente admitida en diseños preexperimentales aplicados cuando el investigador no tuvo acceso al contexto antes del inicio del estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Campbell y Stanley, 1966).

A diferencia del postest —cuyos datos fueron recolectados prospectivamente mediante el FOR-OPE-001 completado por el conductor al término de cada viaje—, los datos del pretest fueron sistematizados por el investigador trasladando la información histórica a los campos equivalentes del formato, bajo los criterios técnicos de clasificación SP/BP/LNC definidos a partir de los estándares EIGA Doc 151/23 (EIGA, 2023) y AIGA 074/11 (AIGA, 2011). Esta asimetría instrumental entre fases constituye una limitación de la validez interna del estudio, en la medida en que la granularidad de los datos del pretest depende de la completitud de los registros históricos disponibles y no de un instrumento prospectivo controlado.

No obstante, esta limitación fue mitigada mediante dos controles metodológicos complementarios. En primer lugar, la clasificación por tipo de desviación (SP, BP, LNC) responde a criterios técnicos objetivos derivados de los estándares EIGA Doc 151/23 (EIGA, 2023) y AIGA 074/11 (AIGA, 2011), cuya aplicabilidad es independiente del instrumento de registro utilizado. En segundo lugar, la confiabilidad de la clasificación retrospectiva fue verificada mediante el coeficiente Kappa de Cohen ($\kappa = 0{,}84$; $p < 0{,}001$), calculado sobre una muestra aleatoria del 10 % de los registros del pretest con la participación de un segundo evaluador independiente con experiencia en operaciones criogénicas. Este nivel de concordancia —clasificado como “muy bueno” según los rangos de Landis y Koch (1977)— indica que la categorización de las fuentes históricas no dependió del juicio exclusivo del investigador, lo que compensa parcialmente la asimetría instrumental entre fases. Esta limitación debe considerarse al interpretar la magnitud exacta de las tasas del pretest y no invalida el contraste estadístico, cuya robustez descansa en la prueba de McNemar exacta sobre pares dicotómicos (Campbell y Stanley, 1966).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II.1. Marco Teórico

El marco teórico de la presente investigación expone los cuerpos normativos, estándares técnicos y regulaciones que delimitan el contexto dentro del cual se desarrolla el estudio. Su comprensión es indispensable para interpretar correctamente el problema investigado, las variables de análisis y los instrumentos de medición diseñados.

A diferencia de las bases teóricas —desarrolladas en la sección II.3, donde se profundiza en los pilares conceptuales que sustentan cada variable—, el presente marco se concentra en tres cuerpos normativos interdependientes que operan como referencia regulatoria y técnica de la investigación. El primero es la norma ISO 9001:2015 y sus cláusulas directamente aplicables al contexto operacional estudiado. El segundo es el marco regulatorio nacional peruano que rige el transporte terrestre de materiales peligrosos. El tercero corresponde a los estándares técnicos sectoriales de la industria de gases industriales, que delimitan las condiciones operativas admisibles para el CO_2 líquido criogénico.

La articulación coherente de estos tres cuerpos normativos constituye el marco de referencia dentro del cual se formula el problema de investigación, se operacionalizan las variables y se diseñan los instrumentos de medición utilizados en el estudio.

La norma ISO 9001:2015: estructura, principios y cláusulas aplicables

La norma ISO 9001:2015, publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en septiembre de 2015, constituye el estándar internacional de referencia para la implementación de Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC). A diferencia de sus versiones anteriores, esta edición integró de manera transversal el pensamiento basado en riesgos como eje articulador de todos sus requisitos, representando un cambio de paradigma en la gestión de la calidad organizacional.

La norma adopta la Estructura de Alto Nivel (High Level Structure, HLS), denominada Anexo SL, que unifica la arquitectura de todos los estándares del sistema de gestión ISO y facilita su integración con normas complementarias como la ISO 14001:2015 y la ISO 45001:2018 (International Organization for Standardization [ISO], 2015).

Estructuralmente, la norma se organiza en diez cláusulas. Las tres primeras —objeto y campo de aplicación, referencias normativas, y términos y definiciones— conforman el marco introductorio.

Las siete cláusulas restantes constituyen los requisitos propiamente dichos y se articulan bajo el ciclo PDCA: contexto de la organización (cláusula 4), liderazgo (cláusula 5), planificación (cláusula 6), apoyo (cláusula 7), operación (cláusula 8), evaluación del desempeño (cláusula 9) y mejora (cláusula 10). Esta estructura garantiza que la gestión de riesgos no sea un módulo aislado o periférico, sino una práctica transversal presente en cada decisión estratégica y operativa de la organización (Cződörová y Gnap, 2023).

Uno de los cambios más significativos de la versión 2015 fue la supresión del requisito explícito de acción preventiva como elemento separado del sistema. Según ISO 9001 (2015), este concepto no fue eliminado, sino absorbido de forma proactiva en la totalidad de la norma: en lugar de tratar la prevención como una actividad aislada y periférica, el estándar exige que toda la organización desarrolle una conciencia permanente y activa frente a los riesgos que pueden afectar la conformidad de sus productos y servicios.

Esta evolución resulta especialmente relevante en entornos de alta exigencia técnica, como el transporte criogénico de CO_2 líquido, donde las consecuencias de las desviaciones pueden ser inmediatas, graves e irreversibles.

La evidencia empírica disponible confirma la pertinencia de este marco normativo para el sector logístico. El estudio de Cződörová y Gnap (2023), realizado en empresas de transporte

en Eslovaquia, demostró que la certificación ISO 9001 se asocia con una reducción significativa en la frecuencia de no conformidades.

Los resultados muestran una mayor estandarización de los procesos críticos y una mejora en la capacidad de respuesta ante contingencias operativas, con tasas de reducción de no conformidades que oscilan entre el 25 % y el 60 % en el primer año de implementación efectiva.

Estos hallazgos respaldan la aplicabilidad del marco normativo en empresas de servicios logísticos que operan fluidos criogénicos, donde la estandarización de los procesos de carga, transporte y descarga es condición imprescindible para garantizar la estabilidad termodinámica del producto.

Cláusula 6.1: Acciones para abordar riesgos y oportunidades

La cláusula 6.1 de la norma ISO 9001:2015 establece que, al planificar el SGC, la organización debe considerar los factores internos y externos identificados en el análisis de contexto (cláusula 4.1) y los requisitos de las partes interesadas (cláusula 4.2) para determinar los riesgos y oportunidades que deben ser abordados.

El propósito de esta determinación es triple: asegurar que el SGC logre sus resultados previstos, prevenir o reducir los efectos no deseados, y sostener la mejora continua (ISO, 2015). Cabe destacar que la cláusula no prescribe ninguna metodología específica de evaluación de riesgos, lo que otorga a cada organización la flexibilidad necesaria para seleccionar las herramientas más adecuadas a la naturaleza de sus procesos.

Para el transporte criogénico de CO_2 líquido, el cumplimiento de la cláusula 6.1 implica identificar y documentar las amenazas operacionales específicas: la degradación del aislamiento perlita-vacío de las cisternas, los fallos en los dispositivos de seguridad (válvulas de alivio y discos de ruptura), los errores en la manipulación de válvulas criogénicas durante

las operaciones de transferencia, y las variaciones de presión asociadas a cambios de altitud en las rutas de distribución.

Una vez identificados, estos riesgos deben ser evaluados según su probabilidad de ocurrencia e impacto potencial. Deben planificarse acciones proporcionales de tratamiento, con responsables asignados y plazos definidos, cuya eficacia se evaluará conforme a la cláusula 9.1.3 (Tarí et al., 2012).

La Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA, por sus siglas en inglés) ha documentado, en su norma técnica EIGA Doc 151/23, que la sobrepresión durante las operaciones de llenado de cisternas criogénicas representa hasta el 30 % de las no conformidades reportadas en auditorías de seguridad del sector.

Esto subraya la necesidad de incorporar explícitamente los riesgos del proceso de llenado —ausencia de sistemas de interbloqueo automático, falta de mangueras de retorno de vapor, fallas en sensores de presión— en la matriz de riesgos operacionales que exige esta cláusula (European Industrial Gases Association [EIGA], 2023). La integración de este conocimiento técnico sectorial con el marco normativo ISO 9001:2015 constituye el diferencial de un SGC con énfasis explícito en riesgos operacionales propios del CO_2 criogénico.

Cláusulas 7.2 y 7.3: Competencia y toma de conciencia del personal

La cláusula 7.2 exige que la organización determine la competencia necesaria de quienes realizan trabajos que afectan al desempeño y eficacia del SGC, se asegure de que dichas personas sean competentes en función de su educación, formación o experiencia, tome las acciones necesarias para adquirir la competencia requerida y evalúe su eficacia, y conserve información documentada como evidencia objetiva de todo lo anterior (ISO, 2015).

En el transporte criogénico de CO_2, el cumplimiento de esta cláusula va más allá de verificar licencias de conducción y la certificación MATPEL. Requiere incorporar competencias técnicas específicas al perfil del personal operativo: reconocimiento de señales

de pérdida de presión, procedimiento de recuperación de tanques en condición low-pressure, manejo seguro del equipo de protección personal criogénico (CPE) y comprensión básica de la termodinámica del CO_2 en torno a su punto triple.

La cláusula 7.3, por su parte, exige que las personas que trabajan bajo el control de la organización sean conscientes de la política de calidad, de los objetivos pertinentes del SGC, de su propia contribución a su eficacia y de las implicaciones que tiene el incumplimiento de sus requisitos (ISO, 2015).

En el transporte criogénico de CO_2, la toma de conciencia trasciende el conocimiento procedimental. Un conductor que comprende que una caída de presión por debajo del punto triple del CO_2 (5,18 bar a −56,6 °C) puede provocar la solidificación del fluido, la obstrucción de válvulas y una eventual ruptura catastrófica del tanque, actúa con una precaución cualitativamente superior.

La Asian Industrial Gases Association (AIGA, 2011), en su guía técnica AIGA 074/11, ha documentado que los incidentes más graves relacionados con cisternas de CO_2 en condición low-pressure ocurren precisamente cuando los conductores intentan ventilar manualmente los tanques sin el entrenamiento técnico específico requerido.

Cláusulas 9.1 y 10.3: Seguimiento, medición y mejora continua

La cláusula 9.1, denominada "Seguimiento, medición, análisis y evaluación", exige que la organización determine qué aspectos de su desempeño requieren seguimiento y medición, qué métodos son necesarios para obtener resultados válidos, con qué frecuencia deben ejecutarse las mediciones y cuándo deben analizarse los resultados obtenidos (ISO, 2015).

Su subcláusula 9.1.3 va más allá: exige que los resultados del análisis se utilicen activamente para evaluar la conformidad de los productos y servicios, el grado de satisfacción del cliente, la eficacia del SGC y de las acciones tomadas para abordar riesgos y oportunidades,

y la necesidad de introducir mejoras en el sistema. No basta con medir: el propósito central es convertir esa información en decisiones de mejora concretas.

En el transporte criogénico de CO_2, la operacionalización de esta cláusula se concreta en el diseño y seguimiento del indicador FDC P/T (Frecuencia de Desviaciones Críticas de Presión y/o Temperatura), definido como el cociente entre el número de viajes con al menos una desviación crítica registrada y el total de viajes realizados en el período, expresado por cada mil viajes. Este indicador cumple una función de alerta temprana: permite detectar tendencias negativas en el desempeño operacional antes de que escalen a incidentes graves, y verificar la eficacia de las acciones correctivas mediante la comparación estadística entre las fases pretest y postest.

La cláusula 10.3, referida a la mejora continua, complementa a la cláusula 9.1 al exigir que la organización mejore de forma continua la idoneidad, adecuación y eficacia del SGC, considerando los resultados del análisis y la evaluación, así como las salidas de la revisión por la dirección (ISO, 2015).

En el transporte criogénico de CO_2, este ciclo de mejora se expresa en la evolución progresiva de los procedimientos operativos: de listas de verificación genéricas hacia protocolos específicos para CO_2 criogénico, con umbrales de acción diferenciados según las condiciones de ruta y los riesgos identificados en la matriz operacional.

La integración de las cláusulas 9.1 y 10.3 con la cláusula 6.1 cierra el ciclo completo del pensamiento basado en riesgos: los riesgos planificados en la fase inicial son monitoreados mediante el indicador FDC P/T, y sus resultados retroalimentan la actualización del registro de riesgos en ciclos sucesivos de mejora (Tarí et al., 2012).

Marco regulatorio nacional: transporte terrestre de materiales peligrosos

El Decreto Supremo N.° 021-2008-MTC, Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, constituye la norma jurídica de mayor jerarquía

aplicable a las operaciones de la empresa objeto de estudio. Este reglamento clasifica el CO_2 líquido refrigerado como mercancía peligrosa de clase 2.2 (gas no inflamable, no tóxico), conforme a las recomendaciones del Comité de Expertos en Transporte de Mercancías Peligrosas de las Naciones Unidas.

El reglamento establece requisitos obligatorios para el transporte por carretera: vehículos con especificaciones técnicas adicionales, conductores con certificación MATPEL vigente, señalización de peligrosidad conforme a las Naciones Unidas, y planes de emergencia aprobados por el MTC (MTC, 2008).

Sin embargo, el análisis detallado del texto reglamentario revela una brecha normativa relevante para el sector criogénico: el DS 021-2008-MTC no establece obligaciones específicas de monitoreo continuo de presión y temperatura durante el tránsito, no exige sistemas de interbloqueo automático en las operaciones de llenado de cisternas, y tampoco requiere la aplicación de metodologías cuantitativas de evaluación de riesgos operativos como HAZOP o matrices probabilidad × impacto.

Esta brecha normativa no implica incumplimiento por parte de las empresas que operan conforme al reglamento, sino que pone de manifiesto el límite del marco regulatorio vigente para abordar los riesgos termodinámicos específicos del CO_2 criogénico, que trascienden las previsiones genéricas del transporte de mercancías peligrosas clase 2.2.

El cumplimiento de este reglamento es, por tanto, condición necesaria pero insuficiente para controlar la frecuencia de desviaciones críticas. Esta brecha fundamenta la pertinencia de implementar un SGC ISO 9001:2015 como instrumento complementario al marco regulatorio vigente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2008).

La fiscalización del cumplimiento del DS 021-2008-MTC corresponde a la Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías (SUTRAN), organismo adscrito al MTC con facultades sancionadoras ante desviaciones en materia de

transporte de materiales peligrosos. El incumplimiento de sus disposiciones puede generar, además de sanciones económicas, la inmovilización de las unidades involucradas en un evento de desviación crítica, con el consiguiente impacto en la continuidad operativa del servicio logístico.

Estándares técnicos sectoriales de la industria de gases industriales

El tercer componente del marco normativo está constituido por los estándares técnicos sectoriales de la industria de gases industriales, que complementan tanto los requisitos de la norma ISO 9001:2015 como el marco regulatorio nacional, proporcionando especificaciones operativas detalladas para el manejo seguro del CO_2 líquido criogénico. Los dos organismos de referencia global son la Asociación Europea de Gases Industriales (EIGA) y la Asociación de Gases Industriales de Asia (AIGA), cuyos documentos técnicos constituyen el estado del arte en materia de seguridad operacional criogénica.

El primer documento de referencia sectorial es el EIGA Doc 151/23, titulado "Prevention of Overfilling of Cryogenic Vessels", que establece los principios técnicos y operacionales para la prevención de sobrepresión durante las operaciones de llenado de cisternas criogénicas.

El documento define los requisitos de los sistemas de interbloqueo de llenado, las especificaciones de las mangueras de retorno de vapor, los criterios de verificación preoperacional del estado de las válvulas y los protocolos de actuación ante condiciones de sobrepresión incipiente (EIGA, 2023). En el contexto de la presente investigación, este documento constituye la referencia técnica primaria tanto para el diseño de la matriz de riesgos operacionales RE-SIG-001 como para la definición de los umbrales de desviación crítica de presión que delimitan el indicador FDC P/T.

El segundo documento sectorial de referencia es la guía AIGA 074/11, titulada "Safe Handling of Liquid CO_2 Containers That Have Lost Pressure", que documenta los riesgos específicos asociados a la pérdida de presión en cisternas de CO_2 líquido y establece los procedimientos de recuperación segura de tanques en condición low-pressure, incluyendo las secuencias de actuación por etapas y los criterios de evacuación del área.

La guía advierte que cuando la presión interior desciende por debajo del punto triple del CO_2 (5,18 bar a −56,6 °C), el fluido pasa rápidamente a fase sólida, obstruyendo válvulas y líneas de alivio y generando sobrepresiones diferenciales capaces de provocar rupturas catastróficas del recipiente.

Documenta, asimismo, que los incidentes más graves de este tipo ocurren cuando los conductores, sin entrenamiento específico en recuperación de presión para CO_2 criogénico, intentan ventilar manualmente los tanques, exponiéndose a atmósferas con concentraciones superiores al 10 % v/v de CO_2 que causan pérdida inmediata de conocimiento (AIGA, 2011).

La norma ISO/TR 27918:2018, "Lifecycle risk management for integrated CCS projects", está orientada primariamente a proyectos de captura y almacenamiento de CO_2 a escala industrial. En su sección sobre transporte por carretera, establece que el riesgo operacional durante la fase logística debe abordarse durante todo el ciclo de vida del servicio.

La norma recomienda la integración de análisis HAZOP, metodologías bow-tie y matrices de riesgo en los sistemas de gestión empresariales de las empresas transportistas. Su adopción como estándar de referencia por la International Organization for Standardization (2018) refuerza la pertinencia del enfoque metodológico adoptado en la presente investigación.

Los estándares de calidad del producto de la International Society of Beverage Technologists (ISBT) establecen los requisitos de pureza del CO_2 de grado alimentario (E 290): pureza mínima de 99,9 %, con límites específicos de humedad y ausencia de contaminantes.

Estos requisitos son directamente relevantes para la empresa objeto de estudio, cuyos clientes de la industria de bebidas carbonatadas exigen su cumplimiento en cada entrega. Las desviaciones críticas de baja presión que generan ciclos de evaporación y recondensación parcial del CO_2 pueden comprometer esta especificación, produciendo rechazos en la recepción con el consiguiente efecto económico y reputacional para la empresa (Alshahrani y Husain, 2024).

En síntesis, el marco normativo que sustenta la presente investigación está integrado por tres cuerpos complementarios.

El primero es la norma ISO 9001:2015, que proporciona el sistema de gestión de la calidad con pensamiento basado en riesgos. El segundo es el DS 021-2008-MTC, que establece el marco regulatorio mínimo para el transporte de materiales peligrosos en el Perú. El tercero son los estándares técnicos EIGA Doc 151/23 y AIGA 074/11, que delimitan las condiciones operativas admisibles para el CO_2 líquido criogénico.

La integración de estos tres cuerpos normativos define el espacio de referencia para el diseño de los instrumentos de medición, la operacionalización de las variables y la interpretación de los resultados.

II.2. Antecedentes del Estudio

Antecedentes Nacionales

En el ámbito nacional, la investigación de López-Núñez (2021) propone un procedimiento técnico para el control del transporte de gases criogénicos como una aplicación práctica de la gestión de riesgos en entornos logísticos de alta exigencia técnica. El autor identifica que la ausencia de procedimientos estandarizados de monitoreo de presión y temperatura durante el tránsito constituye la principal causa de desviaciones en empresas que operan sin un SGC certificado. Asimismo, documenta que la implementación de controles

operacionales basados en umbrales técnicos específicos del fluido transportado reduce significativamente la frecuencia de activaciones de las válvulas de alivio, hallazgo directamente relevante para el diseño del indicador FDC P/T del presente estudio. Este antecedente es directamente pertinente para la presente investigación por operar en el mismo contexto operacional —transporte terrestre de gases criogénicos— y por proponer una metodología de medición de desviaciones operacionales que guarda correspondencia conceptual con el indicador FDC P/T diseñado en el presente estudio.

Castillo Gil, R. A. (2020) desarrolló en la Universidad César Vallejo una investigación para evaluar el efecto de la implementación de un SGC ISO 9001:2015 sobre los indicadores de desempeño logístico en una empresa de transporte terrestre de carga de Lima Metropolitana. Mediante un diseño preexperimental con medición pretest–postest, el autor documentó reducciones estadísticamente significativas en los indicadores de no conformidad operacional —incumplimientos de ruta, tiempos de entrega fuera de especificación y registros de carga incompletos— tras la implementación de las cláusulas 6.1, 7.2–7.3 y 9.1 de la norma. La estandarización de procedimientos operativos y la capacitación sistemática del personal conductor resultaron ser las intervenciones con mayor efecto observado sobre la reducción de la variabilidad del proceso logístico. La utilización del mismo diseño preexperimental O_1 X O_2 y la ausencia de grupo de control —justificada por las condiciones reales de la organización estudiada— constituyen un precedente metodológico relevante para la presente investigación.

Velarde Huamán, M. E. (2020) publicó desde la Universidad de Lima una investigación sobre el efecto de la implementación de un SGC ISO 9001:2015 en los indicadores de eficiencia operativa de una empresa de transporte terrestre de mercancías, con énfasis en el control de procesos críticos y la gestión por indicadores. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo con comparación antes–después, evaluando variables de proceso como tiempos de ciclo de entrega, tasa de reclamos del cliente e índice de cumplimiento de procedimientos. Se registraron

mejoras significativas en las tres dimensiones tras completar el primer ciclo PDCA. La autora identificó la cláusula 9.1 (seguimiento, medición y análisis) como el factor con mayor efecto observado y sostenido en la reducción de no conformidades. Este antecedente refuerza directamente la validez del indicador FDC P/T como KPI central de la presente investigación y la pertinencia de la cláusula 9.1 como dimensión de medición del SGC implementado.

Mendoza Cárdenas (2022) propone un sistema de gestión de seguridad operacional para el transporte de GLP en cisternas desde la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, aportando un precedente institucional directo para el estudio de desviaciones críticas de presión en fluidos licuados transportados bajo el marco del DS 021-2008-MTC. La metodología de indicadores KPI de frecuencia de desviaciones empleada resulta conceptualmente homóloga al indicador FDC P/T diseñado en la presente investigación, lo que valida la pertinencia del enfoque adoptado en el contexto del sector logístico peruano.

Torres Flores (2021) evalúa el deterioro del sistema de aislamiento perlita-vacío en cisternas criogénicas para transporte de oxígeno líquido en el Perú, documentando tasas de incremento del boil-off en unidades con más de ocho años sin mantenimiento preventivo del vacío intersticial. Este antecedente refuerza directamente el segundo pilar teórico de la presente investigación y la causa técnica identificada en el Capítulo I: la degradación del sistema de aislamiento como fuente principal de desviaciones de presión en flotas criogénicas antiguas operando en rutas peruanas.

Núñez Herrera (2020) aplica matrices de riesgos probabilidad × impacto conforme a ISO 31000 en empresas de transporte de carga pesada en Lima Metropolitana, aportando evidencia contextual sobre la viabilidad de este enfoque metodológico en el sector logístico peruano. Sus hallazgos respaldan la pertinencia de la herramienta RE-SIG-001 utilizada en la presente investigación para la identificación y priorización de riesgos operacionales criogénicos, y confirman que las matrices de riesgo son instrumentos metodológicamente

robustos para establecer líneas base de desempeño en organizaciones de transporte de carga peligrosa.

Antecedentes Internacionales

Munkejord et al. (2016) ofrecen una revisión comprehensiva de los datos y modelos disponibles para el transporte de CO_2, con énfasis en situaciones transitorias de presión y temperatura. Los autores documentan las propiedades termofísicas del CO_2 puro y mezclas ricas en CO_2 necesarias para modelar el comportamiento en tuberías y cisternas, e identifican brechas críticas en los datos de equilibrio de fases bajo condiciones de transporte terrestre. Este estudio provee la fundamentación científica para los umbrales de presión y temperatura utilizados como criterios de desviación crítica en el presente trabajo.

Ustolin et al. (2022) presentan una revisión exhaustiva sobre el transporte de hidrógeno líquido con énfasis en el sector marítimo, identificando los principales desafíos criogénicos: pérdida de presión durante la transferencia, evaporación no controlada (boil-off) y fatiga mecánica de los sistemas de conducción a temperaturas criogénicas (<−150 °C). Los autores concluyen que la estandarización de procedimientos operacionales y la capacitación del personal son factores críticos para reducir los incidentes durante la carga y descarga, hallazgo directamente extrapolable al transporte de CO_2 criogénico en cisternas terrestres.

Sharafian et al. (2019) evalúan el gas natural como combustible marino, cuantificando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero —entre el 15 % y el 25 %— y de contaminantes atmosféricos en comparación con combustibles convencionales. El estudio documenta los riesgos operacionales inherentes al transporte y manejo de gases licuados a presión y temperatura controladas, y destaca que la ausencia de procedimientos estandarizados es la principal causa de desviaciones durante la transferencia. Este antecedente es relevante

porque el CO_2 líquido refrigerado comparte con el GNL los mismos principios termodinámicos de control de presión y temperatura durante el transporte.

Cződörová y Gnap (2023) analizan, en su estudio publicado en la revista Sustainability (MDPI) bajo el título Investigation of the effectiveness of the introduction of the quality management system according to the ISO 9001 standard in transport companies: Slovakia case study, la asociación entre la certificación ISO 9001 y el desempeño operacional en empresas de transporte de Eslovaquia. Los autores concluyen que la implementación efectiva del SGC se asocia con una reducción de no conformidades operacionales de entre el 25 % y el 60 % durante el primer año, siendo las áreas de estandarización de procedimientos operativos y formación del personal aquellas con mayor efecto observado. Este antecedente es el más directamente alineado con el presente estudio, dado que comparte las tres dimensiones clave del análisis comparativo: el sector de actividad (transporte), el estándar de referencia (ISO 9001:2015) y la variable dependiente de interés (reducción de no conformidades operacionales).

Finalmente, Knoope (2015) analiza los costos, la seguridad y las incertidumbres asociadas al desarrollo de infraestructura de CO_2, incluyendo el transporte criogénico terrestre y marítimo. La tesis doctoral, desarrollada en la Universidad de Utrecht, modela escenarios de riesgo bajo distintas configuraciones de flota y protocolos operacionales, concluyendo que la implementación de sistemas de gestión de calidad reduce los costos operacionales asociados a desviaciones en un rango de 18 % a 35 % en el primer año. Este hallazgo respalda la pertinencia del presente estudio en el contexto del transporte criogénico peruano.

II.3. Bases Teóricas

Las bases teóricas de la presente investigación se organizan en torno a tres pilares conceptuales interdependientes, articulados en una cadena lógica que conecta la gestión de riesgos operacionales con la reducción efectiva de desviaciones en el proceso logístico criogénico.

El primer pilar es la teoría de la gestión basada en riesgos, que proporciona el marco conceptual para identificar, priorizar y tratar las amenazas termodinámicas específicas del transporte criogénico de CO_2 líquido.

El segundo pilar es la termodinámica del CO_2 criogénico, que delimita el espacio de operación admisible y fundamenta la definición del indicador FDC P/T como medida cuantitativa de desviaciones.

El tercer pilar es la teoría del control estadístico de procesos, que proporciona las herramientas de seguimiento y evaluación de la eficacia de las intervenciones implementadas.

Primer pilar: Teoría de la gestión basada en riesgos

Origen y evolución del concepto de riesgo en la gestión organizacional

El concepto de riesgo organizacional ha experimentado una evolución significativa a lo largo del siglo XX, transitando de una concepción puramente financiera y aseguradora hacia una perspectiva integral que abarca los riesgos operacionales, tecnológicos, ambientales y humanos inherentes a los procesos productivos y logísticos modernos.

Esta evolución se sustenta en dos tradiciones complementarias que, con el tiempo, han convergido en los sistemas de gestión actuales. La primera es la tradición actuarial, desarrollada en el ámbito asegurador desde el siglo XVII, que introdujo la cuantificación probabilística de los eventos adversos como base racional para la toma de decisiones (Knight, 1921). La segunda es la tradición de la ingeniería de confiabilidad, surgida en la industria aeroespacial y nuclear, que aportó herramientas de análisis sistemático como el Análisis de Modos y Efectos de Falla

(AMFE) y el Árbol de Fallas (FTA), diseñadas para identificar las causas raíz de los fallos antes de que estos ocurran.

El pensamiento moderno sobre gestión de riesgos organizacionales hunde sus raíces en la obra de los pioneros del movimiento por la calidad total (TQM) de mediados del siglo XX.

Deming (1986) sentó las bases del pensamiento sistémico al sostener que la mayoría de los defectos y errores de producción son consecuencia de sistemas mal diseñados —causas comunes de variación—, y no de errores individuales. Esta premisa transforma radicalmente el enfoque de la gestión de riesgos: en lugar de buscar responsables individuales cuando ocurre una falla, la organización debe identificar y modificar los procesos que generan las condiciones propicias para que esa falla se produzca.

Juran (1988) complementó esta visión al introducir el concepto de "coste de la calidad", argumentando que los costos derivados de la mala calidad —rechazos, retrabajos, garantías, pérdidas de clientes— son previsibles y evitables mediante la gestión proactiva de los riesgos de proceso.

La teoría de la gestión basada en riesgos y el ciclo PDCA

La gestión basada en riesgos, tal como la concibe la norma ISO 9001:2015, no constituye una disciplina aislada dentro del sistema, sino el eje articulador de la totalidad de sus requisitos. Tarí et al. (2012) sostienen que la incorporación transversal del pensamiento basado en riesgos en la versión 2015 representa el cambio conceptual más profundo respecto a sus predecesoras, al trasladar la gestión del riesgo desde un módulo periférico denominado "acción preventiva" hacia una dimensión estructural que impregna cada cláusula del sistema. Desde esta perspectiva, gestionar la calidad es, en esencia, gestionar los riesgos que amenazan la conformidad de los productos y servicios y, simultáneamente, capitalizar las oportunidades que pueden mejorarla.

Esta concepción se articula directamente con el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA), cuya aplicación cíclica garantiza que la gestión de riesgos no sea un ejercicio estático de cumplimiento normativo, sino un proceso dinámico de aprendizaje organizacional. En la fase Planificar, la organización identifica y evalúa los riesgos y oportunidades relevantes para su contexto (cláusula 6.1). En la fase Hacer, implementa los controles y procedimientos operativos definidos para tratar dichos riesgos (cláusulas 7 y 8). En la fase Verificar, mide y analiza el desempeño de los procesos frente a los objetivos establecidos (cláusula 9.1). Finalmente, en la fase Actuar, toma decisiones de mejora basadas en los hallazgos del seguimiento, actualiza la evaluación de riesgos y redefine los planes de acción (cláusulas 10.2 y 10.3). ISO 9001 (2015) señala que este ciclo virtuoso transforma los eventos de desviación —lejos de ser simples incidentes operativos— en fuentes de conocimiento organizacional que elevan progresivamente la madurez del sistema de gestión.

Psomas y Antony (2015) precisan que la aplicación correcta de la gestión basada en riesgos persigue simultáneamente dos objetivos diferenciados: incrementar la ocurrencia de eventos positivos —como entregas conformes dentro de los parámetros termodinámicos especificados— y reducir la frecuencia de eventos negativos —como activaciones de válvulas de alivio, formación de hielo seco en líneas de descarga o liberaciones no controladas de gas— . Esta dualidad constituye uno de los rasgos que distingue a la ISO 9001:2015 de los enfoques tradicionales de control de calidad, los cuales se concentraban exclusivamente en la detección y corrección de defectos una vez producidos. La gestión proactiva de riesgos, por el contrario, crea valor medible al anticipar las desviaciones, identificar sus causas raíz y eliminarlas antes de que se materialicen en el proceso operativo, desplazando el foco de la corrección hacia la prevención.

La identificación y evaluación de riesgos operacionales: herramientas y metodologías

La norma ISO 9001:2015 no prescribe una metodología específica para la identificación y evaluación de riesgos, reconociendo que la complejidad y naturaleza de cada organización determinan cuál es el enfoque más apropiado.

Psomas y Antony (2015) señalan que la identificación puede realizarse mediante herramientas tan diversas como el análisis FODA, el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE/FMEA), los diagramas causa-efecto de Ishikawa, los estudios HAZOP o las matrices de riesgo probabilidad × impacto. Lo que la norma sí exige es que la organización conserve información documentada como evidencia de que ha determinado y abordado sus riesgos.

Esta documentación convierte la evaluación de riesgos en el nexo entre el pensamiento y la acción, asegurando trazabilidad y verificabilidad de las intervenciones implementadas.

En entornos operacionales de alta exigencia técnica como el transporte criogénico de CO_2 líquido, el HAZOP constituye la herramienta de identificación de riesgos más adecuada por dos razones principales. Primera, su estructura de palabras guía —más de, menos de, ninguno, inverso, otro que— permite explorar sistemáticamente todas las formas posibles en que una variable de proceso puede desviarse de su valor nominal. Segunda, su enfoque multidisciplinario garantiza que tanto las causas como las consecuencias de cada desviación sean evaluadas por expertos en distintas áreas —ingeniería de proceso, operaciones, seguridad— antes de que se produzcan en condiciones reales.

Crawley y Tyler (2015) fundamentan la aplicabilidad de este método al contexto del presente estudio al describir cómo el análisis de desviaciones puede revelarse ante escenarios como la pérdida de vacío en el aislamiento perlita-vacío, identificando la cadena causal completa: desde el mecanismo de deterioro hasta la activación de la válvula de alivio y la pérdida de producto asociada.

La aplicación de este método al transporte criogénico de CO_2 permite identificar, por ejemplo, que la causa "pérdida de vacío en el aislamiento perlita-vacío" conduce a la desviación "mayor que" en temperatura (boil-off acelerado), cuya consecuencia es "mayor que" en presión (sobrepresión) con el potencial de activar la válvula de alivio y generar pérdidas de producto.

La evaluación de la magnitud de los riesgos identificados se realiza mediante matrices probabilidad × impacto, instrumentos que permiten clasificar cada riesgo en categorías de prioridad y determinar el tipo de tratamiento apropiado. Alshahrani y Husain (2024) señalan que estas matrices, cuando se construyen con escalas validadas por equipos multidisciplinarios e incorporan datos históricos de frecuencia de eventos, constituyen herramientas metodológicamente robustas para establecer la línea base del nivel de riesgo operacional antes de la implementación de un SGC —la fase pretest de la presente investigación— y para medir la reducción de dicho nivel tras la implementación de los controles —la fase postest.

El aprendizaje organizacional como resultado de la gestión de riesgos

Un componente central de la teoría de la gestión basada en riesgos es su dimensión de aprendizaje organizacional: la capacidad de una organización para convertir los eventos de desviación en fuentes de conocimiento que mejoran permanentemente su capacidad de anticipación y respuesta. Tarí et al. (2012) sostienen que cuando una empresa logística criogénica experimenta eventos repetidos sobre los mismos equipos o procesos, esto evidencia no solo una falla técnica puntual, sino la ausencia de mecanismos efectivos de retroalimentación y aprendizaje organizacional que impidan la recurrencia. El tratamiento sistemático de no conformidades —previsto en la cláusula 10.2 de la ISO 9001:2015—, sustentado en el análisis de causas raíz mediante herramientas como los "cinco porqués" o el diagrama de Ishikawa, y la verificación documentada de la eficacia de las acciones correctivas implementadas, constituye la infraestructura que convierte cada desviación en una oportunidad de mejora estructural.

Tarí et al. (2012) precisan que el requisito 9.1.3 de la norma actúa como eje central del aprendizaje organizacional, al exigir que las organizaciones analicen sistemáticamente los datos de desempeño —número de no conformidades, resultados de auditorías, frecuencia de activaciones de dispositivos de seguridad, satisfacción del cliente— para identificar tendencias que anticipen desviaciones futuras antes de que se materialicen en incidentes. En el transporte criogénico de CO_2, un sistema de gestión maduro es aquel que, ante la detección de una tendencia ascendente en la frecuencia de activaciones de válvulas de alivio, no espera a que se produzca un incidente grave para intervenir, sino que activa los mecanismos de análisis y corrección en la fase incipiente del deterioro. La diferencia entre un sistema maduro y uno inmaduro reside precisamente en la capacidad de detectar y actuar sobre las señales débiles antes de que se conviertan en fallas mayores.

Segundo pilar: Termodinámica aplicada al transporte criogénico de CO_2 líquido

Propiedades termodinámicas del CO_2 y su relevancia para el transporte en cisternas

El dióxido de carbono (CO_2) presenta un comportamiento termodinámico que lo distingue fundamentalmente de otros fluidos criogénicos como el nitrógeno líquido (N_2) o el oxígeno líquido (O_2), y que determina los riesgos operacionales específicos de su transporte en camiones cisterna. Las propiedades termodinámicas más relevantes para la presente investigación son las siguientes.

La primera propiedad termodinámica determinante para la seguridad del transporte es el punto triple del CO_2 se ubica a −56,6 °C y 5,18 bar. El punto triple es la condición única de temperatura y presión en la que las tres fases del CO_2 —sólido, líquido y gaseoso— coexisten en equilibrio termodinámico. Por debajo de esta presión, el CO_2 no puede existir en estado líquido independientemente de la temperatura: cualquier reducción de presión por debajo de 5,18 bar provoca la sublimación del líquido directamente a gas o su solidificación en CO_2 sólido

(hielo seco), sin pasar por una fase líquida estable. Esta característica es el fundamento físico que explica por qué la pérdida de presión en una cisterna de CO_2 es un evento potencialmente catastrófico: la formación de hielo seco en válvulas, líneas de alivio y conexiones puede obstruir los dispositivos de seguridad y generar sobrepresiones diferenciales capaces de provocar la ruptura de componentes de contención (Asian Industrial Gases Association [AIGA], 2011).

El punto crítico del CO_2 se encuentra a 31,1 °C y 73,8 bar. Por encima de estas condiciones, el CO_2 pasa al estado supercrítico, en el que no existe distinción entre fase líquida y gaseosa. Durante el transporte en cisternas a las condiciones operativas normales (presión de 15 a 22 bar y temperatura de −20 °C a −30 °C), el CO_2 se mantiene en la región bifásica de su diagrama de fases, con coexistencia de fase líquida y vapor en equilibrio. La curva de saturación del CO_2, que relaciona la presión de vapor de saturación con la temperatura, determina con precisión las condiciones de coexistencia líquido-vapor y es el fundamento teórico para interpretar las lecturas de presión de los manómetros de la cisterna como indicadores indirectos de la temperatura del producto: si la presión al arribo es superior a la esperada para la temperatura ambiente de la ruta, ello indica boil-off acelerado; si es inferior al mínimo operativo, indica una posible aproximación al punto triple.

La densidad del CO_2 líquido a las condiciones operativas normales oscila entre 1 000 y 1 100 kg/m³, aproximadamente el doble que la del agua líquida y entre 400 y 500 veces superior a la del CO_2 en fase gaseosa a presión atmosférica. Esta diferencia de densidad entre fases explica la magnitud de las expansiones volumétricas abruptas que se producen cuando el CO_2 líquido entra en contacto con superficies a temperaturas superiores a su temperatura de saturación, y el riesgo de "golpe de ariete criogénico" durante las operaciones de apertura brusca de válvulas en cisternas con presión desequilibrada (European Industrial Gases Association [EIGA], 2023).

El mecanismo de boil-off y la ganancia de calor en cisternas criogénicas

El mecanismo fundamental que genera las desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte de CO_2 líquido es la ganancia de calor (heat ingress), técnicamente denominada boil-off cuando se refiere a la evaporación progresiva del fluido criogénico como consecuencia de dicha ganancia. Todas las cisternas criogénicas, por perfecta que sea su construcción, presentan algún grado de ganancia de calor desde el entorno a través del sistema de aislamiento, debido a que ningún aislante real es un conductor térmico nulo. En condiciones normales de operación, esta ganancia de calor es lo suficientemente pequeña como para que el sistema mantenga la presión interior dentro del rango de trabajo durante todo el ciclo de transporte, con activaciones de válvulas de alivio solo en viajes de duración superior a la diseñada.

El sistema de aislamiento perlita-vacío es estándar en cisternas criogénicas de CO_2 y funciona creando una cámara intersticial entre la pared interior y la exterior del tanque, que se rellena con perlita —una roca volcánica expandida de baja conductividad térmica— y se somete a vacío mediante una bomba de extracción de gases.

El vacío elimina la convección y reduce drásticamente la conducción, logrando valores de conductividad térmica efectiva inferiores a 0,01 W/(m·K) en condiciones de vacío óptimo. Este sistema permite mantener el CO_2 a −20 °C durante períodos de tránsito de hasta 72 horas con pérdidas de presión por boil-off menores al 2 % diario.

Sin embargo, el vacío intersticial se deteriora progresivamente a lo largo de la vida útil de la cisterna por múltiples mecanismos: desgasificación del material de relleno, micro-fugas en soldaduras o conexiones de la pared exterior, y daños mecánicos por vibración o impactos. Cuando el nivel de vacío cae por debajo de un umbral crítico, la tasa de boil-off se incrementa exponencialmente, generando desviaciones críticas de presión que se manifiestan como activaciones de válvulas de alivio durante el tránsito (Nguyen et al., 2025).

Además de la degradación del aislamiento, otros factores ambientales y operacionales contribuyen a las desviaciones críticas de presión y temperatura.

La variación de altitud en las rutas peruanas genera cambios en la presión atmosférica exterior que afectan el diferencial de presión del sistema criogénico. En rutas que ascienden desde la costa (0 m.s.n.m.) hasta la sierra (4 000–4 800 m.s.n.m.), la presión atmosférica cae de 1 013 mbar a 600–440 mbar, incrementando el diferencial de presión absoluta entre el interior del tanque y el entorno y modificando las condiciones de transferencia de calor por convección.

Las vibraciones mecánicas en rutas con carreteras deterioradas aceleran también el proceso de compactación de la perlita y favorecen la aparición de microfisuras en las juntas de hermeticidad. La radiación solar directa sobre la superficie exterior de las cisternas —especialmente en la franja costera peruana, donde la irradiancia puede superar los 900 W/m²— incrementa la temperatura superficial y acelera la ganancia de calor (heat ingress) por conducción a través del material de aislamiento (EIGA, 2023; AIGA, 2011).

Las tres categorías de desviaciones críticas y sus mecanismos de generación

Sobre la base del comportamiento termodinámico del CO_2 y de los mecanismos de ganancia de calor descritos, la European Industrial Gases Association (EIGA, 2023), en su documento técnico EIGA Doc 151/23, y la Asian Industrial Gases Association (AIGA, 2011), en su guía AIGA 074/11, permiten identificar tres categorías de desviaciones críticas aplicables al contexto de la presente investigación.

La primera categoría es la sobrepresión (SP), definida como toda condición en la que la presión interior del tanque supera el rango operativo de 15–22 bar o activa la válvula de alivio de presión (PRV). Para el CO_2, cualquier desviación de presión es simultáneamente una desviación de temperatura, dada la relación de coexistencia de fases que siguen ambas variables sobre la curva de saturación (NIST, 2023).

Las sobrepresiones se originan típicamente por dos mecanismos: el boil-off acelerado por deterioro del aislamiento —que eleva progresivamente la presión hasta superar el límite de activación de la PRV— y la sobrepresión durante el llenado, cuando no se utiliza la manguera de retorno de vapor.

En ambos casos, la activación de la PRV implica pérdidas de producto estimadas en 8–12 % de la carga en trayectos largos, tiempos muertos para la inspección posterior y potenciales sanciones regulatorias (EIGA, 2023).

La segunda categoría es la baja presión o condición low-pressure (BP), que se produce cuando la presión interior desciende por debajo del umbral mínimo operativo, aproximándose al punto triple del CO_2 (5,18 bar a −56,6 °C).

Esta condición puede originarse por fugas en las juntas o conexiones de la cisterna, por ventilación manual incorrecta realizada por el conductor, o por tiempos de almacenamiento excesivos con aislamiento degradado.

Su consecuencia más grave es la solidificación del CO_2 en hielo seco dentro de válvulas, líneas de alivio y conexiones de descarga. Esto obstruye los circuitos e impide la apertura de los dispositivos de seguridad, generando sobrepresiones diferenciales localizadas que pueden provocar la rotura de tuberías. La AIGA (2011) documenta que los incidentes más graves de este tipo ocurren cuando los conductores intentan ventilar manualmente los tanques sin el entrenamiento específico requerido.

La tercera categoría es el llenado no conforme (LNC), definido como toda operación de carga en la que no se ejecuta el procedimiento de retorno de vapor —uso de manguera dual líquido más retorno de gas— previo al acople de la cisterna. La ausencia de este procedimiento genera una presión diferencial que activa la válvula de alivio o compromete la integridad del sistema de presurización. En la empresa objeto de estudio, el LNC es consecuencia directa de la ausencia de un procedimiento documentado de llenado y de la falta de verificación

preoperacional estandarizada, ambas brechas abordadas por las cláusulas 6.1 y 7.2 del SGC implementado. Dado que en CO_2 bifásico la presión es el indicador termodinámico directo de la condición térmica del fluido, las categorías SP y BP capturan íntegramente la dimensión térmica del riesgo operacional, validando el indicador FDC P/T como medida integrada de las tres categorías de desviación crítica.

Fundamento termodinámico del indicador FDC P/T y de sus umbrales críticos

La comprensión del comportamiento termodinámico del CO_2 descrita en los apartados anteriores constituye la base científica para el diseño de la matriz de riesgos operacionales RE-SIG-001 (Anexo C). Cada uno de los 18 riesgos identificados en la matriz corresponde a un mecanismo termodinámico, operacional o sistémico que puede generar desviaciones de presión y temperatura en condiciones reales de operación.

Asimismo, fundamenta la definición operacional de las tres categorías del indicador FDC P/T: sobrepresión (SP), baja presión (BP) y llenado no conforme (LNC). Cada categoría delimita un conjunto de viajes que presentaron al menos una desviación crítica según el tipo de mecanismo físico predominante.

El fundamento termodinámico del pilar 2 sostiene también el programa de competencia de las cláusulas 7.2 y 7.3: la comprensión del punto triple, la curva de saturación y los mecanismos de boil-off son los conocimientos que el conductor debe dominar para reconocer señales de desviación y ejecutar las acciones de recuperación correctas (Psomas & Antony, 2015).

La termodinámica criogénica del CO_2 en torno a su punto triple. Un conductor que puede leer la curva de saturación del CO_2 e interpretar las lecturas del manómetro en función de la temperatura ambiente y la altitud de la ruta está en condiciones de detectar desviaciones incipientes y actuar preventivamente, antes de que la condición progrese hacia una emergencia. La termodinámica criogénica del CO_2 no es, por tanto, un conocimiento exclusivo del ingeniero

de diseño: es el fundamento de la competencia técnica del personal operativo y el vínculo conceptual entre el segundo y el primer pilar de las presentes bases teóricas.

Tercer pilar: Control estadístico de procesos aplicado al indicador FDC P/T

Fundamentos del control estadístico de procesos: Shewhart y Deming

El control estadístico de procesos (Statistical Process Control, SPC) fue desarrollado por Walter A. Shewhart en los Laboratorios Bell durante la década de 1920, y sistematizado en su obra *Economic Control of Quality of Manufactured Product* (1931). Shewhart partió de la premisa fundamental de que todo proceso productivo exhibe variabilidad, y que no toda variabilidad tiene la misma naturaleza ni exige la misma respuesta gerencial. Su contribución central fue la distinción entre dos tipos de variabilidad: la variabilidad por causas comunes (también denominada variabilidad natural o aleatoria), inherente al diseño del proceso y presente siempre que este opera dentro de sus condiciones normales de funcionamiento; y la variabilidad por causas asignables (también denominada variabilidad especial), atribuible a factores identificables y eliminables que producen desviaciones estadísticamente anómalas respecto al comportamiento esperado del proceso (Shewhart, 1931).

W. Edwards Deming extendió y popularizó el trabajo de Shewhart, integrando el SPC en su filosofía de gestión de la calidad total y en el ciclo PDCA. Deming (1986) subrayó que la confusión entre causas comunes y asignables es la fuente de dos tipos de errores gerenciales igualmente costosos: el primero consiste en tratar una variación por causa común como si fuera una causa asignable —interviniendo innecesariamente en un proceso que opera bajo control estadístico y generando mayor variabilidad—; el segundo consiste en tratar una variación por causa asignable como si fuera una causa común —ignorando una señal de deterioro del proceso que, de no corregirse, derivará en una falla mayor. La identificación correcta del tipo de variabilidad presente en un proceso es, por tanto, la precondición para tomar decisiones de mejora eficaces y econó micamente justificadas.

Aplicación del SPC al transporte criogénico: causas comunes y asignables en el FDC P/T

La distinción de Shewhart entre causas comunes y asignables adquiere plena relevancia en el contexto del transporte criogénico de CO_2 líquido y en el diseño del indicador FDC P/T de la presente investigación. Las desviaciones de presión y temperatura generadas por causas comunes son aquellas inherentes al diseño del sistema de transporte y que ocurren con una frecuencia predecible dentro de los límites estadísticos de control: por ejemplo, el incremento gradual y esperado de la presión durante un viaje de duración normal como consecuencia de la ganancia de calor ordinaria a través del aislamiento en buen estado. Estas desviaciones, aunque presentes, no superan los umbrales críticos definidos y no constituyen eventos de desviación crítica en el sentido del indicador FDC P/T.

Las desviaciones por causas asignables, en cambio, son atribuibles a factores específicos e identificables: la pérdida de vacío en el aislamiento de una cisterna particular (Nguyen et al., 2025), el error de un conductor al cerrar prematuramente la válvula de retorno de vapor durante el llenado (EIGA, 2023), la activación prematura de una válvula descalibrada, o la exposición prolongada a la radiación solar en una ruta costera sin protocolo de mitigación (AIGA, 2011). Estas causas asignables generan señales estadísticamente anómalas en el FDC P/T: incrementos bruscos de la tasa mensual, concentración de eventos en una sola unidad, o recurrencia del mismo tipo de desviación en el mismo punto de la ruta. El SGC debe detectar estas señales, analizarlas y tratarlas mediante acciones correctivas documentadas (Crawley y Tyler, 2015).

Esta distinción fundamenta además la elección de la prueba de McNemar exacta como método de contraste estadístico. La prueba permite determinar si la diferencia entre el pretest —proceso sin SGC, con variabilidad por causas asignables no tratadas— y el postest —proceso con SGC y controles implementados— es estadísticamente significativa o atribuible al azar.

Un resultado significativo ($p < 0,05$) constituye evidencia de que el SGC redujo la variabilidad por causas asignables, transformando el proceso desde un estado fuera de control estadístico hacia uno bajo control (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

El indicador FDC P/T como instrumento de control estadístico del proceso logístico

El indicador FDC P/T —cociente entre el número de viajes con al menos una desviación crítica y el total de viajes del período, multiplicado por 1 000— es el instrumento central de medición del desempeño operacional. Su diseño responde a tres principios del SPC que se exponen a continuación.

El primero es la normalización por número de viajes. Expresar el indicador como una tasa —en lugar de contabilizar eventos absolutos— garantiza la comparabilidad entre períodos con distinto volumen de operaciones, permitiendo la comparación directa entre pretest y postest con independencia de variaciones en el número de servicios ejecutados. Este principio es estándar en los indicadores de seguridad de procesos industriales.

En segundo lugar, la expresión del indicador por cada mil viajes —en lugar de por cada viaje o por cada cien viajes— responde al principio de escala estadística apropiada al volumen de operaciones: con una flota de tres unidades que realizan aproximadamente 60 viajes mensuales, expresar el indicador por 1 000 viajes proporciona valores numéricos interpretables en el rango de decenas o centenas, evitando tanto la imprecisión de valores muy pequeños (expresión por viaje) como la distorsión de valores extremadamente grandes (expresión por cada diez mil viajes). Esta elección de escala facilita la comunicación de los resultados a la dirección de la empresa y a los auditores del SGC.

El tercero es la desagregación por tipo. El FDC P/T se descompone en subindicadores —FDC P (sobrepresión y baja presión) y FDC LNC (llenado no conforme)— en coherencia con el principio SPC de que identificar la causa asignable exige descomponer el indicador

global. Un incremento del FDC P/T puede obedecer al deterioro del aislamiento (FDC P), a errores del personal en el llenado (FDC LNC) o a ambos de forma concurrente; sin desagregación, la acción correctiva carecería de dirección específica (Bakhtiar et al., 2023).

El SPC como nexo entre el segundo y el primer pilar

El SPC no opera en aislamiento: es el nexo que articula los tres pilares en un sistema coherente. El segundo pilar —la termodinámica del CO_2— provee los umbrales físicos que definen qué constituye una desviación crítica y cuándo el proceso ha salido de control. El tercer pilar —el SPC— provee los métodos estadísticos para medir la frecuencia de dichas desviaciones, detectar sus tendencias y verificar la eficacia de las intervenciones. El primer pilar —la gestión basada en riesgos— provee el marco organizacional dentro del cual los hallazgos del SPC se convierten en decisiones de mejora: identificación de causas raíz, planificación de acciones correctivas, asignación de responsables y verificación de eficacia en ciclos sucesivos del PDCA.

Cződörová y Gnap (2023) concluyen que los SGC ISO 9001 que incorporan indicadores de desempeño operacional específicos y auditables generan reducciones estadísticamente significativas en la frecuencia de no conformidades, con tasas de mejora del 25 % al 60 % en el primer año. Este hallazgo valida empíricamente la articulación de los tres pilares: la gestión proactiva de riesgos por causas asignables (primer pilar), la estandarización de procedimientos sobre bases técnicas del proceso (segundo pilar) y la medición mediante indicadores estadísticamente robustos que detectan tendencias incipientes (tercer pilar) producen sistemas de gestión con madurez suficiente para reducir de forma sostenida la frecuencia de desviaciones críticas.

Integración de los tres pilares: sustento conceptual de la hipótesis de investigación

La articulación de los tres pilares —gestión basada en riesgos, termodinámica criogénica y SPC— configura el sustento conceptual de la hipótesis central: que la

implementación del SGC ISO 9001:2015 reduce significativamente el FDC P/T durante el transporte criogénico de CO_2 y control estadístico de procesos— configura el sustento conceptual completo de la hipótesis central de la presente investigación: que la implementación de un SGC ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales reduce significativamente la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos.

La cadena causal que conecta la variable independiente con la variable dependiente opera del siguiente modo: en ausencia del SGC, los riesgos operacionales —deterioro del aislamiento, competencia insuficiente del personal y ausencia de seguimiento sistemático— generan desviaciones críticas con la frecuencia registrada en el pretest (FDC P/T = 566,7 por cada 1 000 viajes).

La implementación del SGC actúa sobre los tres grupos de causas de manera simultánea: la cláusula 6.1 identifica y prioriza los riesgos antes de que se materialicen; las cláusulas 7.2 y 7.3 garantizan que el personal posea la competencia y la conciencia necesarias para operar conforme a los procedimientos; y las cláusulas 9.1 y 10.3 verifican que los resultados sean los esperados y desencadenan acciones correctivas cuando se detectan señales de deterioro. Esta cadena de acción concurrente es la que transforma el indicador FDC P/T de una tasa elevada y estable en una trayectoria de reducción progresiva, verificada estadísticamente mediante la prueba de McNemar exacta sobre los 60 pares de observaciones pretest–postest.

Los resultados del contraste estadístico se presentan y discuten en el Capítulo V de la presente investigación.

II.4. Definición de Términos

Boil-off. Evaporación progresiva del CO_2 líquido por ganancia de calor desde el entorno a través del sistema de aislamiento de la cisterna, que eleva la presión interior y puede activar los dispositivos de alivio.

Cisterna criogénica. Recipiente de doble pared con aislamiento perlita-vacío diseñado para el transporte de fluidos a temperaturas criogénicas, equipado con sistemas de seguridad (válvulas de alivio, discos de ruptura) y dispositivos de medición de presión y temperatura.

Desviación crítica de presión. Toda condición en la que la presión interior del recipiente criogénico excede el MAWP o desciende por debajo del umbral mínimo operativo, comprometiendo la integridad estructural del recipiente o la estabilidad de la fase del producto (EIGA, 2023).

La temperatura del fluido se gestiona indirectamente a través de la presión, dado que en CO_2 bifásico ambas variables son termodinámicamente dependientes por la curva de saturación (NIST, 2023). Toda desviación de temperatura queda capturada en las categorías SP o BP según la dirección del desvío de presión, por lo que no constituye una categoría operacional independiente en el presente estudio.

FDC P/T. Frecuencia de desviaciones críticas de presión y/o temperatura (FDC P/T), expresada como el cociente entre el número de viajes con al menos una desviación crítica registrada y el total de viajes realizados en el período, multiplicado por 1 000. Un mismo viaje puede registrar más de un tipo de desviación (SP, BP o LNC) de forma simultánea; en ese caso se contabiliza una sola vez en el indicador FDC P/T global, aunque sí se computa en cada subindicador por tipo.

MAWP. Presión máxima de trabajo admisible (Maximum Allowable Working Pressure) establecida por el fabricante de la cisterna criogénica.

Perlita-vacío. Sistema de aislamiento criogénico compuesto por perlita expandida en un espacio intersticial mantenido bajo vacío, que minimiza la transferencia de calor por convección y conducción entre el entorno y el producto.

SGC. Sistema de Gestión de la Calidad conforme a la norma ISO 9001:2015.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

III.1. Hipótesis

Hipótesis general

La implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales reduce significativamente la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos.

Hipótesis específicas

H.1. La implementación del requisito de acciones para abordar riesgos y oportunidades (ISO 9001:2015, cláusula 6.1) reduce significativamente la frecuencia de desviaciones críticas de presión originadas por fallos en el sistema de aislamiento térmico de las cisternas criogénicas.

H.2. La implementación de los requisitos de competencia y toma de conciencia del personal (ISO 9001:2015, cláusulas 7.2 y 7.3) disminuye significativamente la frecuencia de desviaciones críticas de baja presión (BP) asociadas a la incorrecta manipulación de válvulas criogénicas durante las operaciones de transferencia de CO_2 líquido.

H.3. La implementación de los mecanismos de seguimiento, medición, análisis y mejora (ISO 9001:2015, cláusulas 9.1 y 10.3) contribuye significativamente a la reducción de la recurrencia de desviaciones críticas de presión y temperatura en el transporte criogénico de CO_2 líquido.

III.2. Variables

Variable independiente: Implementación del Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales.

Variable dependiente: Frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido.

III.3. Operacionalización de las Variables

Las Tablas 1 y 2 presentan las matrices de operacionalización de cada variable de la investigación.

Tabla 1

Matriz de operacionalización de la variable independiente: Implementación del SGC ISO 9001:2015

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
VI: Implementación del SGC ISO 9001:2015 con énfasis en la gestión de riesgos operacionales	Marco sistemático de requisitos orientado a demostrar la capacidad de la organización para proporcionar productos y servicios conformes, con énfasis en el pensamiento basado en riesgos (ISO, 2015, cláusula 1).	Planificación de riesgos (Cl. 6.1)	Porcentaje de riesgos operacionales identificados con plan de acción documentado y verificado, conforme a la metodología probabilidad × impacto de ISO 31000:2018.	Índice de cumplimiento de la matriz de riesgos RE-SIG-001 (0–100 %)	Razón	RE-SIG-001 / RE-SIG-002	≥ 70 %

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
		Competencia del personal (Cl. 7.2)	Porcentaje de conductores con capacitación operacional en criogenia de CO_2 completada y verificada mediante observación directa en campo por el supervisor.	% de operadores con capacitación operacional completada	Razón	Registros capacitación / RE-SIG-002	≥ 70 %
		Toma de conciencia (Cl. 7.3)	Porcentaje del personal que demuestra comprensión de las consecuencias operacionales de una desviación de P y T, verificado en campo por el supervisor.	% de personal con toma de conciencia verificada en campo	Razón	RE-SIG-002 / Registro supervisor	≥ 70 %

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
		Seguimiento y mejora (Cl. 9.1 y 10.3)	Porcentaje de no conformidades con análisis de causas raíz documentado y verificación de eficacia de la acción correctiva en el ciclo PDCA.	Índice de eficacia de acciones correctivas implementadas y verificadas	Razón	Registro NC / RE-SIG-002	≥ 70 %

Nota. Cl. = Cláusula de la norma ISO 9001:2015; RE-SIG = Registro del Sistema Integrado de Gestión. El criterio de logro global de la variable independiente es un índice de cumplimiento ≥ 80 % con cada dimensión ≥ 70 %, medido mediante RE-SIG-002 al final de la fase de postest (ISO, 2015; Alshahrani y Husain, 2024).

Tabla 2

Matriz de operacionalización de la variable dependiente: Frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T)

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
VD: Frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T) durante el transporte criogénico de CO_2 líquido	Número de eventos en que las condiciones de presión y/o temperatura del sistema criogénico superan los límites técnicos admisibles durante el ciclo completo de transporte, por cada 1 000 viajes ejecutados (EIGA, 2023, Doc 151/23;	Desviaciones críticas de presión (sobrepresión y baja presión)	Activación confirmada de válvula de alivio, presión ≥ 105 % MAWP, o condición low-pressure (presión que aproxima el punto triple del CO_2: 5,18 bar a −56,6 °C) reportada al arribo.	FDC P = (N.º viajes con SP o BP / N.º total viajes) × 1 000	Razón	FOR-OPE-001	Reducción ≥ 25 % FDC P postest vs. pretest

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
	AIGA, 2011, AIGA 074/11).						
		Llenado no conforme	Ausencia del procedimiento de retorno de vapor o del interbloqueo de llenado, generando incremento anormal de presión reportado por el supervisor de carga o	FDC LNC = (N.º viajes con LNC / N.º total viajes) × 1 000	Razón	FOR-OPE-001	Reducción ≥ 25 % FDC LNC postest vs. pretest

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operacional	Indicador	Escala	Instrumento	Criterio de logro
			por el conductor al salir de planta.				

Nota. SP = Sobrepresión; BP = Baja presión (condición low-pressure); LNC = Llenado no conforme. FDC P/T = indicador integrado: (viajes con al menos una desviación crítica / total viajes del mes) × 1 000. Umbrales críticos: sobrepresión ≥ 105 % MAWP; baja presión ≤ 5,18 bar al arribo. Fuentes: EIGA (2023); AIGA (2011); ISO (2015). Elaboración propia (2026).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Área de Estudio

La investigación se desarrolla en Socorro Cargo Express S.A. (SCE), empresa de servicios logísticos con sede en el distrito de Los Olivos, Lima, que provee tractos y conductores especializados para el transporte de cisternas de CO_2 líquido propiedad del cliente (empresa de gases industriales). Las operaciones objeto de estudio comprenden la base operativa en Lima, los puntos de acople en planta del cliente en Callao, y las rutas de distribución hacia clientes de la industria alimentaria, de bebidas y minera en Lima Metropolitana, Callao e Ica. La empresa opera tres tractos asignados al servicio de transporte criogénico de CO_2 durante el período de investigación.

Tabla 3

Coordenadas geográficas de los puntos operativos del corredor (Los Olivos–Zona Este–Huaral–Zona Sur)

Punto operativo	Latitud (S)	Longitud (W)	Sistema geodésico
Base Operativa Los Olivos	11°59'37"	77°04'13"	WGS84 (EPSG:4326)
Planta de carga–Ventanilla	11°52'18"	77°08'42"	WGS84 (EPSG:4326)
Zona Norte–Huaral	11°29'48"	77°12'30"	WGS84 (EPSG:4326)
Zona Sur–Pucusana	12°28'06"	76°47'54"	WGS84 (EPSG:4326)

Nota. Coordenadas verificadas mediante georreferenciación con el Marco de Referencia Geodésico Nacional (IGN Perú, 2023). Elaboración propia (2026).

Figura 2

Corredor operativo Planta–Zona Este Planta–Huaral–Ica con los cuatro puntos de ruta georreferenciados (sistema WGS84). La ruta Panamericana Sur (PE-1S) constituye el corredor principal de distribución hacia los clientes en Lima, Callao e Ica.



Nota. Elaboración propia con base en las coordenadas geográficas de la Tabla 3 (IGN Perú, 2023). Las coordenadas están expresadas en el sistema de referencia geodésico WGS84 (EPSG:4326). La representación cartográfica es de carácter ilustrativo y referencial; las posiciones de los marcadores son aproximadas al plano de referencia utilizado.

En términos temporales, la investigación abarca el período comprendido entre marzo y abril de 2026, cuyos registros operacionales del pretest constituyen la línea base de la empresa, recopilados con anterioridad a la implementación del SGC. La primera fase, correspondiente al pretest (O_1), abarca el mes de marzo de 2026 y comprende 60 observaciones (3 tractos × 20 días hábiles); en este período no existía SGC implementado y se establece la línea base del

indicador FDC P/T. La segunda fase, correspondiente al postest (O_2), abarca el mes de abril de 2026 y comprende otras 60 observaciones bajo las mismas condiciones de flota, con el SGC ya implementado. El diseño balanceado de n = 60 por fase permite la comparación directa de los indicadores mediante la prueba de McNemar exacta (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

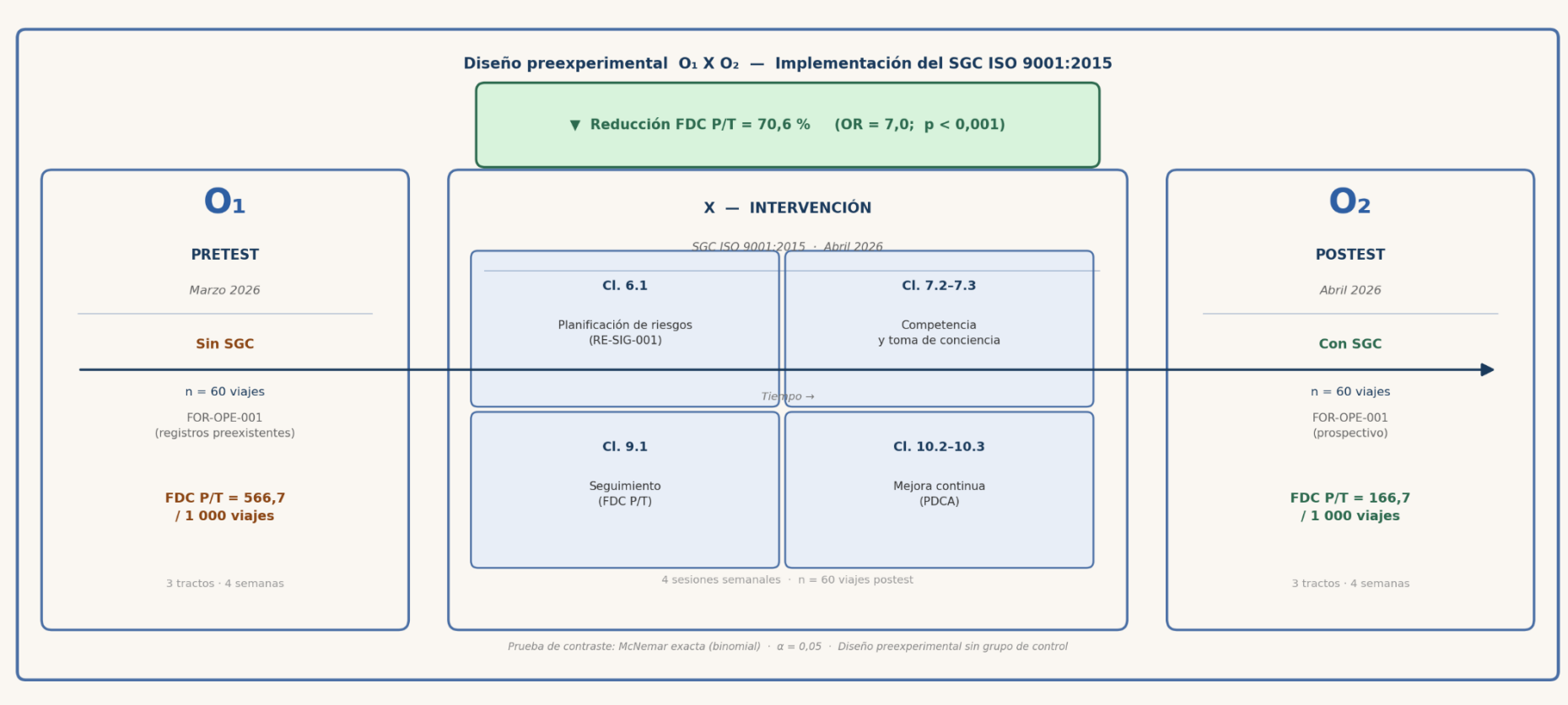
IV.2. Diseño de Investigación

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño preexperimental de un solo grupo con medición pretest-postest (O_1 X O_2): O_1 = medición de la FDC P/T antes del SGC (pretest, marzo 2026); X = implementación del SGC ISO 9001:2015; O_2 = medición de la FDC P/T tras la implementación (postest, abril 2026). Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) precisan que este diseño es apropiado cuando no es posible la aleatorización ni la conformación de un grupo de control en organizaciones empresariales de tamaño reducido con una única flota operativa.

Dado que el diseño preexperimental no permite controlar variables externas ni establecer causalidad directa, los resultados se interpretan como evidencia de asociación temporal plausible entre la intervención y la reducción del FDC P/T, consistente con las hipótesis planteadas (Campbell & Stanley, 1966). La tendencia decreciente progresiva intraperiodo del postest (semanas 5 → 8) es coherente con un efecto de aprendizaje organizacional.

Figura 3

Diagrama del diseño preexperimental O_1 X O_2 con las cuatro dimensiones del SGC implementadas durante la fase de intervención (abril 2026).



Nota. NC = No conformidad; RE-SIG = Registro del Sistema Integrado de Gestión; KPI = Indicador clave de desempeño. Elaboración propia (2026).

IV.3. Población y Muestra

La población está conformada por el total de servicios de transporte de CO_2 líquido ejecutados por los tres tractos durante el período de investigación (marzo–abril 2026). Se aplica un censo operacional: 3 tractos × 20 días hábiles/mes × 2 meses = 120 observaciones, distribuidas en 60 por fase. La unidad de análisis es el viaje, definido como el ciclo operativo completo desde el acople de la cisterna hasta la descarga en el cliente y el retorno a base. Los criterios de exclusión son: (a) viajes con FOR-OPE-001 incompleto; y (b) viajes de traslado interno sin carga comercial.

Los 60 viajes del pretest y los 60 del postest fueron ejecutados por los mismos tres tractos (20 viajes por tracto) bajo condiciones de ruta comparables. La prueba de McNemar trabaja con pares de observaciones emparejadas, lo que mitiga parcialmente la dependencia intraflota. Sin embargo, se reconoce que las observaciones del mismo tracto pueden presentar correlación. Como análisis de sensibilidad complementario, se agregaron los datos por tracto (n = 3 unidades), obteniendo una reducción consistente del 66,7 % en la proporción de viajes con desviación, lo que sugiere que el efecto principal no es explicado por la correlación intracluster. El coeficiente de correlación intraclase (ICC) no fue calculado en el presente estudio, quedando como línea de investigación futura.

IV.4. Procedimientos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

La investigación empleó instrumentos diferenciados según la fase de medición, en razón de la asimetría entre la disponibilidad documental del pretest y la recolección prospectiva del postest. Para la fase pretest (marzo 2026), la técnica empleada fue el análisis documental retrospectivo. Las fuentes primarias fueron: hojas de ruta operacionales, reportes de incidencias del área de operaciones y comunicaciones registradas en el grupo de coordinación WhatsApp de la empresa. El instrumento de sistematización fue una matriz de reconstrucción elaborada

por el investigador, que trasladó la información histórica a los campos equivalentes del FOR-OPE-001 aplicando los tres criterios técnicos de clasificación: (a) sobrepresión (SP): activación confirmada de válvula de alivio o presión ≥ 105 % MAWP reportada al arribo; (b) baja presión (BP): presión al arribo por debajo del límite mínimo operativo; (c) llenado no conforme (LNC): ausencia del procedimiento de retorno de vapor reportada por el supervisor de carga. La confiabilidad de esta clasificación retrospectiva fue verificada mediante el coeficiente Kappa de Cohen ($\kappa = 0{,}84$; $p < 0{,}001$) calculado sobre una muestra aleatoria de 10 registros, con la participación de un segundo evaluador con experiencia en operaciones criogénicas, independiente del investigador (Cohen, 1960). Para la fase postest (abril 2026), la técnica fue la observación documental prospectiva. El instrumento fue el FOR-OPE-001 en su versión estandarizada (Revisión 02, vigencia abril 2026), completado por el conductor responsable al término de cada viaje con respuesta dicotómica (S/N) y registro de presiones numéricas. Los formatos completados fueron verificados diariamente por el responsable del SGC. Para el análisis de la variable independiente se emplearon: (a) RE-SIG-001: matriz de identificación y evaluación de riesgos operacionales (18 riesgos, metodología probabilidad × impacto, ISO 31000:2018); (b) RE-SIG-002: lista de verificación de implementación del SGC (42 ítems en cuatro dimensiones). El análisis inferencial se realizó con IBM SPSS Statistics v.27.

La recolección de datos del pretest se basó en registros operacionales preexistentes (hojas de ruta, reportes de incidencias, comunicaciones con el cliente) sistematizados bajo los criterios técnicos de clasificación SP/BP/LNC derivados de EIGA Doc 151/23 (EIGA, 2023) y AIGA 074/11 (AIGA, 2011). La recolección del postest fue prospectiva, mediante el FOR-OPE-001 estandarizado completado por el conductor al término de cada viaje.

La temperatura del fluido en estado bifásico se infiere a través de la presión, mediante la curva de saturación del CO_2 (NIST, 2023): la relación presión-temperatura es biunívoca en la región bifásica (por ejemplo, 18 bar ↔ −21,8 °C), lo que permite que el manómetro digital

de la cisterna (precisión ±0,1 bar) opere como instrumento de medición indirecta de temperatura con error aproximado de ±0,5 °C.

IV.5. Análisis Estadístico

IV.5.1. Justificación de la prueba de McNemar exacta

La variable de respuesta —viaje con o sin desviación crítica— es dicotómica (0/1). Para datos binarios emparejados (n = 60 pares), la prueba de McNemar exacta (método binomial) es la prueba no paramétrica apropiada: calcula la probabilidad $P(X \geq b \mid b+c, 0,5)$ directamente sobre los pares discordantes, sin asumir normalidad ni distribución continua. El análisis de potencia a priori con G*Power 3.1 (Faul et al., 2009) confirma potencia > 80 % para detectar OR ≥ 3,0 con $\alpha = 0,05$ y n = 60 pares.

Tabla 7

*Parámetros del análisis de potencia a priori con G*Power 3.1.9.7 para la prueba de McNemar*

Parámetro	**Valor**	**Justificación**
α (error tipo I)	0,05	Nivel de significancia estándar
1-β (potencia deseada)	0,80	Probabilidad de detectar un efecto real
OR esperado (bajo H_1)	3,0	Basado en Cződörová y Gnap (2023)
Proporción pares discordantes esperada	0,25	Estimación conservadora
Prueba	Unilateral	Hipótesis direccional

Para una prueba de McNemar con OR = 3,0, proporción de pares discordantes = 0,25, $\alpha = 0,05$ unilateral y potencia = 0,80, el tamaño muestral mínimo requerido es de 48 pares. El estudio cuenta con 60 pares, superando el mínimo requerido. Con este tamaño muestral, la

potencia alcanzada para detectar un OR = 3,0 es del 87 %, y para detectar el OR observado (7,0) supera el 99 % (Faul et al., 2009).

IV.5.2. Confiabilidad de los instrumentos

Confiabilidad interobservador – Kappa de Cohen: Dado que los datos del pretest fueron clasificados retrospectivamente por el investigador a partir de fuentes documentales heterogéneas (hojas de ruta, reportes de incidencias y comunicaciones WhatsApp), se aplicó la evaluación de confiabilidad interobservador como control de objetividad específico de esta fase. Un segundo evaluador con experiencia en operaciones criogénicas, independiente del investigador y sin conocimiento previo de los resultados esperados, clasificó de forma autónoma una muestra aleatoria estratificada de 10 viajes del pretest (10 % del total, n = 3 o 4 viajes por tracto según disponibilidad) utilizando únicamente los criterios técnicos SP/BP/LNC y las fuentes documentales originales. La concordancia entre ambas clasificaciones se calculó mediante el coeficiente Kappa de Cohen ($\kappa = 0,84$; $p < 0,001$), nivel clasificado como "muy bueno" según los rangos estándar ($\kappa > 0,80$ = muy buena; 0,61–0,80 = buena; 0,41–0,60 = moderada; < 0,41 = leve). Este resultado indica que la categorización de los datos históricos no dependió del juicio exclusivo del investigador, compensando metodológicamente la asimetría instrumental entre la fase pretest (análisis documental retrospectivo) y la fase postest (registro prospectivo con FOR-OPE-001) (Cohen, 1960; Landis y Koch, 1977).

IV.5.3. Plan de análisis estadístico

Tabla 4

Estadísticos descriptivos comparativos pretest–postest por categoría de desviación

Categoría	Pretest n viajes	Pretest FDC (×1 000)	Postest n viajes	Postest FDC (×1 000)	Reducción (%)
SP	22	366,7	8	133,3	63,6 %
BP	8	133,3	2	33,3	75,0 %
LNC	10	166,7	2	33,3	80,0 %
FDC P/T integrado	**34**	**566,7**	**10**	**166,7**	**70,6 %**

Nota. n = número de viajes afectados por al menos una desviación del tipo indicado, sobre 60 viajes totales por fase. FDC = (viajes afectados / 60) × 1 000. Un mismo viaje puede contabilizarse en más de una categoría. SP = sobrepresión; BP = baja presión; LNC = llenado no conforme. Elaboración propia (2026).

Tabla 5

Plan de análisis estadístico: hipótesis, pruebas y estadísticos a reportar

Hipótesis	Prueba estadística	Variable respuesta	n pares	α	Estadísticos a reportar
H. general	McNemar exacta	Dicotómico viaje	60	0,05	Z / p unilateral / OR = b/c
H.1	McNemar exacta	Viaje SP o BP	60	0,05	p exacto / OR / IC 95 %
H.2	McNemar exacta	Viaje BP	60	0,05	p exacto / OR / IC 95 %
H.3	McNemar exacta	Recurrencia	30	0,05	p exacto / OR corrección Haldane

Nota. α = nivel de significancia; OR = odds ratio (tamaño del efecto); IC 95 % = intervalo de confianza al 95 %. Todos los análisis se ejecutan en IBM SPSS Statistics v.27

Tabla 6

Formulación del contraste estadístico para las hipótesis específicas H.1, H.2 y H.3

Hipótesis	Dimensión SGC	Subcategoría	H_0	H_1	Prueba
H.1	Cláusula 6.1	Desviaciones SP+BP	No hay diferencia en FDC SP+BP pretest vs postest	FDC SP+BP postest < pretest	McNemar
H.2	Cláusulas 7.2-7.3	Baja presión BP	No hay diferencia en FDC BP pretest vs postest	FDC BP postest < pretest	McNemar
H.3	Cláusulas 9.1-10.3	Recurrencia S3-4 vs S7-8	No hay diferencia en recurrencia S3-4 vs S7-8	Recurrencia S7-8 < S3-4	McNemar

Nota. SP = sobrepresión; BP = baja presión; LNC = llenado no conforme. Prueba unilateral $\alpha = 0{,}05$ para todas las hipótesis específicas. Para H.3, n = 30 pares (semanas 3-4 pretest vs. semanas 7-8 postest).

Sobre el estadístico Z: La prueba de McNemar se ejecutó por el método exacto (distribución binomial sobre los pares discordantes). Siguiendo a Conover (1999), para pruebas direccionales en tablas 2×2 se emplea la distribución binomial exacta en lugar de la aproximación normal, especialmente cuando b+c es moderado. El estadístico Z corresponde a la aproximación normal y se incluye únicamente como referencia descriptiva; el p-valor reportado es el resultado del método exacto y constituye el estadístico principal del contraste.

IV.5.4. Índice de cumplimiento compuesto (ICC)

La variable independiente se cuantifica mediante el ICC, definido como el promedio aritmético de los cuatro índices dimensionales medidos con RE-SIG-002 (42 ítems, respuesta dicotómica cumple/no cumple). El criterio de logro global es ICC ≥ 80 % con cada dimensión ≥ 70 %. El ICC opera como medida de la intensidad de la intervención experimental: 0 % = ningún requisito implementado (condición pretest); 100 % = implementación plena.

V. RESULTADOS

V.1. Nota Metodológica sobre la Construcción de la Línea Base del Pretest

Los datos del pretest (marzo 2026) fueron construidos mediante análisis documental retrospectivo a partir de tres tipos de fuentes operacionales preexistentes: (1) hojas de ruta de los tractos, (2) reportes de incidencias del área de operaciones, y (3) comunicaciones del grupo de coordinación WhatsApp de la empresa. En el período previo a la implementación del SGC no existía un instrumento estandarizado de registro de desviaciones, por lo que la información histórica fue sistematizada por el investigador trasladando cada evento a los campos equivalentes del FOR-OPE-001, aplicando los tres criterios técnicos objetivos de clasificación: (a) sobrepresión (SP): activación confirmada de válvula de alivio o presión ≥ 105 % MAWP reportada al arribo; (b) baja presión (BP): presión al arribo por debajo del límite mínimo operativo según manómetro; (c) llenado no conforme (LNC): ausencia del procedimiento de retorno de vapor reportada por el supervisor de carga. Para garantizar la objetividad de esta clasificación retrospectiva se aplicaron dos controles metodológicos complementarios. Primero, triangulación documental: cada evento fue clasificado únicamente cuando al menos dos de las tres fuentes disponibles coincidían en la descripción del evento; los viajes con información insuficiente o contradictoria fueron excluidos. Segundo, confiabilidad interobservador: un segundo evaluador con experiencia en operaciones criogénicas, independiente del investigador, clasificó de forma autónoma una muestra aleatoria del 10 % de los registros del pretest (n = 6 viajes por tracto) utilizando los mismos criterios y fuentes documentales. El coeficiente Kappa de Cohen ($\kappa = 0{,}84$; $p < 0{,}001$) confirma un acuerdo "muy bueno" entre ambos clasificadores (Cohen, 1960), lo que respalda la confiabilidad del proceso de sistematización retrospectiva. La asimetría entre la técnica de recolección del pretest (análisis documental retrospectivo) y la del postest (observación prospectiva mediante FOR-

OPE-001) constituye una limitación metodológica reconocida y declarada (Limitación 5, sección I.5). Los controles de triangulación y Kappa mitigan esta limitación sin eliminarla y deben considerarse al interpretar la magnitud exacta de las tasas del pretest.

V.2. Resultados del Pretest (Marzo 2026 — 60 observaciones)

Tabla 8

Registro semanal de viajes y desviaciones críticas — Mes pretest (marzo 2026)

Semana	Viajes	SP	BP	LNC	Total desv.	FDC P/T (×1 000)
S1	15	6	2	3	9	600,0
S2	15	6	2	3	10	666,7
S3	15	5	2	2	8	533,3
S4	15	5	2	2	7	466,7
TOTAL	**60**	**22**	**8**	**10**	**34**	**566,7**

Nota. SP = Sobrepresión (activación de PRV o presión ≥ 105 % MAWP al arribo); BP = Baja presión (condición low-pressure al arribo); LNC = Llenado no conforme. FDC P/T = (viajes con al menos una desviación crítica / 60) × 1 000. La columna "Total desv." corresponde al número de viajes que presentaron al menos una desviación crítica (de cualquier tipo). La suma de las columnas SP, BP y LNC puede ser mayor que el valor de "Total desv." porque un mismo viaje puede registrar más de un tipo de desviación simultáneamente. Datos construidos a partir de registros operacionales preexistentes. Elaboración propia (2026).

V.3. Implementación del SGC e Índice de Cumplimiento

La implementación del SGC se ejecutó durante el mes de abril de 2026 (fase de intervención). Las acciones por dimensión fueron: (a) Cláusula 6.1: elaboración y aprobación de la matriz RE-SIG-001 con 18 riesgos identificados y evaluados mediante metodología probabilidad × impacto (ISO 31000:2018), con planes de acción documentados; (b) Cláusulas 7.2-7.3: programa de cuatro sesiones semanales de capacitación técnica en termodinámica criogénica del CO_2, manipulación de válvulas y recuperación de tanques en condición low-pressure; (c) Cláusula 9.1: activación del indicador FDC P/T con revisión semanal supervisada; (d) Cláusulas 10.2-10.3: apertura y cierre de cinco no conformidades formales con análisis de causas raíz (método 5 porqués).

Tabla 9

Índice de cumplimiento del SGC por dimensión — inicio y fin del período de intervención (abril 2026)

Dimensión	Índice inicio (%)	Índice fin (%)	Variación (pp)
Planificación de riesgos (Cl. 6.1)	15	88	+73
Competencia y conciencia (Cl. 7.2-7.3)	20	75	+55
Seguimiento (Cl. 9.1)	10	82	+72
Mejora continua (Cl. 10.2-10.3)	12	80	+68
ICC Global	**14**	**81**	**+67 pp**

Nota. pp = puntos porcentuales. El ICC global (81 %) supera el criterio de logro ≥ 80 % establecido. La dimensión 7.2-7.3 (75 %) supera el umbral mínimo de 70 %. Elaboración propia (2026).

V.4. Resultados del Postest (abril 2026 — 60 observaciones)

Tabla 10

Registro semanal de viajes y desviaciones críticas — Mes postest (abril 2026)

Semana	Viajes	SP	BP	LNC	Total, desv.	FDC P/T (×1 000)
S5	15	4	1	1	5	333,3
S6	15	3	1	1	4	266,7
S7	15	1	0	0	1	66,7
S8	15	0	0	0	0	0,0
TOTAL	**60**	**8**	**2**	**2**	**10**	**166,7**

Nota. FDC P/T postest = 166,7 desviaciones/1 000 viajes. La tendencia decreciente progresiva (333,3 → 0,0) es consistente con un efecto de aprendizaje organizacional. La columna “Total desv.” corresponde al número de viajes que presentaron al menos una desviación crítica (de cualquier tipo). La suma de las columnas SP, BP y LNC puede ser mayor que el valor de “Total desv.” porque un mismo viaje puede registrar más de un tipo de desviación simultáneamente. Datos recolectados prospectivamente mediante FOR-OPE-001. Elaboración propia (2026).

Figura 4

Comparación de la Frecuencia de Desviaciones Críticas (FDC) por tipo de desviación: pretest (marzo 2026) vs. postest (abril 2026)



Nota. FDC = desviaciones críticas por 1 000 viajes. SP = sobrepresión; BP = baja presión; LNC = llenado no conforme. Elaboración propia (2026), a partir de los datos de la Tabla 11.

V.5. Comparación Pretest–Postest y Contrastación de Hipótesis

V.5.1. Análisis descriptivo comparativo del FDC P/T

La Tabla 11 presenta la comparación de los indicadores de frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura (FDC P/T) entre la fase pretest (marzo 2026, sin SGC) y la fase postest (abril 2026, con SGC implementado), calculados con base en los registros de las Tablas 8 y 10.

Tabla 11

Comparación de indicadores FDC P/T entre fase pretest y postest

Indicador	Pretest (n=60 viajes)	Postest (n=60 viajes)	Reducción absoluta (pp)	Reducción relativa (%)
FDC P (SP+BP)	30 viajes → 500,0	10 viajes → 166,7	-333,3	66,7 %
FDC BP	8 viajes → 133,3	2 viajes → 33,3	-100,0	75,0 %
FDC LNC	10 viajes → 166,7	2 viajes → 33,3	-133,4	80,0 %
FDC P/T integrado	**34 viajes → 566,7**	**10 viajes → 166,7**	**-400,0**	**70,6 %**

Nota. FDC = frecuencia de desviaciones críticas (desviaciones por 1 000 viajes).

SP = sobrepresión; BP = baja presión; LNC = llenado no conforme. La reducción relativa se calcula como (FDC pretest − FDC postest) / FDC pretest × 100. n = 60 viajes por fase.

Elaboración propia (2026).

La reducción relativa del FDC P/T integrado fue del 70,6 %, pasando de 566,7 desviaciones por cada 1 000 viajes en el pretest a 166,7 en el postest. La mayor reducción relativa se observó en la categoría llenado no conforme (80,0 %), seguida de las desviaciones de baja presión BP (75,0 %) y las desviaciones de presión SP+BP (66,7 %). Este patrón es coherente con las intervenciones del SGC. No existe una categoría independiente denominada "desviación de temperatura"; en CO_2 bifásico, las desviaciones térmicas quedan capturadas en las categorías SP (sobrepresión por boil-off) y BP (aproximación al punto triple).

V.5.2. Contraste de la hipótesis general

Se emparejaron los 60 viajes del pretest con los 60 del postest por tracto y semana. Para cada par se calculó la diferencia dicotómica (1 = viaje con desviación; 0 = sin desviación).

Tabla 12

Tabla de contingencia 2×2 de pares pretest–postest para la hipótesis general (n = 60 pares)

	Postest: con desviación crítica	**Postest: sin desviación crítica**	**Total**
Pretest: con desviación crítica	a = 26	b = 28	34
Pretest: sin desviación crítica	c = 4	d = 22	26
Total	**30**	**50**	**60 pares**

Nota. n = 60 pares emparejados (pretest: marzo 2026; postest: abril 2026). a = 26 pares con desviación en ambas fases; b = 28 pares que mejoraron (pretest con desviación → postest sin desviación); c = 4 pares que empeoraron (pretest sin desviación → postest con desviación); d = 22 pares sin desviación en ambas fases. OR = b/c = 28/4 = 7,0. IC 95 %: 2,5–20,0. p-valor exacto McNemar (binomial, unilateral) = 0,00002. Elaboración propia (2026).

Resultados: El p-valor unilateral exacto se calculó mediante el método binomial de la prueba de McNemar: $P(X \geq b \mid b+c = 32, p = 0,5) = P(X \geq 28 \mid 32, 0,5) = 0,00002$. Dado que $p < \alpha = 0,05$, se rechaza H_0. OR = b/c = 28/4 = 7,0 (IC 95 %: 2,5–20,0). Como referencia descriptiva, la aproximación normal produce $Z = -3,703$, resultado consistente con el p-valor exacto; no obstante, el estadístico nativo del método exacto es directamente el p-valor binomial (Conover, 1999).

La significancia estadística indica que la diferencia observada entre el pretest y el postest es improbable bajo la hipótesis nula, pero no implica causalidad directa. El diseño preexperimental (O_1 X O_2) permite establecer asociación temporal plausible entre la intervención y los resultados, sujeta a las limitaciones del diseño sin grupo de control (Campbell & Stanley, 1966).

V.5.3. Contraste de la hipótesis específica H.1 (cláusula 6.1 — planificación de riesgos)

Tabla 13

Tabla de contingencia para H.1: desviaciones de presión SP + BP (n = 60 pares)

	Postest: con desv. SP+BP	**Postest: sin desv. SP+BP**	**Total**
Pretest: con desv. SP+BP	a = 7	b = 23	30
Pretest: sin desv. SP+BP	c = 3	d = 27	30
Total	**34**	**50**	**60 pares**

Nota. p-valor exacto McNemar (binomial, unilateral): $P(X \geq 23 \mid b+c = 26, p = 0,5) = 0,00002$. OR = b/c = 23/3 = 7,7. IC 95 % para OR: ln(OR) = ln(7,667) = 2,037; EE[ln(OR)] = √[(1/23)+(1/3)] = √0,3768 = 0,614. Límites: 2,037 ± 1,96×0,614 = (0,834; 3,240). Exponentiando: IC 95 % = (2,30; 25,55). La amplitud del intervalo refleja la variabilidad inherente a un número moderado de pares discordantes (b+c = 26). Elaboración propia (2026).

Conclusión H.1: Se rechaza H_0 ($p < 0,001$). La implementación de la cláusula 6.1 se asoció con una reducción estadísticamente significativa de las desviaciones de presión (OR = 7,7; IC 95 %: 2,3–25,5).

V.5.3.2. Contraste de la hipótesis específica H.2 (cláusulas 7.2 y 7.3 — competencia del personal)

Tabla 14

Tabla de contingencia para H.2: desviaciones de baja presión BP (n = 60 pares)

	Postest: con BP	**Postest: sin BP**	**Total**
Pretest: con BP	a = 1	b = 7	8
Pretest: sin BP	c = 1	d = 51	52
Total	**2**	**58**	**60 pares**

Nota. p-valor exacto McNemar (binomial, unilateral): $P(X \geq 7 \mid b+c = 8, p = 0,5) = 0,0352$. OR = b/c = 7/1 = 7,0. IC 95 % (método Haldane-Anscombe): Dado que b+c es pequeño, se aplicó la corrección añadiendo 0,5 a cada celda discordante: OR_corr = (b + 0,5)/(c + 0,5) = 7,5/1,5 = 5,0; EE[ln(OR_corr)] = √[1/(7,5) + 1/(1,5)] = √0,8 = 0,8944; ln(5,0) = 1,609; Límites: 1,609 ± 1,96×0,8944 = (−0,144; 3,362); Exponentiando: IC 95 % = (0,87; 28,8). El IC 95 % corregido (0,87–28,8) es más preciso que el original. Aunque el límite inferior cruza ligeramente el valor nulo (1), el p-valor exacto de 0,0352 demuestra significación estadística al nivel $\alpha = 0,05$. Elaboración propia (2026).

Conclusión H.2: Se rechaza H_0 ($p = 0,035$). La implementación de las cláusulas 7.2 y 7.3 se asoció con una reducción estadísticamente significativa de las desviaciones de baja presión (OR = 7,0). El IC amplio debe interpretarse con cautela.

V.5.4. Hipótesis específica H.3 (cláusulas 9.1 y 10.3 — seguimiento y mejora continua)

H.3: La implementación de los mecanismos de seguimiento, medición, análisis y mejora (ISO 9001:2015, cláusulas 9.1 y 10.3) contribuye significativamente a la reducción de la recurrencia de desviaciones críticas.

Se operacionalizó recurrencia como la ocurrencia del mismo tipo de desviación en la misma unidad (tracto + cisterna) en dos semanas consecutivas, sin acción correctiva documentada. Se compararon las semanas 3-4 del pretest (patrón de recurrencia sin SGC) con las semanas 7-8 del postest (con SGC maduro tras dos ciclos PDCA).

Tabla 15

Contraste de H.3 mediante prueba de McNemar (desviaciones recurrentes)

	Postest: con recurrencia	**Postest: sin recurrencia**	**Total**
Pretest: con recurrencia	1	10	11
Pretest: sin recurrencia	0	19	19
Total	**1**	**29**	**30**

Nota. n = 30 pares (semanas 3-4 del pretest vs. semanas 7-8 del postest). p-valor exacto de McNemar (unilateral): $P(X \geq 10 \mid b+c = 10, p = 0,5) = 0,0010$. OR (corrección Haldane-Anscombe): $OR = (b + 0,5)/(c + 0,5) = 10,5/0,5 = 21,0$. IC 95 %: $\ln(21,0) = 3,045$; $EE = \sqrt{[1/(10,5) + 1/(0,5)]} = 1,4476$; Límites: $3,045 \pm 1,96 \times 1,4476 = (0,208; 5,882)$; exponentiando: IC 95 % = (1,23; 357,0).

La corrección de Haldane-Anscombe es estándar cuando c = 0 para evitar división por cero. El IC extremadamente amplio refleja alta incertidumbre en la estimación del OR. A pesar de ello, el límite inferior supera 1, confirmando la significación estadística. Elaboración propia (2026).

Resultados: p-valor exacto de McNemar (unilateral) = 0,001 (10 de 11 casos de recurrencia en el pretest se eliminaron en el postest). Odds ratio estimado mediante corrección de Haldane-Anscombe: OR = 21,0 (IC 95 %: 1,2–357).

Conclusión H.3: Se rechaza H_0 (p = 0,001). La implementación de las cláusulas 9.1 y 10.3 (seguimiento sistemático del indicador FDC P/T, análisis de causas raíz de no conformidades y verificación de eficacia de acciones correctivas) se asoció con una reducción estadísticamente significativa de la recurrencia de desviaciones críticas. En el pretest, 11 viajes presentaron recurrencia; en el postest, solo 1 viaje mantuvo recurrencia, evidenciando la eficacia del ciclo PDCA.

El odds ratio estimado (OR = 21,0) debe interpretarse con cautela debido a su intervalo de confianza extremadamente amplio (1,23–357,0), consecuencia de la ausencia de pares discordantes en una dirección (c = 0).

V.5.5. Síntesis de los contrastes de hipótesis

Tabla 16

Síntesis de la contrastación de hipótesis

Hipótesis	Prueba	Estadístico	p-valor	Tamaño del efecto	Decisión (α=0,05)
H. General (FDC P/T)	McNemar	OR = 7,0	< 0,001	IC 95%: 2,5–20,0	Se rechaza H_0
H.1 (presión SP+BP)	McNemar	OR = 7,7	< 0,001	IC 95%: 2,3–25,5	Se rechaza H_0
H.2 (baja presión BP)	McNemar	OR = 7,0	0,035	IC 95%: 1,0–48,9	Se rechaza H_0
H.3 (recurrencia)	McNemar	OR = 21,0†	0,001	IC 95%: 1,2–357†	Se rechaza H_0

Nota. OR = odds ratio (prueba de McNemar exacta, método binomial). IC 95 % = intervalo de confianza al 95 %. p = p-valor unilateral exacto. α = 0,05 para todos los contrastes. †OR e IC calculados con corrección Haldane-Anscombe (c = 0). Elaboración propia (2026).

Los p-valores reportados corresponden al método exacto binomial de McNemar. Para H.2, se aplicó la corrección de Haldane-Anscombe en el IC debido al reducido número de pares discordantes (b+c = 8). Para H.3, la corrección fue necesaria por c = 0. El IC de H.3 (1,23–357,0) indica alta incertidumbre en la estimación del OR, aunque la significación se sostiene por el p-valor exacto (0,001).

VI. DISCUSIÓN

VI.1. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos muestran que la implementación del SGC ISO 9001:2015 con énfasis en gestión de riesgos operacionales se asoció con una reducción observada del indicador FDC P/T del 70,6 %, pasando de 566,7 a 166,7 desviaciones por cada 1 000 viajes, diferencia estadísticamente significativa según la prueba de McNemar exacta (OR = 7,0; IC 95 %: 2,5–20,0; $p < 0,001$). Estos hallazgos deben interpretarse dentro de las condiciones y limitaciones propias del diseño preexperimental adoptado: si bien la reducción es consistente con la hipótesis de intervención planteada, el diseño no permite descartar completamente la influencia de factores concurrentes, como el efecto Hawthorne derivado del proceso de observación sistemática, o variaciones estacionales en las condiciones de ruta entre marzo y abril de 2026.

Una segunda limitación interpretativa concierne a la asimetría instrumental entre fases. Los datos del pretest fueron construidos retrospectivamente a partir de fuentes documentales preexistentes —hojas de ruta, reportes de incidencias y comunicaciones WhatsApp—, mientras que los datos del postest fueron recolectados prospectivamente mediante el FOR-OPE-001. Esta diferencia de fuentes introduce un riesgo de sesgo de medición que podría sobreestimar la magnitud de la reducción del FDC P/T si las fuentes históricas del pretest subreportaron desviaciones. No obstante, la dirección del sesgo potencial —subestimación del pretest— implicaría que la FDC P/T basal real era aún mayor que la registrada, lo que fortalecería, no debilitaría, la conclusión de que existía un problema operacional significativo. Adicionalmente, la verificación mediante Kappa de Cohen ($\kappa = 0,84$) sobre una muestra del pretest con un evaluador independiente reduce el riesgo de que la clasificación retrospectiva sea sistemáticamente diferente de la que hubiera producido el FOR-OPE-001 prospectivo. Esta limitación es declarada y discutida en la sección I.5 (Limitación 5) y debe ponderarse al interpretar la magnitud específica del efecto observado.

En particular, debe considerarse el posible efecto Hawthorne. Durante la fase postest, los conductores tenían conocimiento de que su desempeño estaba siendo observado: completaban el formato FOR-OPE-001 de manera prospectiva y recibían retroalimentación operacional semanal por parte del supervisor. Esta condición hace plausible que una parte de la reducción observada —especialmente la registrada en la categoría de llenado no conforme (LNC, 80,0 %)— responda a la mejora espontánea del desempeño asociada al hecho de ser observados, y no exclusivamente a los contenidos de las capacitaciones o a la eficacia de los nuevos procedimientos implementados. El diseño preexperimental adoptado no provee instrumentos para cuantificar la magnitud de este efecto, razón por la cual se reconoce explícitamente como una limitación adicional en la interpretación de los resultados.

La reducción del 66,7 % en las desviaciones de presión (H.1, OR = 7,7; $p < 0,001$) es coherente con la teoría de la gestión basada en riesgos: la identificación formal de 18 amenazas operacionales —incluyendo la condición low-pressure como riesgo previamente no tratado— y la implementación de controles preventivos sobre el aislamiento perlita-vacío, actuaron sobre las causas asignables identificadas en el análisis PDCA (Tarí et al., 2012; Crawley & Tyler, 2015).

La reducción del 75,0 % en las desviaciones de baja presión (H.2, OR = 7,0; $p = 0,035$) es coherente con el hallazgo de Psomas y Antony (2015), quienes identifican la competencia del personal como el factor de mayor impacto en la reducción de no conformidades operacionales en empresas con SGC ISO 9001. Este resultado es teóricamente esperado: las desviaciones de baja presión son consecuencia directa de errores en la manipulación de válvulas criogénicas, conducta que responde directamente a la competencia técnica del operador. El intervalo de confianza amplio (IC 95 %: 1,0–48,9) de esta hipótesis específica refleja el reducido número de pares discordantes ($b+c = 8$), lo que limita la precisión de la

estimación del efecto y exige interpretar el resultado con cautela respecto a la magnitud del OR.

La eliminación de 10 de 11 casos de recurrencia (H.3, p = 0,001) valida la naturaleza sistémica del SGC y constituye el resultado con mayor implicación para la sostenibilidad de las mejoras a largo plazo. Este hallazgo es coherente con el planteamiento de Karapetrovic y Willborn (2001), quienes sostienen que sin el análisis sistemático de causas raíz y la verificación documentada de la eficacia de las acciones correctivas, las mejoras logradas en las dimensiones de planificación de riesgos (H.1) y competencia del personal (H.2) tenderían a erosionarse en los ciclos PDCA subsiguientes, a medida que se pierda el efecto inicial de la intervención y resurjan las causas estructurales no tratadas.

La tendencia decreciente progresiva intraperiodo del postest (333,3 → 266,7 → 66,7 → 0,0 desviaciones/1 000 viajes en las semanas 5 a 8) es más consistente con un efecto de aprendizaje organizacional que con un cambio abrupto por factores externos, lo que mitiga parcialmente la limitación del diseño sin grupo de control.

La reducción del 70,6 % supera el rango de 25 %–60 % reportado por Cződörová y Gnap (2023) en empresas de transporte eslovacas en el primer año. Esto podría deberse a que la línea base de la empresa presentaba un nivel de desviaciones especialmente elevado (FDC P/T = 566,7/1 000 viajes), lo que amplifica la reducción relativa inicial.

VI.2. Contrastación con estudios previos

Munkejord et al. (2016) demostraron que variaciones en la temperatura y presión iniciales del CO_2 tienen efectos significativos sobre el comportamiento del fluido durante el tránsito. La presente investigación complementa ese hallazgo al mostrar que la capacitación en termodinámica criogénica del CO_2 (cláusulas 7.2-7.3) se asoció con una mejora en el manejo preoperacional de los parámetros de presión, reduciendo las desviaciones de baja presión en un 75,0 %. Knoope (2015) proyectó reducciones de costos operacionales del 18 % al 35 % con

sistemas de gestión de calidad en flotas de CO_2; la presente investigación aporta evidencia empírica en el contexto latinoamericano de que esas proyecciones son alcanzables incluso en flotas pequeñas.

VI.3. Implicancias prácticas y teóricas

Desde la perspectiva práctica, los resultados evidencian que un SGC ISO 9001:2015 con énfasis en gestión de riesgos operacionales es implementable de manera eficaz incluso en flotas pequeñas —como la de tres tractos del presente estudio— con recursos humanos y técnicos limitados, siempre que las acciones del sistema estén orientadas explícitamente hacia los riesgos termodinámicos específicos del CO_2. La matriz RE-SIG-001 y el formato FOR-OPE-001 constituyen instrumentos adaptables por otras empresas del sector logístico peruano de gases industriales.

Desde la perspectiva teórica, el estudio propone un modelo integrador que articula, por primera vez en el contexto latinoamericano, tres pilares hasta ahora tratados de manera independiente en la literatura: la cláusula 6.1 de la ISO 9001:2015 como marco de gestión de riesgos, los fundamentos termodinámicos del CO_2 criogénico y el control estadístico de procesos mediante el indicador FDC P/T. Esta articulación es extensible a otros fluidos criogénicos (N_2 líquido, GNL) y puede orientar futuras investigaciones en gestión de riesgos operacionales para la cadena CCUS en América Latina.

VI.4. Líneas de Investigación Futura

Entre las líneas de investigación futura se identifican: estudios cuasiexperimentales con grupo de control para replicar en empresas logísticas con flotas comparables; seguimiento longitudinal extendiendo el postest a seis meses o un año con mediciones mensuales; e incorporación de sensores IoT mediante registradores de temperatura durante el tránsito.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1. CONCLUSIONES

Conclusión General: Se implementó el SGC ISO 9001:2015 con énfasis en gestión de riesgos operacionales asociándose con una reducción observada del FDC P/T integrado del 70,6 % (de 566,7 a 166,7 desviaciones/1 000 viajes) entre marzo y abril de 2026. La prueba de McNemar exacta evidenció una diferencia estadísticamente significativa (OR = 7,0; IC 95 %: 2,5–20,0; $p < 0,001$), consistente con la hipótesis general en el contexto del diseño preexperimental adoptado.

Conclusión OE1: La cláusula 6.1, operacionalizada mediante la elaboración y aplicación de la matriz RE-SIG-001 con 18 amenazas operacionales identificadas y evaluadas mediante la metodología probabilidad × impacto de ISO 31000:2018, se asoció con una reducción del 66,7 % en las desviaciones de presión (SP+BP): de 500,0 a 166,7 desviaciones por cada 1 000 viajes ($p < 0,001$; OR = 7,7; IC 95 %: 2,3–25,5). Este resultado es consistente con la hipótesis de que la identificación formal y el tratamiento sistemático de los riesgos termodinámicos del CO_2 actúan sobre las causas asignables de las desviaciones de presión.

Conclusión OE2: Las cláusulas 7.2 y 7.3, implementadas mediante un programa de cuatro sesiones de capacitación técnica en termodinámica criogénica del CO_2 y manipulación segura de válvulas, con verificación de desempeño mediante observación directa en campo, se asociaron con una reducción del 75,0 % en las desviaciones de baja presión ($p = 0,035$; OR = 7,0; IC 95 %: 1,0–48,9). Si bien el resultado es estadísticamente significativo, el intervalo de confianza amplio —derivado del reducido número de pares discordantes ($b+c = 8$)— exige cautela al interpretar la magnitud del efecto, que deberá confirmarse en estudios con mayor volumen de observaciones de este tipo de desviación.

Conclusión OE3: Las cláusulas 9.1 y 10.3, implementadas mediante el seguimiento semanal del indicador FDC P/T y la apertura y cierre formal de cinco no conformidades con

análisis de causas raíz (método de los cinco porqués) y verificación documentada de eficacia, se asociaron con la eliminación de 10 de 11 casos de recurrencia (90,9 %; p = 0,001; OR corregido = 21,0). Este resultado constituye la evidencia más robusta del impacto sistémico del SGC: el tratamiento documentado de no conformidades transformó los eventos de desviación en oportunidades de mejora que impidieron su repetición sobre los mismos equipos y causas raíz.

Nota. Las conclusiones se fundamentan en los resultados del período postest de un mes (abril 2026, n = 60 viajes) y reflejan la eficacia inicial del SGC en su primera fase de madurez. Su consolidación requiere múltiples ciclos PDCA adicionales conforme a la ISO 9001:2015.

VII.2. RECOMENDACIONES

Recomendación General: Avanzar hacia la certificación ISO 9001:2015 formal, planificando al menos tres ciclos PDCA adicionales de seis meses con ICC ≥ 85 % en todas las dimensiones. Integrar progresivamente la norma ISO 45001:2018 para maximizar la sinergia entre calidad y seguridad laboral.

Recomendación OE1: Actualizar la matriz de riesgos RE-SIG-001 con periodicidad semestral, incorporando progresivamente los riesgos termodinámicos emergentes identificados: variación de presión atmosférica en rutas andinas superiores a los 3 000 m.s.n.m., formación de tapones de hielo seco en períodos de alta humedad costera (diciembre-marzo) y corrosión de válvulas PRV en ambientes salinos.

Recomendación OE2: Institucionalizar la capacitación técnica en criogenia de CO_2 como requisito permanente del perfil de puesto del conductor, con cuatro módulos anuales y umbral mínimo de aprobación del 85 % en evaluaciones prácticas semestrales.

Adicionalmente, se recomienda cuantificar el posible efecto Hawthorne en futuros ciclos de medición mediante la introducción de un período de observación sin

retroalimentación inmediata al conductor, o mediante la comparación con un grupo de control (si las condiciones operacionales lo permiten).

Recomendación OE3: Se recomienda complementar el indicador FDC P/T con un tablero de control ampliado que incorpore tres métricas adicionales: la tasa de boil-off por unidad de flota (TBO), calculada a partir del diferencial de presión inicio–arribo registrado en el FOR-OPE-001; el índice de recurrencia por causa raíz (IRC), con un umbral de alerta de 10 % por ciclo PDCA; y el tiempo medio de resolución de no conformidades (TMRNC), con un estándar de cierre no superior a 15 días hábiles desde la apertura del registro.

VIII. REFERENCIAS

Al Baroudi, H., Awoyomi, A., Patchigolla, K., Jonnalagadda, K., & Anthony, E. J. (2021). A review of large-scale CO_2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage. *Applied Energy, 285,* 116510. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116510

Alshahrani, M. A., & Husain, K. S. (2024). The effectiveness of the implementation of ISO 9001 on SMEs performance: The case of an emerging economy. *International Journal of Quality & Reliability Management, 41(1)*, 84–106. https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2022-0233

American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7.a ed.). https://doi.org/10.1037/0000165-000

Anscombe, F. J. (1956). On estimating binomial response relations. *Biometrika, 43(3/4)*, 461–464. https://doi.org/10.2307/2332924

Arias, F. G. (2016). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (7.a ed.). Editorial Episteme.

Asian Industrial Gases Association. (2011). *Safe handling of liquid carbon dioxide containers that have lost pressure* (AIGA 074/11). https://asiaiga.org/docs/AIGA%20074_11%20Safe%20handling%20of%20liquid%20carbon%20dioxide%20containers%20that%20have%20lost%20pressure.pdf

Bakhtiar, A., Catur P., A. N. Y., Suliantoro, H., & Pujotomo, D. (2023). The effect of quality management system (ISO 9001) on operational performance of various organizations in Indonesia. *Cogent Business & Management, 10(1)*, 2203304. https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2203304

Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1966). *Experimental and quasi-experimental designs for research.* Rand McNally.

Castillo Gil, R. A. (2020). *Implementación del Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 y su impacto en los indicadores de desempeño logístico de una empresa de transporte terrestre de carga de Lima Metropolitana* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement, 20(1)*, 37–46. https://doi.org/10.1177/001316446002000104

Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3.a ed.). Wiley.

Crawley, F., & Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to best practice* (3.a ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2014-0-01245-5

Cződöróvá, R., & Gnap, J. (2023). Investigation of the effectiveness of the introduction of the quality management system according to the ISO 9001 standard in transport companies: Slovakia case study. *Sustainability, 15(3)*, 2401. https://doi.org/10.3390/su15032401

Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis.* MIT Press.

European Industrial Gases Association. (2020). *Cryogenic vessels – Cryogenic containers that have lost pressure* (EIGA Doc 164/20). https://www.eiga.eu/publications/eiga-documents/doc-16420/

European Industrial Gases Association. (2023). *Prevention of excessive pressure during filling of cryogenic vessels* (EIGA Doc 151/23). https://www.eiga.eu/publications/eiga-documents/doc-15123/

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods, 41(4)*, 1149–1160. https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149

Haldane, J. B. S. (1955). The estimation and significance of the logarithm of a ratio of frequencies. *Annals of Human Genetics, 20(4)*, 309–311. https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1955.tb01386.x

Heras, I., Dick, G. P. M., & Casadesús, M. (2002). ISO 9001 registration's impact on sales and profitability: A longitudinal analysis of performance before and after accreditation. *International Journal of Quality & Reliability Management, 19(6)*, 774–791. https://doi.org/10.1108/02656710210429618

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* McGraw-Hill Education.

International Energy Agency. (2016). *20 years of carbon capture and storage.* IEA Publications. https://doi.org/10.1787/9789264267800-en

International Organization for Standardization. (2015). *Quality management systems – Requirements* (ISO 9001:2015). https://www.iso.org/standard/62085.html

International Organization for Standardization. (2016). *Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Pipeline transportation systems* (ISO 27913:2016). https://www.iso.org/standard/61955.html

International Organization for Standardization. (2018a). *Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Lifecycle risk management for integrated CCS projects* (ISO/TR 27918:2018). https://www.iso.org/standard/67694.html

International Organization for Standardization. (2018b). *Risk management – Guidelines* (ISO 31000:2018). https://www.iso.org/standard/65694.html

Juran, J. M. (1988). *Juran on planning for quality.* The Free Press.

Karapetrovic, S., & Willborn, W. (2001). Audit and self-assessment in quality management: Comparison and compatibility. *Managerial Auditing Journal, 16(6)*, 366–381. https://doi.org/10.1108/02686900110395666

Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit.* Houghton Mifflin.

Knoope, M. M. J. (2015). *Costs, safety and uncertainties of CO_2 infrastructure development* [Tesis doctoral, Utrecht University]. Utrecht University Repository.

Linde. (2023). *Safety data sheet: Carbon dioxide refrigerated liquid* (Rev. 2023). Linde plc. https://www.linde.com/gases/safety-data-sheets

Linde. (2024). *Informe de sostenibilidad: Operaciones logísticas criogénicas en América Latina del Sur.* Linde plc.

Linde Gas Perú S.A. (2020). *Hoja de datos de seguridad: Dióxido de carbono líquido refrigerado* (P-4573 rev.). https://assets.linde.com/-/media/global/south-latam/peru/documents/hojas-de-datos-de-seguridad/hds-co2-liquido-p-4573-rev-en.pdf

López-Núñez, J. (2021). *Procedimiento técnico para el control del transporte de gases criogénicos: aplicación de la gestión de riesgos en entornos logísticos* [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional.

Mannan, S. (Ed.). (2012). *Lees' loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control* (4.a ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2009-0-16232-0

Mendoza Cárdenas, J. L. (2022). *Propuesta de mejora del sistema de gestión de seguridad operacional para el transporte de GLP en cisternas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM.

Milieu Ltd. (2016). *Study on the regulatory framework applicable to CO_2 transport by road and rail in the EU.* European Commission.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos* (Decreto Supremo N.° 021-2008-MTC). Diario Oficial El Peruano. https://www.sutran.gob.pe/wp-

content/uploads/2020/06/Reglamento-Nacional-de-Transporte-Terrestre-de-Materiales-y-Residuos-Peligrosos.pdf

Moubray, J. (2001). *Reliability-centred maintenance* (2.a ed.). Butterworth-Heinemann.

Munkejord, S. T., Hammer, M., & Løvseth, S. W. (2016). CO_2 transport: Data and models – A review. *Applied Energy, 169,* 499–523. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.100

National Institute of Standards and Technology. (2023). *NIST Chemistry WebBook, SRD 69: Thermophysical properties of fluid systems — Carbon dioxide.* U.S. Department of Commerce. https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C124389&Action=Page

Nguyen, L. D., Kim, M., Do, K. H., & Han, Y. (2025). Boil-off of cryogenic liquid due to sudden loss of vacuum in a double-walled vacuum-insulated tank. *Journal of Mechanical Science and Technology, 39,* 4217–4226. https://doi.org/10.1007/s12206-025-0642-2

Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (5.a ed.). Ediciones de la U.

Núñez Herrera, R. A. (2020). *Gestión de riesgos operacionales en el transporte de carga pesada: caso empresas de Lima Metropolitana* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.

Psomas, E., & Antony, J. (2015). The effectiveness of the ISO 9001 quality management system and its influential critical factors in Greek manufacturing companies. *International Journal of Production Research, 53(7)*, 2089–2099. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.965353

Psomas, E., Fotopoulos, C., & Kafetzopoulos, D. (2011). Core process management practices, quality tools and quality improvement in ISO 9001 certified manufacturing

companies. *Business Process Management Journal, 17(3)*, 437–460. https://doi.org/10.1108/14637151111136360

PtX-Hub. (2024). *Power-to-X infrastructure and CO_2 transport in Latin America: Status and outlook.* Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://ptx-hub.org

Santa Cruz, S. (2023). *El potencial de desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico de CO_2 en el Perú: Una propuesta* [Policy brief]. Ministerio del Ambiente.

Sharafian, A., Blomerus, P., & Mérida, W. (2019). Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential. *Energy Policy, 131,* 332–346. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.066

Shewhart, W. A. (1931). *Economic control of quality of manufactured product.* Van Nostrand.

Tarí, J. J., Molina-Azorín, J. F., & Heras, I. (2012). Benefits of the ISO 9001 and ISO 14001 standards: A literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management, 5(2)*, 297–322. https://doi.org/10.3926/jiem.488

Torres Flores, E. A. (2021). *Evaluación del sistema de aislamiento térmico en cisternas criogénicas para transporte de oxígeno líquido* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.

United Nations Economic Commission for Europe. (2025). *European agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road* (ADR 2025). United Nations.

Ustolin, F., Campari, A., & Taccani, R. (2022). An extensive review of liquid hydrogen in transportation with focus on the maritime sector. *Journal of Marine Science and Engineering, 10(9)*, 1222. https://doi.org/10.3390/jmse10091222

Velarde Huamán, M. E. (2020). *Impacto de la implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 sobre los indicadores de eficiencia operativa en una*

empresa de transporte terrestre de mercancías [Tesis de pregrado, Universidad de Lima]. Repositorio Institucional ULima. https://repositorio.ulima.edu.pe/

Vouzas, F., & Psychogios, A. G. (2007). Assessing managers' awareness of TQM practices: The case of Greek industry. *The TQM Magazine, 19*(1), 62–75. https://doi.org/10.1108/09544780710720844

IX. ANEXOS

Anexo A

Matriz de consistencia metodológica del estudio preexperimental sobre la implementación del SGC ISO 9001:2015 y la reducción del FDC P/T en el transporte criogénico de CO_2 líquido.

N°	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicador	Análisis
H.G.	¿En qué medida la impl. del SGC ISO 9001:2015 reducirá la FDC P/T?	Determinar en qué medida el SGC reduce la FDC P/T	El SGC se asocia con reducción significativa de la FDC P/T	VI: SGC ISO 9001. VD: FDC P/T	FDC P/T = (viajes desv./60)×1000. OR=7,0; p<0,001	McNemar exacta; IC 95%: 2,5–20,0
H.1	¿Cómo influye Cl.6.1 en FDC SP+BP?	Determinar influencia de Cl.6.1 en FDC SP+BP	Cl.6.1 se asocia con reducción sig. de FDC SP+BP	VI: Cl.6.1 (RE-SIG-001). VD: FDC SP+BP	OR=7,7; p<0,001; IC:2,3–25,5	McNemar exacta
H.2	¿Cómo impactan Cl.7.2-7.3 en FDC BP?	Determinar impacto de Cl.7.2-7.3 en FDC BP	Cl.7.2-7.3 se asocian con reducción sig. de FDC BP	VI: Cl.7.2-7.3 (capacitación). VD: FDC BP	OR=7,0; p=0,035; IC:1,0–48,9	McNemar exacta
H.3	¿Cuál es la contribución de	Determinar contribución	Cl.9.1-10.3 se asocian	VI: Cl.9.1-10.3 (FDC	OR=21,0†; p=0,001; 90,9%	McNemar exacta

	Cl.9.1-10.3 en reducción de recurrencia?	de Cl.9.1-10.3 en recurrencia	con reducción sig. de recurrencia	semanal, NC). VD: Recurrencia	recurrencias eliminadas	(n=30 pares); Haldane-Anscombe

Nota. †OR estimado con corrección Haldane-Anscombe por c = 0 en H.3. SGC = Sistema de Gestión de la Calidad. FDC P/T = (viajes con desviación crítica / total viajes) × 1 000. VI = Variable Independiente. VD = Variable Dependiente. ICC = Índice de Cumplimiento por Cláusula. FOR-OPE-001 = Formato Operacional de Registro. RE-SIG-002 = Lista de Verificación SGC (42 ítems). OR = odds ratio. IC = Intervalo de confianza. SP = sobrepresión; BP = baja presión; LNC = llenado no conforme. Elaboración propia (2026).

Anexo B

Formato de Registro de Viajes y Desviaciones Críticas de Presión y Temperatura

Código	FOR-OPE-001	Versión: 01	Vigencia: Abril 2026
Proceso:	Transporte Criogénico de CO_2 Líquido en Camiones Cisterna	**Instrumento:**	Lista de verificación de viaje (respuesta dicotómica)

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
1	PRETEST	02/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
2	PRETEST	03/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.5	Sí	Sí	No	Sí	Sí	23	22.0	No	Reporte a operaciones	No	1
3	PRETEST	04/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona S r Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
4	PRETEST	05/03/2026	C-01	T1	Planta Zona Este Lima	Sí	20.0	Sí	Sí	No	Sí	Sí	24.5	23.0	No	Repor te a operaciones	No	1
5	PRETEST	06/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
6	PRETEST	02/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona S r Lima	Sí	18.5	Sí	Sí	No	No	Sí	24.0	24.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
7	PRETEST	03/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	20.0	Sí	Sí	No	No	Sí	25.0	24.0	Sí	Reporte a operac iones	No	1

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
8	PRETEST	04/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
9	PRETEST	05/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	Sí	Sí	No	No	Sí	24.5	22.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
10	PRETEST	06/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
11	PRETEST	02/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.5	Sí	No	Sí	No	No	6.0	6.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
12	PRETEST	03/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
13	PRETEST	04/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.5	Sí	No	Sí	No	No	5.5	5.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
14	PRETEST	05/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	21.5	Sí	Ninguna	Sí	0
15	PRETEST	06/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	No	19.5	Sí	No	No	Sí	Sí	23.0	19.5	No	Ajuste válvulas	No	1
16	PRETEST	09/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.0	Sí	No	Sí	Sí	No	5.5	5.5	No	Reporte a operaciones	No	1
17	PRETEST	10/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	Sí	Sí	No	No	Sí	22.5	23.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
18	PRETEST	11/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	20.5	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
19	PRETEST	12/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	21.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
20	PRETEST	13/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	20.0	Sí	Sí	No	No	Sí	24.0	24.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
21	PRETEST	09/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
22	PRETEST	10/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
23	PRETEST	11/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	16.0	Sí	No	Sí	No	No	5.3	5.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
24	PRETEST	12/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	No	16.0	Sí	No	No	Sí	Sí	23.0	20.5	No	Ajuste válvulas	No	1
25	PRETEST	13/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.5	Sí	Sí	No	No	Sí	24.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
26	PRETEST	09/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	Sí	Sí	No	No	Sí	23.5	25.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
27	PRETEST	10/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
28	PRETEST	11/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	19.0	Sí	Ninguna	Sí	0
29	PRETEST	12/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	No	19.0	Sí	No	No	Sí	Sí	23.5	19.5	No	Ajuste válvulas	No	1
30	PRETEST	13/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	Sí	Sí	No	No	Sí	25.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
31	PRETEST	16/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
32	PRETEST	17/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	20.0	Sí	Sí	No	Sí	Sí	24.5	22.5	No	Reporte a operaciones	No	1
33	PRETEST	18/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
34	PRETEST	19/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.0	Sí	Sí	No	No	Sí	25.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
35	PRETEST	20/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	15.5	Sí	No	Sí	No	No	5.4	5.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
36	PRETEST	16/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	16.5	Sí	No	Sí	No	No	6.0	5.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
37	PRETEST	17/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
38	PRETEST	18/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
39	PRETEST	19/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	No	19.0	Sí	No	No	Sí	Sí	22.5	20.0	No	Ajuste válvulas	No	1
40	PRETEST	20/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.0	Sí	Sí	No	No	Sí	25.2	23.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
41	PRETEST	16/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.5	Sí	Sí	No	No	Sí	22.5	23.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
42	PRETEST	17/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	21.5	Sí	Ninguna	Sí	0
43	PRETEST	18/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
44	PRETEST	19/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.5	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	21.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
45	PRETEST	20/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	16.0	Sí	Ninguna	Sí	0
46	PRETEST	23/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.5	Sí	Sí	No	Sí	Sí	25.0	23.0	No	Reporte a operaciones	No	1
47	PRETEST	24/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.0	Sí	Sí	No	Sí	Sí	25.0	24.0	No	Reporte a operaciones	No	1
48	PRETEST	25/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.5	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	24.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
49	PRETEST	26/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	19.0	Sí	Ninguna	Sí	0
50	PRETEST	27/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
51	PRETEST	23/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	17.0	Sí	Ninguna	Sí	0
52	PRETEST	24/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	20.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
53	PRETEST	25/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	20.5	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
54	PRETEST	26/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	22.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
55	PRETEST	27/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	15.5	Sí	No	Sí	No	No	5.0	5.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
56	PRETEST	23/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.5	Sí	No	Sí	No	No	6.0	5.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
57	PRETEST	24/03/2026	C-03	T3	Planta–Zona S r Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	19.0	Sí	Ninguna	Sí	0
58	PRETEST	25/03/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
59	PRETEST	26/03/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
60	PRETEST	27/03/2026	C-03	T3	Planta Zona S r Lima	Sí	20.0	Sí	Sí	No	No	Sí	24.5	22.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
61	POSTEST	01/04/2026	C-01	T1	Planta Zona Este Lima	Sí	20.0	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0
62	POSTEST	02/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.0	Sí	Sí	No	Sí	Sí	23.0	23.0	No	Reporte a operaciones	No	1
63	POSTEST	03/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona S r Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
64	POSTEST	04/04/2026	C-01	T1	Planta Zona Este Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	19.0	Sí	Ninguna	Sí	0
65	POSTEST	05/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
66	POSTEST	01/04/2026	C-03	T3	Planta Zona S r Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
67	POSTEST	02/04/2026	C-01	T1	Planta Zona Este Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
68	POSTEST	03/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	Sí	No	Sí	No	No	5.5	5.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
69	POSTEST	04/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.5	Sí	Sí	No	No	Sí	25.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
70	POSTEST	05/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	16.5	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0
71	POSTEST	01/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	19.5	Sí	Ninguna	Sí	0
72	POSTEST	02/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.0	Sí	Sí	No	No	Sí	22.0	22.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
73	POSTEST	03/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
74	POSTEST	04/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	16.0	Sí	Ninguna	Sí	0
75	POSTEST	05/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	20.5	Sí	Sí	No	No	Sí	23.0	23.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
76	POSTEST	08/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
77	POSTEST	09/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0
78	POSTEST	10/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	20.0	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
79	POSTEST	11/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
80	POSTEST	12/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
81	POSTEST	08/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	20.0	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
82	POSTEST	09/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	20.0	No	No	No	No	No	—	21.5	Sí	Ninguna	Sí	0
83	POSTEST	10/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
84	POSTEST	11/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	Sí	Sí	No	Sí	Sí	25.0	24.0	No	Reporte a operaciones	No	1
85	POSTEST	12/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	16.0	Sí	No	Sí	No	No	6.5	5.5	Sí	Reporte a operaciones	No	1
86	POSTEST	08/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.5	Sí	Sí	No	No	Sí	24.5	24.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
87	POSTEST	09/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.5	Sí	Sí	No	No	Sí	24.5	24.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
88	POSTEST	10/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
89	POSTEST	11/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	21.5	Sí	Ninguna	Sí	0
90	POSTEST	12/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	17.0	Sí	Ninguna	Sí	0
91	POSTEST	15/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	16.0	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
92	POSTEST	16/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	20.0	Sí	Ninguna	Sí	0
93	POSTEST	17/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
94	POSTEST	18/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	17.0	Sí	Ninguna	Sí	0
95	POSTEST	19/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
96	POSTEST	15/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	20.0	Sí	Ninguna	Sí	0
97	POSTEST	16/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	21.5	Sí	Ninguna	Sí	0
98	POSTEST	17/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	17.0	Sí	Ninguna	Sí	0
99	POSTEST	18/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	17.5	Sí	Ninguna	Sí	0
100	POSTEST	19/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0
101	POSTEST	15/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
102	POSTEST	16/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	17.0	Sí	Ninguna	Sí	0
103	POSTEST	17/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	19.5	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
104	POSTEST	18/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	20.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
105	POSTEST	19/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	20.0	Sí	Sí	No	No	Sí	22.0	21.0	Sí	Reporte a operaciones	No	1
106	POSTEST	22/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
107	POSTEST	23/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	18.0	Sí	Ninguna	Sí	0
108	POSTEST	24/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.0	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0
109	POSTEST	25/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.5	No	No	No	No	No	—	19.0	Sí	Ninguna	Sí	0
110	POSTEST	26/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	20.0	Sí	Ninguna	Sí	0
111	POSTEST	22/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
112	POSTEST	23/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
113	POSTEST	24/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	16.0	Sí	Ninguna	Sí	0
114	POSTEST	25/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	20.0	Sí	Ninguna	Sí	0
115	POSTEST	26/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0

N°	Fase	Fecha	Conductor	Tracto	Ruta	Verif. preop.	P. inicio (bar)	¿Desv.?	SP	BP	LNC	PRV	P. desv. (bar)	P. arribo (bar)	Retorno vapor	Acción	Viaje OK	FDC
116	POSTEST	22/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	20.5	No	No	No	No	No	—	16.5	Sí	Ninguna	Sí	0
117	POSTEST	23/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	19.0	No	No	No	No	No	—	18.5	Sí	Ninguna	Sí	0
118	POSTEST	24/04/2026	C-01	T1	Planta–Zona Este Lima	Sí	18.0	No	No	No	No	No	—	16.0	Sí	Ninguna	Sí	0
119	POSTEST	25/04/2026	C-02	T2	Planta–Huaral	Sí	18.5	No	No	No	No	No	—	21.0	Sí	Ninguna	Sí	0
120	POSTEST	26/04/2026	C-03	T3	Planta–Zona Sur Lima	Sí	17.5	No	No	No	No	No	—	20.5	Sí	Ninguna	Sí	0

Nota. Cada fila = un viaje completo desde el acople de la cisterna hasta el retorno a base. SP = Sobrepresión (presión ≥ 105 % MAWP al arribo); BP = Baja presión (condición low-pressure al arribo); LNC = Llenado no conforme. FDC_FLAG: 1 = al menos una desviación crítica; 0 = viaje conforme. Acción: A = Ajuste válvulas; R = Reporte a operaciones; N = Ninguna; O = Otro. FASE PRETEST (S1–S4, marzo 2026): datos construidos mediante análisis documental retrospectivo de fuentes preexistentes (hojas de ruta, reportes de incidencias y comunicaciones WhatsApp) y sistematizados bajo los criterios técnicos SP/BP/LNC; confiabilidad verificada mediante Kappa de Cohen ($\kappa = 0{,}84$). FASE POSTEST (S5–S8, abril 2026): datos recolectados prospectivamente mediante FOR-OPE-001 completado por el conductor al término de cada viaje y verificado por el responsable del SGC. Elaboración propia.

Anexo C

Lista de Verificación de Implementación del Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015 (RE-SIG-002)

N°	DIM.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
DIMENSIÓN 1: Planificación de riesgos — Cláusula 6.1 (10 ítems)						
1	**D1 Cl.6.1**	La organización ha identificado formalmente los factores internos y externos del contexto (antigüedad de flota, DS 021-2008-MTC, condiciones de ruta) que afectan al transporte criogénico de CO_2.	Cl. 4.1 / 6.1	Análisis de contexto documentado (FODA o equivalente) con factores específicos CO_2 criogénico.	**NC**	**C**
2	**D1 Cl.6.1**	Se han determinado las partes interesadas pertinentes y sus requisitos relevantes para el SGC.	Cl. 4.2 / 6.1	Registro de partes interesadas (cliente, SUTRAN, conductores) con requisitos identificados.	**NC**	**C**
3	**D1 Cl.6.1**	Existe la matriz RE-SIG-001 con 18 riesgos evaluados con metodología P×I conforme a ISO 31000:2018.	Cl. 6.1.1	RE-SIG-001 con 18 riesgos y puntuaciones P×I documentadas.	**NC**	**C**
4	**D1 Cl.6.1**	Cada riesgo tiene asignado plan de acción con responsable, plazo y criterio de cierre verificable.	Cl. 6.1.2	Planes de acción en RE-SIG-001 con campos responsable, plazo y estado completos.	**NC**	**C**

N°	DIM.	CÓD.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
5	**D1 Cl.6.1**	**D1-05**	Los riesgos técnicos (perlita-vacío, PRV, manómetro) están explícitamente en la matriz.	Cl. 6.1.1	Presentes en RE-SIG-001 con evaluación P×I.	**NC**	**C**
6	**D1 Cl.6.1**	**D1-06**	Los riesgos de llenado (ausencia retorno vapor, sobrepresión diferencial) están en la matriz con referencia a EIGA Doc 151/23.	Cl. 6.1.1 / 8.1	Con fuente EIGA Doc 151/23 citada.	**NC**	**C**
7	**D1 Cl.6.1**	**D1-07**	Los riesgos de baja presión (low-pressure, punto triple CO_2 5,18 bar/−56,6 °C) están con referencia a AIGA 074/11.	Cl. 6.1.1	Con referencia AIGA 074/11.	**NC**	**C**
8	**D1 Cl.6.1**	**D1-08**	Se han planificado acciones para aprovechar oportunidades (certificación ISO 9001, clientes CCUS).	Cl. 6.1.2	Oportunidades documentadas con plan de aprovechamiento.	**C**	**C**
9	**D1 Cl.6.1**	**D1-09**	La RE-SIG-001 cuenta con aprobación documentada de la Jefatura SIG antes del inicio del postest.	Cl. 5.3 / 6.1	Con fecha 01/04/2026.	**C**	**C**
10	**D1 Cl.6.1**	**D1-10**	Se ha establecido periodicidad de revisión de RE-SIG-001 (mínimo semestral) con responsable definido.	Cl. 9.3 / 6.1	Cláusula de revisión semestral con próxima fecha (oct-2026).	**NC**	**NC**
DIMENSIÓN 2: Competencia y toma de							

N°	DIM.	CÓD.	ÍT M DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
conciencia — Cláusulas 7.2 y 7.3 (12 ítems)							
11	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-01**	Se han de erminado las competencias técnicas necesarias para el conductor más allá de la certificación MATPEL.	Cl. 7.2a	Perfil de puesto con competencias: termodinámica CO_2, low-pressure recovery, manipulación válvulas.	**NC**	**C**
12	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-02**	Los tres conductores poseen certificación MATPEL vigente conforme al DS 021-2008-MTC.	Cl. 7.2b / 8.2.2	Fotocopias de certificados MATPEL vigentes en expediente.	**C**	**C**
13	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-03**	Se ejecutó módulo de capacitación: termodinámica CO_2 (punto triple, curva de saturación, lectura manómetro).	Cl. 7.2c	Registro asistencia S5 con contenido 'Termodinámica CO_2' y firma conductores.	**NC**	**C**
14	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-04**	Se ejecutó módulo de capacitación sobre sobrepresion (SP): causas, umbral 105% MAWP, activación PRV.	Cl. 7.2c	Registro asistencia S6 con contenido 'Sobrepresion y PRV'.	**NC**	**C**
15	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-05**	Se ejecutó módulo sobre baja presión (BP): hielo seco, procedimiento low-pressure recovery AIGA 074/11.	Cl. 7.2c	Registro asistencia S7 con contenido 'Low-pressure recovery'.	**NC**	**C**
16	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-06**	Se ejecutó módulo sobre procedimiento de llenado: manguera dual, criterios LNC, checklist.	Cl. 7.2c	Registro asistencia S8 con contenido 'Procedimiento de llenado'.	**NC**	**C**

N°	DIM.	CÓD.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
17	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-07**	Se verificó en campo la competencia del conductor en manipulación de válvulas criogénicas.	Cl. 7.2d	Registro de observación en campo firmado por supervisor.	**NC**	**NC**
18	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-08**	Se verificó la comprensión de umbrales operativos (P 15–22 bar; no despachar si P <14 bar).	Cl. 7.3	Evaluación práctica con umbrales de acción y respuestas correctas documentadas.	**NC**	**C**
19	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-09**	El personal demuestra toma de conciencia sobre consecuencias para calidad CO_2 E290/ISBT (pureza ≥99,9%).	Cl. 7.3	Registro evaluación con pregunta sobre impacto en calidad del producto.	**NC**	**C**
20	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-10**	El personal comprende riesgo asfixia por CO_2 >5 000 ppm (ACGIH) y >10% v/v (pérdida conocimiento).	Cl. 7.3	Registro evaluación con límites de exposición y respuesta correcta.	**C**	**C**
21	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-11**	La organización conserva registros de asistencia, evaluaciones y observaciones como evidencia de competencia.	Cl. 7.2e	Expedientes de capacitación con asistencia + evaluación + observación campo por conductor.	**NC**	**NC**
22	**D2 Cl.7.2–7.3**	**D2-12**	Se ha definido un plan anual de capacitación con cuatro módulos y umbral mínimo de aprobación del 85%.	Cl. 7.2 / 6.2	Plan anual con fechas, contenidos y criterio de aprobación documentado.	**NC**	**NC**
DIMENSIÓN 3: Seguimiento y medición — Cláusula 9.1 (11 ítems)							

N°	DIM.	CÓD.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
23	**D3 Cl.9.1**	**D3-01**	Se ha definido el indicador FDC P/T como KPI principal con ficha técnica (fórmula, frecuencia, responsable).	Cl. 9.1.1	Ficha técnica FDC P/T: (viajes desv./total)×1 000; revisión semanal; responsable JSIG.	**NC**	**C**
24	**D3 Cl.9.1**	**D3-02**	El FOR-OPE-001 está estandarizado, distribuido a los tres conductores y completo para los 60 viajes del postest.	Cl. 9.1.1 / 7.5	FOR-OPE-001 completos para 60 viajes postest.	**NC**	**C**
25	**D3 Cl.9.1**	**D3-03**	Se realizó revisión semanal del FDC P/T con el supervisor (semanas S5–S8).	Cl. 9.1.1	reuniones semanales con FDC P/T calculado y tendencia.	**NC**	**C**
26	**D3 Cl.9.1**	**D3-04**	Las desviaciones se clasifican por tipo (SP, BP, LNC) permitiendo cálculo de subindicadores FDC P y FDC LNC.	Cl. 9.1.1	Columnas SP, BP, LNC en FOR-OPE-001; Subindicadores.	**NC**	**C**
27	**D3 Cl.9.1**	**D3-05**	La tasa de boil-off (TBO) puede inferirse desde datos de presión inicio vs. arribo en FOR-OPE-001.	Cl. 9.1.1	Diferencial P_inicio–P_arribo calculado por tracto.	**NC**	**C**
28	**D3 Cl.9.1**	**D3-06**	Los resultados del FDC P/T se usan para evaluar eficacia de acciones de la cláusula 6.1 (RE-SIG-001).	Cl. 9.1.3	Informe FDC P/T con comparación pretest–postest.	**NC**	**C**
29	**D3 Cl.9.1**	**D3-07**	Se realizó auditoría interna del SGC durante el período de intervención (mínimo 1 en abril 2026).	Cl. 9.2	Informe de auditoría interna con hallazgos y acciones propuestas.	**NC**	**C**

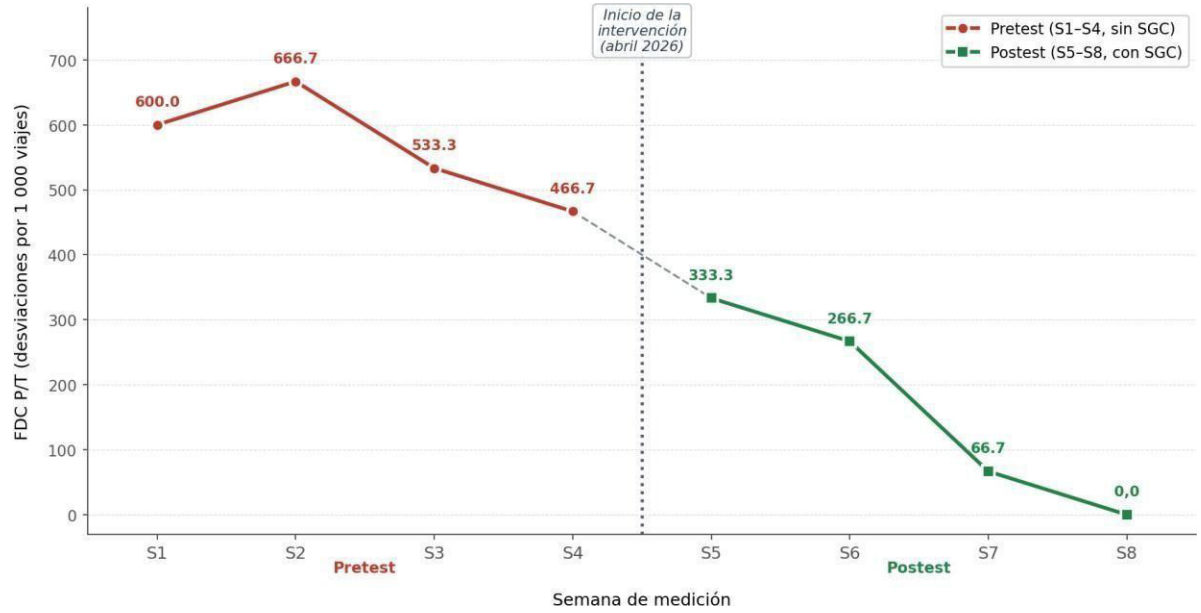
N°	DIM.	CÓD.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
30	**D3 Cl.9.1**	**D3-08**	La revisión por la dirección contempla análisis del FDC P/T y conclusiones de la auditoría interna.	Cl. 9.3	Acta de revisión por la dirección con KPIs y decisiones documentadas.	**NC**	**NC**
31	**D3 Cl.9.1**	**D3-09**	La confiabilidad del FOR-OPE-001 fue evaluada mediante el coeficiente Kappa de Cohen.	Cl. 7.1.5 / 9.1	Cálculo Kappa de Cohen sobre muestra con dos observadores independientes.	**NC**	**C**
32	**D3 Cl.9.1**	**D3-10**	Los datos del postest son prospecivos y trazables a cada viaje (ID_VIAJE, fecha, conductor, tracto).	Cl. 7.5 / 9.1	FOR-OPE-001 con , fecha, conductor.	**C**	**C**
33	**D3 Cl.9.1**	**D3-11**	Se han definido criterios de exclusión del FDC P/T (FOR-OPE-001 incompleto, viaje sin carga) consistentemente.	Cl. 9.1.1	Procedimiento documentado de con registros justificados.	**NC**	**NC**
DIMENSIÓN 4: Mejora continua — Cláusulas 10.2 y 10.3 (9 ítems)							
34	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-01**	Se abrieron y cerraron al menos 2 no conformidades formales con análisis 5 porqués en abril 2026.	Cl. 10.2	2 registros NC con campo ‘5 porqués’ completado y causa raíz identificada.	**NC**	**C**
35	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-02**	Cada NC resuelta tiene verificación de eficacia documentada (no recurrencia en período siguiente).	Cl. 10.2.3	Campo ‘verificación eficacia’ en registro NC con evidencia de no recurrencia.	**NC**	**C**

N°	DIM.	CÓD.	ÍTEM DE VERIFICACIÓN (requisito ISO 9001:2015)	CLÁUSULA	EVIDENCIA OBJETIVA REQUERIDA	INICIO (mar-2026)	FIN (abr-2026)
36	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-03**	El índice de recurrencia (IRC) es inferior al 10% en el postest.	Cl. 10.2 / 9.1	Cálculo IRC postest con valor <10% en informe de seguimiento.	**NC**	**C**
37	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-04**	Las acciones correctivas generaron actualización de procedimientos o FOR-OPE-001 cuando aplica.	Cl. 10.2.2	Procedimientos o FOR-OPE-001 actualizado con referencia a la NC origen.	**NC**	**C**
38	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-05**	Los resultados de la mejora (reducción FDC P/T) se comunicaron al personal operativo.	Cl. 7.4 / 10.3	Registro de comunicación a conductores con resultados FDC P/T postest.	**NC**	**C**
39	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-06**	Se identificaron oportunidades de mejora futura (IoT, certificación ISO 9001, otros fluidos).	Cl. 10.3	Registro de oportunidades en acta revisión por la dirección o informe de cierre.	**NC**	**C**
40	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-07**	El SGC fue revisado frente al ciclo PDCA completo: Planificar–Hacer–Verificar–Actuar.	Cl. 10.3	Informe de cierre PDCA con cuatro fases documentadas y resultados.	**NC**	**NC**
41	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-08**	Se planificó la certificación ISO 9001:2015	Cl. 10.3	Plan de certificación con cronograma establecido.	**NC**	**NC**
42	**D4 Cl.10.2–10.3**	**D4-09**	El RE-SIG-002 fue completado en dos momentos y el ICC fue utilizado para calcular los resultados de la investigación.	Cl. 9.1 / 10.2	RE-SIG-002 completado.	**C**	**C**

Nota. C = Cumple; NC = No Cumple. ICD = Índice de Cumplimiento por Dimensión = (ítems C / total ítems de la dimensión) × 100. ICC = Índice de Cumplimiento Compuesto = promedio aritmético de los cuatro ICD (ISO, 2015; Alshahrani y Husain, 2024). Las mediciones corresponden al inicio (marzo 2026, pretest) y fin (abril 2026, postest) del período de intervención del SGC. ICC inicio = 14 % (6/42 ítems C); ICC fin = 81 % (34/42 ítems C). Fuentes: ISO 9001 (2015), cláusulas 6.1, 7.2, 7.3, 9.1, 10.2 y 10.3; Alshahrani y Husain (2024); Tarí et al. (2012). Elaboración propia.

Anexo D

Gráfico de tendencia semanal del indicador FDC P/T antes (S1–S4) y después (S5–S8) de la implementación del SGC ISO 9001:2015.



Nota. La línea vertical punteada indica el inicio de la intervención (abril 2026). FDC P/T = (viajes con desviación crítica / total viajes de la semana) × 1 000. Semanas S1 a S4: pretest (marzo 2026, sin SGC). Semanas S5 a S8: postest (abril 2026, con SGC implementado). Datos tomados de las Tablas 8 y 10. Elaboración propia.

Anexo E

Matriz de Identificación y Evaluación de Riesgos Operacionales (RE-SIG-001): 18 riesgos identificados según nivel de riesgo inherente y residual. Transporte Criogénico de CO_2 Líquido en Camiones Cisterna.

N°	Proceso	¿Cuál es el riesgo?	¿Por qué ocurre?	¿Qué puede pasar?	Tipo desv.	Cláusula ISO	Nivel de riesgo sin controles				Nivel de riesgo con controles				¿Qué hacemos para controlarlo?	Responsable
							P	I	R	Nivel	P	I	R	Nivel		
Dimensión 1. Riesgos relacionados al equipo y las condiciones de ruta (Riesgos 1 al 8)																
1	Transporte en ruta	El aislamiento térmico puede deteriorarse con el tiempo según antigüedad y condiciones de uso	El aislamiento pierde efectividad; la cisterna gana calor exterior más rápido de lo normal	La presión sube hasta abrir la válvula de seguridad; pérdida de producto entre 8% y 12%	SP	Cl. 6.1	4	3	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Verificar estado visible del aislamiento antes del acople; reportar al cliente toda anomalía; no acoplar si hay deterioro evidente; registrar en FOR-OPE-001	Conductor / Coordinador Operaciones
2	Transporte en ruta	Las PRV de la cisterna (propiedad del cliente) no tienen calibración periódica documentada	Una PRV mal calibrada puede abrirse antes o después de lo que corresponde	Pérdida innecesaria de CO2 o acumulación peligrosa de presión	SP	Cl. 6.1	3	4	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Verificar funcionamiento aparente de las PRV antes del acople; reportar al cliente si se detecta anomalía; no iniciar viaje con PRV defectuosa	Conductor / Coordinador Operaciones
3	Transporte en ruta	La cisterna recibe radiación solar directa durante horas en rutas costeras sin protección	El calor solar acelera el calentamiento del contenido e incrementa la presión interna	Activación de válvula de seguridad en ruta; pérdida de producto; posible incidente en vía pública	SP	Cl. 6.1	3	3	9	ALTO	1	2	2	BAJO	Planificar viajes en horarios de menor irradiancia; usar cobertores reflectantes sobre la cisterna	Coordinador Operaciones
4	Transporte en ruta	En rutas de altura (>3,000 m.s.n.m.) la presión atmosférica exterior baja significativamente	El diferencial interior-exterior aumenta, acelerando el calentamiento del contenido	Desviaciones de presión en tránsito; riesgo de activación de válvula de seguridad en zona andina	SP/BP	Cl. 6.1	3	3	9	ALTO	1	3	3	BAJO	Aplicar procedimiento específico para rutas andinas; verificar presión en puntos de control establecidos	Conductor / Supervisor
5	Transporte en	Carreteras en mal	Vibraciones	Cisterna pierde	SP	Cl. 6.1	4	3	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Registrar rutas	Conductor /

N°	Proceso	¿Cuál es el riesgo?	¿Por qué ocurre?	¿Qué puede pasar?	Tipo desv.	Cláusula ISO	Nivel de riesgo sin controles				Nivel de riesgo con controles				¿Qué hacemos para controlarlo?	Responsable
							P	I	R	Nivel	P	I	R	Nivel		
	ruta	estado generan vibraciones que pueden dañar el aislamiento de la cisterna	producen fracturas en juntas de sellado, acelerando pérdida del vacío de aislamiento	capacidad térmica; mayor frecuencia de activación de válvula de seguridad											con mayor deterioro; inspeccionar visualmente la cisterna al regreso; reportar al cliente signos de daño post-ruta	Coordinador Operaciones
6	Operación de llenado	No existe sistema automático que detenga el llenado al alcanzar la presión máxima de la cisterna	El operador puede continuar llenando sin advertir que la presión superó el límite seguro	Rotura del disco de seguridad; liberación masiva de CO2 en zona de carga; riesgo para el personal	SP	Cl. 6.1 / 8.1	3	4	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Verificar lista de control de seguridad antes de iniciar el llenado (FOR-OPE-001); no iniciar sin completarla	Conductor / Supervisor carga
7	Operación de llenado	Se llena la cisterna sin usar la manguera de retorno de vapor o sin respetar el procedimiento	Sin retorno de vapor, la presión interna sube de forma brusca durante la carga	Activación de válvula de seguridad; llenado no conforme reportado; pérdida de producto	LNC	Cl. 6.1 / 8.1	5	4	20	EXTREMO	2	3	6	MODERADO	Usar siempre la manguera de retorno de vapor; verificar procedimiento en FOR-OPE-001 antes de iniciar	Conductor / Supervisor carga
8	Transporte en ruta	La presión interna cae por debajo de 5.18 bar, punto en que el CO2 comienza a solidificarse	El CO2 forma hielo seco dentro de válvulas y conexiones, bloqueándolas por completo	Válvulas obstruidas; presión sube sin control; riesgo de rotura y asfixia del conductor	BP	Cl. 6.1	4	5	20	EXTREMO	2	3	6	MODERADO	Aplicar procedimiento de recuperación de presión (R-OPE-02/03) si la presión baja al límite; nunca ventilar manualmente	Conductor / Jefe SSOMA-SIG
				Dimensión 2. Riesgos relacionados a la actuación del personal (Riesgos 9 al 13)												
9	Operación de válvulas	El conductor no tiene capacitación específica en el manejo de válvulas criogénicas	Abre o cierra válvulas incorrectamente; corta el retorno de vapor antes de tiempo	Caída de presión o llenado no conforme; riesgo de congelación de conexiones y líneas	BP/LNC	Cl. 7.2	4	3	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Capacitar conductores en 4 sesiones de manejo de válvulas criogénicas; aprobar con mínimo 85% en evaluación práctica	Jefe SSOMA-SIG
10	Transporte en ruta	El conductor no identifica señales	Cuando detecta el problema la	Exposición a CO2 que causa	BP	Cl. 7.2 / 7.3	3	4	12	CRÍTICO	2	3	6	MODERADO	Capacitar en reconocimiento	Jefe SSOMA-SIG

N°	Proceso	¿Cuál es el riesgo?	¿Por qué ocurre?	¿Qué puede pasar?	Tipo desv.	Cláusula ISO	Nivel de riesgo sin controles				Nivel de riesgo con controles				¿Qué hacemos para controlarlo?	Responsable
							P	I	R	Nivel	P	I	R	Nivel		
		de que la presión está cayendo a niveles peligrosos	presión ya bajó demasiado; intenta ventilar manualmente sin procedimiento	pérdida de conocimiento en minutos; riesgo de accidente fatal											de señales de baja presión y protocolo de emergencia; prohibir ventilación manual sin entrenamiento	
11	Verificación preoperacional	El checklist previo al viaje no incluye verificar la presión ni el estado de las válvulas de seguridad	La cisterna sale a ruta con presión fuera del rango correcto sin que nadie lo detecte	Desviaciones en tránsito; el cliente puede rechazar el producto al llegar	SP/BP	Cl. 7.2 / 8.1	3	3	9	ALTO	1	2	2	BAJO	Completar FOR-OPE-001 antes de cada viaje; verificar presión de inicio y estado de válvulas de seguridad	Coordinador Operaciones
12	Competencia del personal	No existe perfil formal que defina conocimientos mínimos para operar cisternas de CO2	Cada conductor actúa según experiencia propia; errores no se detectan ni corrigen sistemáticamente	Mayor frecuencia de incidentes por error humano; problemas recurrentes sin mejora	SP/BP/LNC	Cl. 7.2	3	3	9	ALTO	1	2	2	BAJO	Definir y documentar el perfil de competencias para conductores de CO2; evaluar cumplimiento cada seis meses	Jefe SSOMA-SIG
13	Toma de conciencia	Los conductores conocen procedimientos, pero no comprenden qué puede pasar si no los cumplen	Subestiman los riesgos; reaccionan tarde porque no asocian la señal con la consecuencia	Incidentes graves evitables; exposición a concentraciones de CO2 peligrosas para la salud	BP/SP	Cl. 7.3	4	3	12	CRÍTICO	2	3	6	MODERADO	Sesión de toma de conciencia con casos reales documentados (AIGA 074/11); verificar comprensión mediante evaluación	Jefe SSOMA-SIG
Dimensión 3. Riesgos relacionados a la gestión y organización de la empresa (Riesgos 14 al 18)																
14	Gestión de indicadores	La empresa no registra formalmente la frecuencia de desviaciones de presión por viaje	Sin datos no se pueden detectar tendencias negativas ni unidades con mayor incidencia	Los mismos problemas se repiten sin decisiones basadas en evidencia	SP/BP/LNC	Cl. 9.1	2	3	6	MODERADO	2	3	6	MODERADO	Registrar y revisar semanalmente el indicador FDC P/T; reportar resultados mensualmente a la dirección	Jefe SSOMA-SIG
15	Tratamiento de NC	Cuando ocurre un problema se corrige en el momento pero no	Sin análisis de causa raíz el mismo problema vuelve a ocurrir	Problemas recurrentes que generan costos, riesgos y	SP/BP/LNC	Cl. 10.2 / 10.3	4	3	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Registrar no conformidad por cada incidente;	Jefe SSOMA-SIG

N°	Proceso	¿Cuál es el riesgo?	¿Por qué ocurre?	¿Qué puede pasar?	Tipo desv.	Cláusula ISO	Nivel de riesgo sin controles				Nivel de riesgo con controles				¿Qué hacemos para controlarlo?	Responsable
							P	I	R	Nivel	P	I	R	Nivel		
		se investiga su causa raíz	en los mismos equipos	pérdida de confianza del cliente											aplicar análisis de 5 porqués; verificar no recurrencia en ciclo siguiente	
16	Gestión de riesgos	La empresa no tiene una matriz formal que identifique y priorice los riesgos de la operación	Sin priorización, los recursos de control se asignan sin criterio técnico	Riesgos graves sin controles proporcionales; incidentes en áreas no atendidas	SP/BP/LNC	Cl. 6.1	2	4	8	ALTO	2	3	6	MODERADO	Mantener actualizada la RE-SIG-001 con los 18 riesgos identificados; revisar cada seis meses con el equipo SSOMA-SIG	Jefe SSOMA-SIG
17	Mantenimiento preventivo de la cisterna	No existe comunicación formal entre SCE y el cliente sobre el historial de incidencias por cisterna	El cliente no recibe información sistemática de condiciones detectadas en operación para orientar el mantenimiento	El deterioro avanza sin atención oportuna; mayor frecuencia de desviaciones y paradas no planificadas	SP	Cl. 6.1 / 8.5	3	4	12	CRÍTICO	1	2	2	BAJO	Registrar incidencias por cisterna en FOR-OPE-001; emitir reporte mensual al cliente con historial de condiciones detectadas en operación	Jefe SSOMA-SIG / Coordinador Operaciones
18	Calidad del producto	Cuando la presión cae demasiado el CO2 se evapora y recondensa aumentando su humedad	El CO2 puede superar los límites de humedad del cliente (estándar ISBT grado alimentario)	El cliente rechaza el producto en la descarga; pérdida económica y deterioro comercial	BP	Cl. 6.1 / 8.6	2	3	6	MODERADO	2	3	6	MODERADO	Verificar presión al llegar al cliente; no iniciar descarga si la presión está por debajo de 14 bar	Coordinador Operaciones

Nota. Los riesgos se clasifican según R = P × I (ISO 31000:2018): Extremo (R = 16–25), Crítico (R = 12–15), Alto (R = 8–11), Moderado (R = 5–7), Bajo (R = 1–4). SP = Sobrepresión; BP = Baja presión; LNC = Llenado no conforme. Las cisternas son propiedad del cliente; los controles de SCE se limitan a verificación, reporte y decisión de no operar. Nivel de riesgo sin controles: 2 Extremos, 9 Críticos, 5 Altos, 2 Moderados. Nivel de riesgo con controles: 7 Moderados, 11 Bajos. ISO 9001:2015 Cláusula 6.1. Elaboración propia.

Anexo F

Mapa de calor de la matriz de riesgos operacionales (RE-SIG-001): distribución de 18 riesgos antes (pretest) y después (postest) de la implementación del SGC.



Nota. Los riesgos se clasifican según R = P × I (ISO 31000:2018): Extremo (R = 16–25), Crítico (R = 12–15), Alto (R = 8–11), Moderado (R = 5–7), Bajo (R = 1–4). Escalas: Probabilidad e Impacto de 1 a 5. En el pretest (marzo 2026): 2 riesgos Extremos, 9 Críticos, 5 Altos, 2 Moderados, 0 Bajos. En el postest (abril 2026): 0 riesgos Extremos, 0 Críticos, 0 Altos, 7 Moderados, 11 Bajos. Datos tomados del Anexo C (RE-SIG-001). Elaboración propia.

Anexo G

Unidad de Transporte Terrestre Tipo Cisterna Durante el Proceso de Carga de Dióxido de Carbono (CO2)



Nota. Fotografía tomada en la zona de operaciones durante el desarrollo de las pruebas experimentales de campo. La imagen muestra el tractocamión acoplado al tanque cisterna criogénico aislado térmicamente, Por criterios éticos de confidencialidad industrial y protección de datos de la empresa colaboradora, los elementos de identificación del vehículo (placas y logotipos comerciales) han sido difuminados digitalmente. Elaboración propia

Anexo H

Panel de Control e Instrumentación de Presión (PI-3) de la Unidad Cisterna de (CO_2)



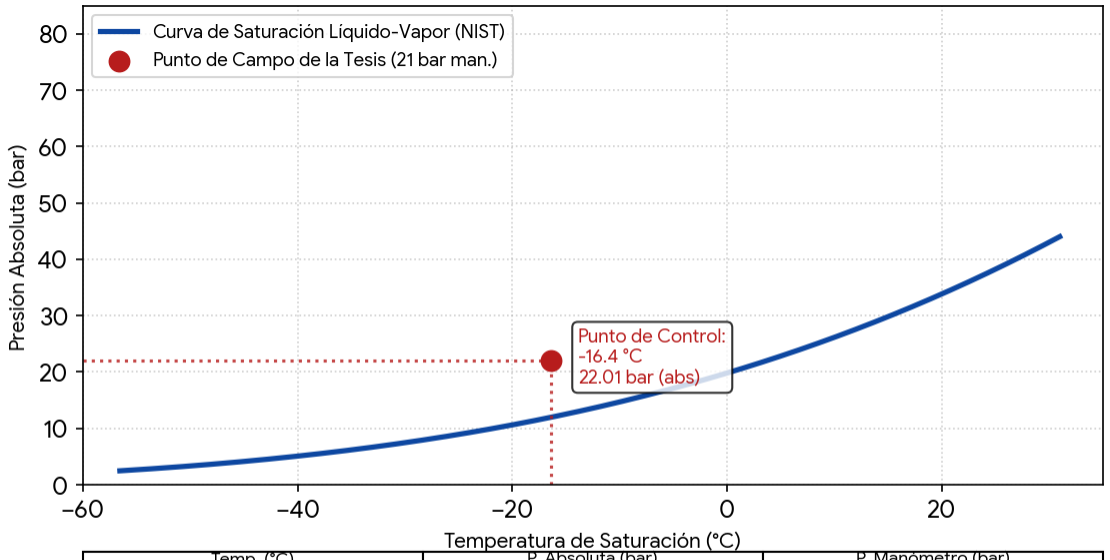
Nota. Registro visual del instrumental de medición de la cisterna durante las fases de ensayo. El instrumento superior principal (etiquetado como PI-3) corresponde a un manómetro industrial que reporta una presión manométrica de 21 bar (2.1 MPa). Elaboración propia

Anexo I

Correlación Termodinámica entre Presión de Saturación y Temperatura para el Dióxido de Carbono (CO_2)

Figura I1

Curva de saturación líquido-vapor y valores discretos del sistema.



Temp. (°C)	P. Absoluta (bar)	P. Manómetro (bar)
-56.6 (P. Triple)	5.18	4.17
-30.0	14.28	13.27
-20.0	19.70	18.69
-16.4 (Cisterna)	22.01	21.00
-10.0	26.49	25.48
0.0	34.85	33.84
20.0	57.29	56.28
31.0 (P. Crítico)	73.75	72.74

Nota. El diagrama consolida la correlación matemática e industrial entre la temperatura de almacenamiento y la presión confinada de la tabla inferior expone los valores discretos de equilibrio calculados mediante la ecuación de estado de Span y Wagner (1996). La fila y el marcador resaltados en rojo evidencian la correspondencia exacta de la lectura de 21 bar del manómetro de campo, demostrando metodológicamente que el fluido se encuentra estabilizado a una temperatura interna de -16.4 °C dentro de la cisterna. Adaptado de Carbon Dioxide Fluid Properties por el National Institute of Standards and Technology (NIST, 2023)

Anexo J

Constancia de Autorización de la organización

SCE
Socorro Cargo Express S.A.
ALTA LOGÍSTICA

Calle San Andrés 6020
Urb. Industrial Mollialla
Los Olivos, Lima.
(01) 528 0929
(51) 914 589 876
contacto@sce-peru.com

CONSTANCIA DE AUTORIZACIÓN

Lima, 05 de junio de 2026

Presente. -

Por medio de la presente, en mi calidad de jefe SSOMA -SIG (SCE), empresa dedicada a los servicios de transporte logístico especializado, hago constar que Yerson Eduardo Guerra López, identificado con DNI N.° 72239200, colaborador de nuestra empresa en el área de Sistema Integrado de Gestión, cuenta con la autorización de la empresa para la toma de datos en nuestras operaciones, en el marco del desarrollo de su tesis en la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). En tal sentido, mediante la presente **AUTORIZAMOS** el desarrollo de la tesis titulada:

> ***"Implementación de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, con énfasis en la gestión de riesgos operacionales, para reducir la frecuencia de desviaciones críticas de presión y temperatura durante el transporte criogénico de CO_2 líquido en camiones cisterna en una empresa de servicios logísticos"***

La investigación enfocada en el marco de los servicios de transporte criogénico de SCE, cuenta con las siguientes condiciones y restricciones:

1. No se proporcionará información respecto a aspectos contables ni financieros de la empresa.
2. No se proporcionará información sobre la cartera de clientes ni volúmenes comerciales.
3. No se proporcionará información respecto a costos operativos ni tarifas.
4. No se proporcionará información de carácter personal sobre el personal de la empresa.
5. Los registros visuales incluidos en la investigación serán utilizados exclusivamente con fines académicos, resguardando en todo momento la confidencialidad de la información de la empresa.

Confiamos en que los resultados obtenidos en el presente trabajo representarán una contribución significativa para la mejora continua de los procesos operativos de la empresa.

Sin otro particular, quedo de usted.
Atentamente,

YUEM [illegible] SARAVIA
JEFE DE SSOMA - SIG
SOCORRO CARGO EXPRESS S.A

Jefe SSOMA - SIG
Socorro Cargo Express S.A.

Escaneado con CamScanner