



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL MEDIANTE
TECNOLOGÍAS EMERGENTES INTEGRANDO WOLFRAM
MATHEMATICA PARA OPTIMIZAR LAS MEDICIONES EN
BUQUES PETROLEROS.

AUTOR

Del Pezo Panchana Johnny Daniel

TRABAJO DE TITULACIÓN EN MODALIDAD DE INFORME
DE INVESTIGACIÓN
Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS

TUTOR

PhD. Villegas Salabarria José

La Libertad, Ecuador

Año 2026



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Roxana Álvarez Acosta
COORDINADORA(E) DEL
PROGRAMA

PhD. Jose Villegas Salabarría
TUTOR

PhD. Marllelis Gutiérrez Hinestroza
DOCENTE ESPECIALISTA

PhD. Jorge Ordoñez Andrade
DOCENTE ESPECIALISTA

Mgtr. Rivera González María
SECRETARIA GENERAL
UPSE



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Del Pezo Panchana Johnny Daniel, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Petróleos.

TUTOR

PhD. Villegas Salabarría José

La Libertad, a los 08 días del mes de julio del año 2026



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Del Pezo Panchana Johnny Daniel

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Implementación de un sistema integral mediante tecnologías emergentes integrando wolfram mathematica para optimizar las mediciones en buques petroleros; previo a la obtención del título en Magíster en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 08 días del mes de julio del año 2026

EL AUTOR

Del Pezo Panchana Johnny Daniel



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL MEDIANTE TECNOLOGÍAS EMERGENTES INTEGRANDO WOLFRAM MATHEMATICA PARA OPTIMIZAR LAS MEDICIONES EN BUQUES PETROLEROS, presentado por el estudiante, Del Pezo Panchana Johnny Daniel fue enviado al Sistema Antiplagio PLAGIARISM CHECKER X, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

PhD. Villegas Salabarría José



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

AUTORIZACIÓN

Yo, **Del Pezo Panchana Johnny Daniel**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 08 días del mes de julio del año 2026

EL AUTOR

Del Pezo Panchana Johnny Daniel

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en cada etapa de este camino. Gracias por darme la sabiduría, la salud y la perseverancia para superar cada desafío y permitirme alcanzar esta importante meta en mi vida.

A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas y los valores que me inculcaron desde niño. Gracias por creer siempre en mí, por sus sacrificios y por ser el ejemplo que me ha motivado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi esposa, por caminar a mi lado durante este proceso. Gracias por tu paciencia, comprensión, apoyo constante y por darme ánimo cuando más lo necesitaba. Tu confianza en mí fue una fuente de inspiración para no rendirme.

A mis hijos, quienes han sido mi mayor motivación para seguir esforzándome cada día. Gracias por regalarme su amor, por comprender el tiempo que muchas veces no pude compartir con ustedes y por darme la fuerza para continuar luchando por este sueño. Este logro también les pertenece.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo, sus consejos y palabras de aliento durante este proceso. Cada aporte fue valioso para hacer posible la culminación de esta etapa tan importante.

Johnny Daniel Del Pezo Panchana

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar mi camino, darme fortaleza en los momentos de dificultad y bendecirme con la oportunidad de alcanzar esta importante meta.

A mis padres, por su amor incondicional, por los valores que sembraron en mi vida y por enseñarme que el esfuerzo, la constancia y la honestidad son el camino para cumplir los sueños. Este logro también es fruto de todo lo que hicieron por mí.

A mi amada esposa, por ser mi compañera de vida, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por creer en mí incluso cuando el camino parecía difícil y por ser mi mayor apoyo para seguir adelante.

A mis queridos hijos, quienes son la razón más grande de mi esfuerzo y superación. Cada paso que doy es pensando en ustedes y en el ejemplo que deseo dejarles. Espero que este logro les demuestre que, con fe, dedicación y perseverancia, cualquier meta es posible.

Finalmente, dedico este trabajo a mi familia, que siempre estuvo presente brindándome ánimo y confianza. Este logro representa el esfuerzo de muchos años y es un reflejo del amor y apoyo que he recibido de quienes más quiero.

Johnny Daniel Del Pezo Panchana

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
Industria petrolera y transporte marítimo de hidrocarburos	5
Importancia del transporte marítimo en la cadena logística petrolera.....	6
Cadena logística de hidrocarburos	9
Operaciones de carga y descarga de hidrocarburos.....	13
Fiscalización y control de transferencias de custodia	16
Buques petroleros y sistemas de almacenamiento.....	19
Clasificación de los buques petroleros	21
Instrumentación para mediciones en buques petroleros.....	25

Calibración y verificación de instrumentos.....	27
Impacto de la calibración en la confiabilidad de las mediciones	30
Gestión metrológica de instrumentos petroleros	32
Tablas de calibración de tanques.....	35
Correcciones volumétricas en hidrocarburos	38
Medición de calados y estabilidad del buque.....	40
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	43
Enfoque de la investigación	43
Tipo de investigación	44
Diseño de la investigación.....	45
Desarrollo metodológico del sistema	46
Fase I. Análisis de requerimientos	47
Fase II. Diseño del sistema.....	48
Fase III. Desarrollo del algoritmo matemático.....	49
Fase IV. Validación del sistema.....	51
Fase V. Implementación y puesta en funcionamiento del sistema.....	54
Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	57
RESULTADOS.....	59
Funcionalidades implementadas	62
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES.....	71

Bibliografía	72
---------------------------	-----------

RESUMEN

La precisión en las mediciones a bordo de los buques petroleros garantiza la eficiencia operativa y determina el éxito en las operaciones de medición y control de los combustibles líquidos derivados del petróleo. La falta de verificación adecuada de los instrumentos de medición y temperatura en los buques está generando discrepancias significativas en las mediciones de volúmenes de combustibles. Este problema no solo afecta la precisión en las operaciones de carga y descarga, sino que también incrementa las pérdidas de producto. El método general aplicado identifica buques que han realizado operaciones de carga y descarga de combustibles en Ecuador, seleccionando aquellos que hayan presentado novedades en las mediciones. Se evaluará la precisión de los instrumentos de medición y temperatura utilizados en los buques, verificando si han sido calibrados adecuadamente. Se tomarán mediciones en diferentes buques durante las operaciones de carga y descarga, utilizando las normas API y comparando los resultados obtenidos con las mediciones oficiales registradas. Se determinará un aumento de discrepancias en los volúmenes medidos en los buques donde no se realizaron verificaciones regulares de los instrumentos, comparado con aquellos que sí se ajustan a las normativas. Los buques sin calibración adecuada de los tanques y termómetros representan mayores variaciones en los volúmenes de carga, resultando en pérdidas acumuladas que alcanzan hasta el 0.6% del total transferido. En conclusión, este estudio demuestra que la inadecuada verificación de los instrumentos de medición y la limitada aplicación de las normas API influyen directamente en las discrepancias de volúmenes en las operaciones de carga y descarga de buques en Ecuador.

Palabras claves: Calibración, Normas API, Cálculos volumétricos.

ABSTRACT

The accuracy of onboard measurements on oil tankers ensures operational efficiency and determines the success of a country's oil industry. The lack of proper verification of measuring and temperature instruments on tankers is generating significant discrepancies in fuel volume measurements. This issue not only affects the accuracy of loading and unloading operations but also increases product losses. Additionally, the ineffective dissemination of API standards hinders the creation of a reliable database to ensure regulatory compliance, thereby impacting the efficiency and transparency of oil operations.

This study aims to determine the impact of the lack of verification of measuring instruments on onboard volume measurements, analyzing how these deficiencies affect measurement accuracy to improve the reliability of processes that ensure compliance and reduce losses in petroleum operations. The accuracy of measuring and temperature instruments used onboard will be evaluated, verifying whether they have been properly calibrated. Measurements will be taken on different tankers during loading and unloading operations, using API standards and comparing the results with officially recorded measurements. The study found an increase in discrepancies in volume measurements on tankers where regular instrument verification was not performed, compared to those that complied with the standards. Vessels without proper calibration of tanks and thermometers showed greater variations in load volumes, resulting in accumulated losses of up to 0.6% of the total transferred. In conclusion, this study demonstrates that inadequate verification of measuring instruments and the limited application of API standards directly influence volume discrepancies during loading and unloading operations on tankers in Ecuador.

Keywords: Calibration, API Standards, Volumetric Calculations.

INTRODUCCIÓN

Ecuador a lo largo de su historia se ha considerado un país petrolero, la capacidad de procesamiento de crudo de cada una de las Refinerías está dividida en: Esmeraldas 110 mil barriles, La Libertad con 45 mil barriles y Shushufindi con 20 mil barriles y las tres plantas producen combustibles como gasolinas, diésel, jet fuel, GLP, entre otros, sin embargo el no hacer énfasis en los mantenimientos preventivos de estas instalaciones, han llevado a que las refinerías se vean mermadas en el proceso de refinación de petróleo, lo cual implica una disminución en la producción de los diferentes combustibles que consumimos en el país, como Gasolinas, Diesel Premium, Diesel Oil 2, Jet y Fuel, solo en el año 2023.

Ecuador importó 66.081.998 BBLS comparado con el 2022 que fue 60.787.373 bbls un incremento del 8.71%. Por tal motivo el país se ha visto en la necesidad de importar estos productos a lo largo de su historia. El estado ecuatoriano en su afán de llevar un control estricto sobre estos productos, acreditó a varias empresas para que junto al personal de EP Petroecuador puedan fiscalizar los buques que arriben al país.

El proceso de fiscalización de un buque empieza apenas este es fondeado por el Práctico de turno en el Puerto de Esmeraldas o La Libertad, una vez que las autoridades de cada Puerto reciben al buque, le dan una Libre Platica para Operaciones, la cual permite a los inspectores marítimos de EP Petroecuador, inspectores Independientes e inspectores Loss Control abordar el buque para poder tomar las muestras del producto y posteriormente llevarlas al laboratorio de Refinería para poder analizarlo y verificar que cada uno de sus parámetros está dentro de especificaciones.

El departamento de Gestión Logística y Marítimas de EP Petroecuador se encarga de programar las diferentes descargas que va a realizar en cada puerto cada buque de que arriba al país. Una vez que se recibe este programa se procede con los operativos de

abarloamientos de un buque internacional con uno de cabotaje, (Suinli 2020). Finalizado este proceso, los estos productos a lo largo de su historia. El estado ecuatoriano en su afán de llevar un control estricto sobre estos productos, acreditó a varias empresas para que junto al personal de EP Petroecuador puedan fiscalizar los buques que arriben al país.

La temperatura tiene el efecto más significativo en la determinación precisa de cantidades de líquido cuando se corrige a las condiciones atmosféricas estándar, adicional se verifica si el producto tiene agua libre en sus tanques. Este proceso se repite en cada uno de los tanques del buque, generalmente son 12 tanques, ubicados 6 por el lado de babor y 6 por el lado de estribor, se verifican los tanques de Slops que generalmente están vacíos y tanques residuales.

Luego se procede con el cálculo de volúmenes a bordo, para determinar la cantidad con la que arriba el buque y también se calcula el factor de experiencia (VEF), que es un valor estadístico que se obtiene cuando se realizan comparaciones entre las cantidades brutas de cargas reflejadas en el BL (supuestos reales) y las medidas a bordo utilizando las tablas de calibración de tanques confeccionadas por los constructores del buque, obteniéndose una relación de carga aproximadamente constante. Por lo tanto, es una recopilación histórica de las mediciones del buque respecto al TCV, ajustados por ROB y/o OBQ,

comparados con las mediciones del TCV de tierra, debiendo ser calculado indiferentemente para operaciones de carga y descarga.

La información y modelos usados para el cálculo del VEF, es preferible que se basen en documentos que sigan las normas y prácticas aceptadas por la industria, tales como los informes de las compañías de inspección, el Mooring Master una vez que ha finalizado la reunión de seguridad también llamada Key Meeting la cual indica que todas las partes serán informadas de los procedimientos de seguridad locales, los procedimientos de seguridad de los buques, los EPP requeridos y los peligros asociados a la carga, con el Primer Oficial da inicio a la transferencia del producto hacia el buque pequeño.

Generalmente se despachan 50.000 BBLs, con una rata de 12.500 BPH a una presión de 4.5 Bares. Este operativo demora un aproximado de cuatro horas, una vez finalizada la descarga se verifica la cantidad despachada y la cantidad recibida, un factor importante es el VEF ya que este nos determina el comportamiento del buque en cuanto a las pérdidas. Una buena fiscalización va a minimizar la diferencia de cantidades descargadas versus las recibidas, este proceso se ve afectado por diversos motivos, el principal es la no verificación de los instrumentos de medición que se emplean, la no calibración de los tanques, los formatos no actualizados de los inspectores, el no verificar las cantidades obtenidas de forma automática con las tablas que el buque posee en físico y el secado de más de 4 tanques en los buques internacionales, afectan de forma directa con el resultado y las mermas en las cargas.

Las mediciones de volúmenes de carga en buques son cruciales para asegurar operaciones eficientes y evitar pérdidas económicas significativas en las industrias que dependen del comercio marítimo. En Ecuador, los puertos de Esmeraldas y La Libertad son centros clave para las operaciones de carga y descarga de combustibles, donde se ha observado que las discrepancias en las mediciones de volúmenes a bordo son recurrentes. Esto no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también genera pérdidas en los productos transportados.

El principal problema identificado es la falta de verificación y calibración regular de los instrumentos de medición y temperatura en los buques, lo que compromete la exactitud de las mediciones de los volúmenes de carga y descarga. A esto se suma una deficiente difusión y aplicación de las normas API, que son estándares internacionales para la medición y manejo de productos en buques. Estas deficiencias en los procesos aumentan las discrepancias en las mediciones, lo que genera pérdidas de producto y reduce la confiabilidad de las operaciones. Se plantea que la implementación de una verificación regular y rigurosa de los instrumentos de medición y temperatura, junto con la adecuada difusión y aplicación de las normas API en los buques, reduciría significativamente las discrepancias en las mediciones de volúmenes a bordo. Esto, a su vez, minimizaría las pérdidas de producto durante las operaciones de carga y descarga, optimizando la eficiencia y precisión de las mismas.

El objetivo de este estudio es examinar en detalle cómo la falta de verificación de los equipos de medición y la insuficiente aplicación de las normas API afectan la precisión en las mediciones de volúmenes a bordo de los buques que operan en los puertos ecuatorianos. Además, se busca proponer mejoras en los procesos de verificación y en la difusión de las normativas, con el fin de optimizar la precisión de las mediciones, reducir las pérdidas de producto y mejorar la eficiencia en las operaciones de carga y descarga.

Objetivo General:

Evaluar cómo la falta de verificación de los instrumentos de medición y temperatura en los buques, junto con la inadecuada difusión de las normas API, afecta la precisión de las mediciones de volúmenes a bordo y limita la creación de una base de datos confiable para verificar el cumplimiento de dichas normas.

Objetivos Específicos:

1. Analizar el estado actual de verificación y calibración de los instrumentos de medición y temperatura utilizados a bordo de los buques petroleros que operan en puertos ecuatorianos.

2. Identificar los factores operativos y técnicos que inciden en la generación de discrepancias en las mediciones de volúmenes de carga y descarga.
3. Evaluar el nivel de conocimiento y aplicación de las normas API por parte del personal encargado de las operaciones de medición en los buques.
4. Desarrollar un código en Wolfram Mathematica que permita automatizar el proceso de verificación de mediciones volumétricas, integrando variables como temperatura, ullage, API y tablas de calibración, de acuerdo con los estándares API.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1. Industria petrolera y transporte marítimo de hidrocarburos

La industria petrolera depende en gran medida del transporte marítimo para movilizar hidrocarburos desde las zonas de producción hasta los mercados internacionales, este sistema constituye uno de los pilares fundamentales del comercio energético mundial debido a su capacidad para transportar grandes volúmenes de crudo y derivados de manera eficiente y económica. La creciente globalización de los mercados energéticos ha fortalecido la importancia de las rutas marítimas, convirtiéndolas en elementos estratégicos para garantizar la seguridad del suministro y la estabilidad de los mercados internacionales (Kazemi y Szmerekovsky, 2015).

La cadena logística petrolera integra actividades de exploración, producción, almacenamiento, transporte, refinación y distribución, dentro de esta estructura, el transporte marítimo actúa como un enlace esencial entre los procesos upstream, midstream y downstream, permitiendo que los hidrocarburos sean trasladados desde los centros de producción hacia las refinerías y terminales de consumo. Diversos estudios han demostrado que la adecuada selección de los medios de transporte influye significativamente en la eficiencia operativa y en la reducción de costos logísticos dentro de la industria petrolera (Kazemi y Szmerekovsky, 2015).

La relevancia del transporte marítimo también se fundamenta en las economías de escala que ofrecen los buques petroleros, estas embarcaciones permiten movilizar millones de barriles de petróleo en una sola travesía, reduciendo considerablemente los costos unitarios de transporte en comparación con otros medios logísticos. Como consecuencia, las compañías petroleras dependen de una adecuada planificación marítima para garantizar la continuidad de las operaciones y la satisfacción de la demanda energética global.

2. Importancia del transporte marítimo en la cadena logística petrolera

El transporte marítimo constituye uno de los pilares fundamentales de la industria petrolera mundial, ya que permite movilizar grandes volúmenes de petróleo crudo y productos refinados entre los centros de producción, refinación y consumo. Debido a su elevada capacidad de carga y a sus menores costos operativos por unidad transportada, los buques petroleros representan el medio logístico más eficiente para el comercio internacional de hidrocarburos. La creciente demanda energética y la distribución geográfica desigual de las reservas de petróleo han convertido al transporte marítimo en un componente estratégico para garantizar la continuidad del abastecimiento energético a escala global. De acuerdo con la United Nations Conference on Trade and Development, aproximadamente el 80 % del volumen del comercio mundial de mercancías se moviliza por vía marítima, siendo el petróleo y sus derivados uno de los principales productos transportados.

Desde el punto de vista económico, el transporte marítimo favorece el desarrollo del comercio internacional al reducir significativamente los costos logísticos asociados al movimiento de grandes cargamentos. Los buques tanque modernos poseen capacidades que superan varios cientos de miles de toneladas métricas, permitiendo transportar combustibles líquidos con elevados niveles de eficiencia energética y operacional. Esta capacidad ha impulsado la consolidación de cadenas globales de suministro donde las operaciones de exportación e importación dependen directamente de la confiabilidad de

las rutas marítimas, la disponibilidad de infraestructura portuaria y la exactitud de los procesos de medición durante las operaciones de carga y descarga.

La cadena logística de los hidrocarburos comprende una secuencia de procesos que inicia con la exploración y producción del petróleo, continúa con el almacenamiento, transporte, refinación y distribución, y culmina con la entrega del producto al consumidor final. Dentro de esta estructura, el transporte marítimo integra el segmento *midstream*, encargado de conectar los centros de producción con las terminales de refinación y comercialización. La eficiencia de este eslabón depende no solamente de la capacidad operativa de los buques, sino también de la precisión con la que se determinan las cantidades transferidas durante las operaciones de transferencia de custodia (*custody transfer*), donde incluso pequeñas diferencias volumétricas pueden traducirse en pérdidas económicas de considerable magnitud.

En las operaciones petroleras internacionales, la medición volumétrica adquiere una importancia crítica debido a que constituye la base para las transacciones comerciales entre compradores y vendedores. La cantidad de producto transferido determina el valor económico de cada operación, por lo que las mediciones deben realizarse bajo estrictos criterios metrológicos que garanticen exactitud, repetibilidad y trazabilidad. Para alcanzar estos niveles de confiabilidad, la industria ha desarrollado normas internacionales como el *Manual of Petroleum Measurement Standards* (API MPMS), las normas ISO para calibración de tanques y las recomendaciones de la *Oil Companies International Marine Forum* (OCIMF), las cuales establecen procedimientos estandarizados para la medición de niveles, temperaturas, densidades, correcciones volumétricas y cálculo de volúmenes estándar.

En Ecuador, el transporte marítimo de hidrocarburos reviste una importancia estratégica debido a la necesidad de importar combustibles para abastecer el mercado nacional y distribuir la producción refinada hacia diferentes terminales del país. Los puertos de Esmeraldas y La Libertad concentran gran parte de estas operaciones, donde intervienen organismos gubernamentales, empresas operadoras, compañías inspectoras

independientes y personal técnico encargado de verificar la calidad y cantidad de los productos transferidos. Durante estas operaciones se aplican procedimientos de fiscalización que incluyen la medición manual mediante sistemas UTI (*Ullage Temperature Interface*), determinación de temperatura, cálculo del volumen observado, aplicación de factores de corrección por temperatura y presión, y estimación del *Vessel Experience Factor* (VEF), todo ello con el propósito de minimizar discrepancias entre los volúmenes embarcados y descargados.

A pesar de la existencia de procedimientos estandarizados, diversos estudios han demostrado que una proporción significativa de las diferencias observadas durante las operaciones marítimas se origina por deficiencias en la calibración de los instrumentos, errores humanos durante la toma de datos, utilización de tablas de calibración desactualizadas y aplicación inadecuada de las normas técnicas. Estas situaciones incrementan la incertidumbre de las mediciones y afectan directamente la confiabilidad de las transacciones comerciales, generando reclamaciones entre las partes involucradas y pérdidas económicas que pueden alcanzar valores elevados dependiendo del volumen transferido.

En este contexto, la transformación digital de la industria petrolera ha impulsado el desarrollo de herramientas computacionales capaces de automatizar los cálculos volumétricos, reducir errores operativos y mejorar la trazabilidad de la información generada durante las inspecciones marítimas. Plataformas de cálculo científico como **Wolfram Mathematica** permiten integrar modelos matemáticos, algoritmos de corrección volumétrica y bases de datos normativas en un único sistema capaz de procesar grandes cantidades de información con rapidez y precisión. La implementación de estas tecnologías representa una oportunidad para fortalecer los procesos de medición en buques petroleros, optimizar la toma de decisiones y contribuir al cumplimiento de los estándares internacionales de medición, objetivo que constituye el eje central de la presente investigación.

3. Cadena logística de hidrocarburos

La cadena logística de hidrocarburos comprende el conjunto de actividades técnicas, operativas y administrativas que permiten trasladar el petróleo crudo y sus derivados desde los yacimientos hasta el consumidor final. Este proceso integra diferentes eslabones que deben funcionar de manera coordinada para garantizar la continuidad del suministro energético, la seguridad operacional y la eficiencia económica. Tradicionalmente, la industria petrolera divide esta cadena en tres grandes segmentos: upstream, midstream y downstream, cada uno con funciones específicas que abarcan desde la exploración y producción hasta la comercialización de combustibles. La adecuada integración entre estos segmentos constituye un factor determinante para reducir costos logísticos, minimizar riesgos operacionales y asegurar el abastecimiento continuo de los mercados nacionales e internacionales (Speight, 2019).

El segmento upstream comprende las actividades de exploración geológica, perforación, evaluación de reservas y producción de hidrocarburos. Durante esta fase se identifican los yacimientos económicamente explotables y se desarrollan las operaciones necesarias para extraer petróleo y gas natural del subsuelo. Debido a la complejidad técnica de estas actividades, la producción debe planificarse considerando aspectos geológicos, económicos, ambientales y regulatorios que garanticen la sostenibilidad de la explotación. Una vez obtenido el crudo, este es sometido a procesos iniciales de separación de agua, gas y sedimentos antes de ser transportado hacia los centros de almacenamiento o refinación (Speight, 2019).

El segundo componente corresponde al midstream, considerado el eje logístico de la industria petrolera. Este segmento incluye el transporte, almacenamiento, terminales marítimos, oleoductos, poliductos, estaciones de bombeo y todas las operaciones relacionadas con el movimiento seguro de hidrocarburos entre las zonas de producción y las instalaciones industriales. El transporte marítimo desempeña un papel predominante dentro de esta etapa debido a su capacidad para movilizar grandes volúmenes de petróleo a largas distancias con costos relativamente bajos. La eficiencia de este sistema depende

de la coordinación entre puertos, terminales, operadores marítimos, autoridades portuarias y empresas de inspección, quienes participan en las operaciones de carga, descarga y transferencia de custodia del producto (UNCTAD, 2023).

Por su parte, el segmento downstream comprende las actividades relacionadas con la refinación del petróleo, el almacenamiento de productos terminados, la distribución y la comercialización de combustibles. En esta fase, el petróleo crudo es transformado mediante procesos físico-químicos en derivados como gasolinas, diésel, combustible de aviación, fuel oil, gas licuado de petróleo y otros productos petroquímicos. Posteriormente, estos combustibles son distribuidos mediante terminales terrestres, ductos, transporte marítimo de cabotaje y transporte terrestre hasta llegar a los consumidores industriales y comerciales. La eficiencia de este segmento depende directamente de la confiabilidad de las mediciones realizadas durante las operaciones de transferencia de custodia, ya que cualquier discrepancia volumétrica puede generar pérdidas económicas, conflictos contractuales y retrasos en la cadena de suministro.

Dentro de la logística petrolera, la transferencia de custodia (custody transfer) constituye uno de los procesos de mayor importancia técnica y económica. Este procedimiento representa el momento en que la responsabilidad legal y comercial sobre un volumen determinado de hidrocarburos pasa de una organización a otra. Debido a que estas transacciones implican elevados valores económicos, las cantidades transferidas deben determinarse mediante procedimientos metrológicos estandarizados que garanticen exactitud, repetibilidad y trazabilidad. Por esta razón, organismos como el American Petroleum Institute (API), la International Organization for Standardization (ISO) y la Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) han desarrollado normas específicas para regular los procedimientos de medición volumétrica durante estas operaciones, reduciendo la incertidumbre asociada a la determinación de cantidades comerciales.

En las terminales marítimas, las operaciones logísticas comprenden una secuencia de actividades que inicia con la programación del arribo del buque, continúa con la inspección previa a la descarga, la verificación de instrumentos de medición, el muestreo

del producto, la determinación de niveles, temperaturas y agua libre en los tanques, la aplicación de factores de corrección volumétrica y el cálculo del volumen estándar conforme a las normas API MPMS. Finalizada la transferencia del producto, se realizan nuevas mediciones para determinar las cantidades efectivamente descargadas y calcular indicadores como el Vessel Experience Factor (VEF), ampliamente utilizado para evaluar el comportamiento histórico de los buques durante las operaciones de transferencia de custodia.

Se adquiere especial relevancia debido a la dependencia parcial de combustibles importados para abastecer el mercado interno. Terminales marítimos como Esmeraldas y La Libertad concentran un importante volumen de operaciones de recepción y distribución de derivados del petróleo. En estos puertos participan entidades como EP Petroecuador, empresas inspectoras independientes, operadores portuarios y compañías navieras, quienes deben garantizar que todas las operaciones cumplan con los estándares internacionales de medición y control establecidos por las normas API e ISO. La correcta ejecución de estas actividades permite reducir pérdidas de producto, fortalecer la transparencia comercial y mejorar la confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia.

En Ecuador, la cadena logística de hidrocarburos se encuentra bajo un estricto sistema de regulación y fiscalización ejercido por el Estado, con el propósito de garantizar la seguridad operativa, la protección ambiental, la transparencia en la comercialización y el cumplimiento de las normas técnicas aplicables durante todas las etapas de la cadena de suministro. Esta supervisión abarca las actividades de exploración, producción, transporte, almacenamiento, refinación, distribución y comercialización de hidrocarburos.

La principal entidad responsable de esta función es la Agencia de Regulación y Control de Hidrocarburos (ARCH), organismo técnico encargado de regular, controlar y fiscalizar las actividades relacionadas con el sector hidrocarburífero. La ARCH verifica que las empresas públicas y privadas cumplan con las disposiciones establecidas en la Ley de

Hidrocarburos, sus reglamentos y las normas técnicas nacionales e internacionales aplicables.

Dentro del proceso logístico, la ARCH desempeña un papel fundamental en la inspección de la infraestructura utilizada para el almacenamiento y transporte de combustibles. Entre sus competencias se encuentra la supervisión del estado operativo de los tanques de almacenamiento, la verificación de los procedimientos de calibración, el control de los sistemas de medición volumétrica y la revisión de las condiciones de seguridad industrial y protección ambiental. Estas actividades permiten asegurar la confiabilidad de las mediciones comerciales, reducir pérdidas de producto y garantizar la trazabilidad de los hidrocarburos a lo largo de toda la cadena logística.

En el caso específico de los tanques de almacenamiento, la fiscalización realizada por la ARCH exige que los equipos de medición y los certificados de calibración se mantengan actualizados, ya que las desviaciones volumétricas pueden afectar los balances de inventario, generar pérdidas económicas y ocasionar incumplimientos regulatorios. Por ello, la implementación de modelos predictivos que permitan determinar el momento óptimo para realizar la recalibración constituye una herramienta de apoyo para fortalecer el cumplimiento de las exigencias establecidas por el organismo regulador y optimizar la gestión metrológica de las instalaciones.

La transformación digital ha comenzado a modificar significativamente la gestión de la cadena logística de hidrocarburos mediante la incorporación de tecnologías como sensores inteligentes, Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial, análisis masivo de datos y plataformas de modelado matemático. Estas herramientas permiten automatizar la captura de información, supervisar variables operativas en tiempo real y optimizar los procesos de cálculo volumétrico.

En particular, los sistemas basados en modelado matemático ofrecen la posibilidad de integrar variables como temperatura, nivel del producto, gravedad API, factores de corrección y tablas de calibración dentro de un entorno computacional unificado,

disminuyendo los errores asociados a los cálculos manuales y fortaleciendo la trazabilidad de la información técnica. Estas capacidades respaldan la propuesta de implementar un sistema integral basado en Wolfram Mathematica para optimizar las mediciones en buques petroleros, objetivo central de la presente investigación.

4. Operaciones de carga y descarga de hidrocarburos

Las operaciones de carga y descarga de hidrocarburos constituyen una de las etapas más críticas dentro de la cadena logística del transporte marítimo de petróleo, debido a que durante estos procesos se efectúa la transferencia física y comercial de grandes volúmenes de crudo o productos refinados entre terminales terrestres, oleoductos y buques tanque. Estas actividades requieren una coordinación precisa entre el personal de la terminal, la tripulación del buque, los inspectores independientes y las autoridades portuarias, con el propósito de garantizar que la transferencia se realice bajo condiciones de seguridad, eficiencia y exactitud metrológica. La complejidad de estas operaciones radica en que cualquier error durante la medición, muestreo o control del proceso puede ocasionar pérdidas económicas significativas, riesgos ambientales y controversias comerciales entre las partes involucradas (American Petroleum Institute [API], 2023; UNCTAD, 2023).

Las operaciones de carga comienzan con una fase de planificación que contempla la programación del arribo del buque, la asignación del puesto de atraque, la revisión de la documentación comercial y técnica, así como la verificación de las condiciones operativas de la terminal y de la embarcación. Antes de iniciar la transferencia del producto, se desarrollan reuniones de coordinación entre el capitán, el oficial de carga, el representante de la terminal y los inspectores de transferencia de custodia, con el fin de establecer las responsabilidades de cada participante y verificar el cumplimiento de los procedimientos de seguridad establecidos por la industria marítima internacional. Esta etapa resulta esencial para reducir el riesgo de incidentes operacionales y asegurar que las condiciones de transferencia sean compatibles con las características físico-químicas del hidrocarburo transportado (Lu & Chou, 2019).

Una vez autorizada la operación, se procede a la inspección inicial del buque. Durante esta fase se verifica el estado de los tanques de carga, las líneas de transferencia, las válvulas, los sistemas de ventilación y los instrumentos de medición de nivel y temperatura. Asimismo, se realizan mediciones iniciales de ullage, temperatura, presencia de agua libre (free water) y observaciones sobre las condiciones de estabilidad del buque, incluyendo las correcciones por trim y list. Estas mediciones constituyen la base para determinar el volumen inicial del producto contenido en cada tanque y permiten comparar posteriormente los resultados obtenidos al finalizar la transferencia. La correcta ejecución de estas actividades garantiza la confiabilidad de los cálculos volumétricos y disminuye la incertidumbre asociada a la determinación de las cantidades comerciales transferidas (Energy Institute, 2020).

Durante la carga del hidrocarburo, el producto es impulsado mediante sistemas de bombeo desde los tanques de almacenamiento terrestre hacia los tanques del buque a través de brazos de carga o mangueras marinas especialmente diseñadas para soportar elevadas presiones y caudales. La velocidad de transferencia debe controlarse continuamente para evitar fenómenos como la generación de electricidad estática, turbulencias excesivas, sobrepresiones o la formación de espuma, factores que pueden comprometer la seguridad operacional y afectar la exactitud de las mediciones. Las recomendaciones internacionales establecen que el incremento del caudal debe realizarse de forma progresiva, manteniendo un monitoreo permanente de la presión, la temperatura y el comportamiento hidráulico del sistema de transferencia (API, MPMS Capítulo 6; Energy Institute, 2020).

Las operaciones de descarga siguen principios similares; sin embargo, presentan desafíos adicionales relacionados con la determinación del volumen remanente, la recuperación de sedimentos y agua, así como la verificación del producto retenido en tuberías y líneas de transferencia. Una vez finalizado el bombeo, se ejecutan procedimientos de drenaje y secado de líneas (line clearing), con el propósito de minimizar pérdidas de producto y garantizar que las cantidades descargadas correspondan a los valores registrados durante

la transferencia de custodia. Estas actividades son especialmente relevantes en operaciones internacionales, donde diferencias inferiores al 0,3 % pueden representar pérdidas económicas de cientos de miles de dólares dependiendo del volumen transportado y del precio internacional del petróleo (Energy Institute, 2020).

La precisión de las operaciones de carga y descarga depende en gran medida de la calidad de las mediciones efectuadas durante todo el proceso. Variables como la temperatura del producto, la gravedad API, la densidad, el nivel del líquido, el volumen de agua libre y las condiciones de estabilidad del buque influyen directamente en el cálculo del volumen estándar. Debido a ello, la industria ha desarrollado procedimientos estandarizados que permiten aplicar factores de corrección por temperatura (CTL), presión (CPL) y expansión térmica del producto, con el objetivo de expresar todas las cantidades transferidas bajo condiciones de referencia internacionalmente aceptadas. La aplicación adecuada de estos factores reduce la incertidumbre de las mediciones y fortalece la transparencia de las transacciones comerciales (API MPMS; ISO 4266).

En los últimos años, la digitalización de las operaciones marítimas ha impulsado la incorporación de sistemas automáticos de medición, sensores inteligentes y plataformas computacionales capaces de procesar en tiempo real grandes volúmenes de información operacional. Estas tecnologías permiten supervisar simultáneamente variables críticas como caudal, presión, temperatura, nivel y densidad, generando registros continuos que facilitan la trazabilidad de la operación y disminuyen la probabilidad de errores asociados a la intervención humana. La integración de estas herramientas constituye uno de los principales avances de la denominada Industria 4.0 aplicada al transporte marítimo de hidrocarburos y representa una oportunidad para incrementar la eficiencia y confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia (Zocco et al., 2023).

Desde una perspectiva económica, las operaciones de carga y descarga representan el punto donde se materializa la transferencia de propiedad del producto, razón por la cual la exactitud de las mediciones adquiere un valor estratégico para productores, comercializadores, navieras y organismos reguladores. La implementación de

procedimientos normalizados, el empleo de instrumentos calibrados y la automatización de los cálculos volumétricos permiten reducir las discrepancias entre las cantidades cargadas y descargadas, fortaleciendo la confianza entre las partes involucradas y garantizando el cumplimiento de las normas internacionales de medición. En este contexto, el desarrollo de sistemas computacionales basados en herramientas como Wolfram Mathematica constituye una alternativa tecnológica para integrar cálculos volumétricos, factores de corrección y bases de datos normativas en una única plataforma de apoyo a la toma de decisiones, aspecto que fundamenta la propuesta desarrollada en la presente investigación.

5. Fiscalización y control de transferencias de custodia

La transferencia de custodia (custody transfer) constituye uno de los procesos más importantes dentro de la industria petrolera, ya que representa el momento en el cual la responsabilidad legal, comercial y financiera sobre un volumen determinado de hidrocarburos pasa de una organización a otra. En este procedimiento, la cantidad y calidad del producto medido sirven como base para la facturación comercial, el cumplimiento de contratos de compraventa, la liquidación de impuestos y la resolución de posibles controversias entre comprador y vendedor. Debido al elevado valor económico de cada operación, incluso pequeñas desviaciones en la medición pueden representar pérdidas financieras significativas, motivo por el cual la industria ha desarrollado procedimientos estandarizados para garantizar la exactitud, repetibilidad y trazabilidad de las mediciones realizadas durante la transferencia de custodia (American Petroleum Institute [API], 2023; International Organization of Legal Metrology [OIML], 2008).

La fiscalización de las operaciones de transferencia de custodia tiene como propósito verificar que las cantidades y especificaciones del producto transferido correspondan exactamente con las establecidas en la documentación técnica y comercial de la operación. Para ello intervienen inspectores independientes, representantes del comprador y del vendedor, operadores portuarios y organismos reguladores, quienes

supervisan el cumplimiento de las normas internacionales aplicables durante todo el proceso. Entre las actividades desarrolladas se incluyen la revisión documental, la verificación de certificados de calibración, la inspección física de los tanques, la comprobación del funcionamiento de los instrumentos de medición y la validación de los cálculos volumétricos efectuados antes y después de la transferencia (Energy Institute, 2020).

Uno de los principios fundamentales de la fiscalización corresponde a la trazabilidad metrológica de las mediciones. Este concepto garantiza que todos los resultados obtenidos durante la operación puedan relacionarse con patrones nacionales o internacionales mediante una cadena ininterrumpida de calibraciones documentadas. La trazabilidad constituye un requisito indispensable para asegurar la confiabilidad de las mediciones de nivel, temperatura, presión y densidad, ya que permite demostrar técnicamente la validez de los resultados utilizados en las transacciones comerciales. De esta manera, la incertidumbre de las mediciones puede cuantificarse y mantenerse dentro de los límites aceptables establecidos por las normas internacionales de medición de hidrocarburos (International Bureau of Weights and Measures [BIPM], 2019).

Las normas contenidas en el Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS) del American Petroleum Institute constituyen actualmente la referencia técnica más utilizada para regular las operaciones de transferencia de custodia en la industria petrolera. Estas normas establecen procedimientos específicos para la medición manual y automática de niveles, determinación de temperatura, muestreo de hidrocarburos, aplicación de factores de corrección volumétrica y cálculo de cantidades comerciales. La adopción de estos estándares favorece la uniformidad de los procedimientos empleados por operadores, terminales marítimos y organismos de inspección, reduciendo significativamente las discrepancias entre las cantidades medidas por las diferentes partes involucradas en la operación (American Petroleum Institute [API], 2023).

En las operaciones marítimas, la fiscalización inicia antes del comienzo de la transferencia mediante una inspección preliminar tanto del buque como de las

instalaciones terrestres. Durante esta etapa se verifica el estado de los tanques de carga, las líneas de transferencia, las válvulas, los sistemas de medición, los dispositivos de seguridad y la documentación técnica correspondiente. Asimismo, se realizan mediciones iniciales de nivel (ullage o innage), temperatura, agua libre y densidad del producto, cuyos resultados constituyen la referencia para determinar el volumen inicial contenido en los tanques y comparar posteriormente las cantidades transferidas al finalizar la operación (International Organization for Standardization [ISO], 2016).

Uno de los aspectos más relevantes de la fiscalización consiste en la reconciliación de cantidades entre las mediciones efectuadas en tierra y aquellas obtenidas a bordo del buque. En la práctica es habitual encontrar pequeñas diferencias originadas por variaciones de temperatura, incertidumbre instrumental, expansión térmica del producto, presencia de sedimentos, agua libre o diferencias en los procedimientos de medición. Para evitar conflictos comerciales, las normas internacionales establecen márgenes de tolerancia aceptables y metodologías específicas para investigar las discrepancias cuando estas superan los límites permitidos. Este procedimiento fortalece la transparencia de las operaciones y reduce el riesgo de reclamaciones posteriores entre las partes involucradas (Energy Institute, 2020).

El avance tecnológico ha permitido incorporar sistemas automáticos de medición que incrementan significativamente la confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia. Actualmente, numerosas terminales utilizan medidores ultrasónicos, medidores Coriolis, analizadores automáticos de calidad, computadores de flujo y sistemas electrónicos de adquisición de datos que registran continuamente variables como caudal, presión, temperatura y densidad del producto. Estas tecnologías disminuyen la intervención manual, reducen la probabilidad de errores humanos y proporcionan registros electrónicos que facilitan la auditoría técnica y la trazabilidad de toda la operación (International Society of Automation [ISA], 2021).

En Ecuador, la fiscalización de las operaciones de transferencia de custodia realizadas en los terminales marítimos de hidrocarburos es ejecutada por organismos de inspección

acreditados, en coordinación con EP Petroecuador, autoridades portuarias y empresas operadoras. Durante estas inspecciones se verifica la correcta aplicación de las normas API, la calibración vigente de los instrumentos utilizados, el cumplimiento de los procedimientos de medición y la consistencia de los cálculos volumétricos empleados para determinar las cantidades comerciales transferidas. Estas actividades contribuyen a fortalecer la transparencia de las operaciones, reducir pérdidas económicas y asegurar la confiabilidad de las transacciones internacionales de hidrocarburos (Servicio de Acreditación Ecuatoriano [SAE], 2024).

La incorporación de herramientas computacionales orientadas al procesamiento de datos industriales representa una oportunidad para optimizar los procesos de fiscalización mediante la automatización de cálculos volumétricos, la validación de resultados y la generación automática de reportes técnicos. Plataformas como Wolfram Mathematica permiten integrar algoritmos matemáticos, bases de datos normativas y procedimientos establecidos por el API MPMS dentro de un único entorno computacional, disminuyendo la incertidumbre asociada a los cálculos manuales y mejorando la eficiencia de las operaciones de transferencia de custodia. La implementación de este tipo de soluciones constituye uno de los principales fundamentos tecnológicos de la presente investigación (Wolfram Research, 2024).

6. Buques petroleros y sistemas de almacenamiento

El transporte marítimo de hidrocarburos representa el principal medio para movilizar petróleo crudo y productos refinados a nivel mundial, debido a su elevada capacidad de carga, eficiencia económica y posibilidad de conectar regiones productoras con centros de refinación y consumo ubicados a grandes distancias. El crecimiento sostenido de la demanda energética internacional ha impulsado el desarrollo de buques petroleros de mayor capacidad, incorporando tecnologías que optimizan la seguridad operacional, la eficiencia del transporte y la confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia. Actualmente, estas embarcaciones constituyen un elemento estratégico dentro de la cadena logística del sector petrolero, ya que permiten movilizar millones de barriles de

hidrocarburos bajo estrictos estándares técnicos y regulatorios. (Stopford, 2009; UNCTAD, 2023).

Los buques petroleros son embarcaciones diseñadas específicamente para transportar hidrocarburos líquidos a granel, diferenciándose de otros tipos de buques por la configuración de sus tanques, los sistemas de bombeo, las tuberías de carga y descarga, los sistemas de inertización y los equipos destinados al monitoreo permanente de las condiciones operativas. Su diseño busca minimizar riesgos asociados a incendios, explosiones, contaminación marina y pérdidas de producto durante el transporte. Además, la evolución tecnológica ha permitido incorporar sistemas automáticos de medición y monitoreo que incrementan la precisión de las operaciones de carga y descarga y reducen la intervención manual del personal operativo. (Stopford, 2009; IACS, 2022).

Desde el punto de vista estructural, un buque petrolero moderno está conformado por doble casco, mamparos longitudinales y transversales, tanques de carga, tanques de lastre segregado, salas de bombas y sistemas de tuberías independientes para la transferencia del producto. La adopción obligatoria del doble casco, establecida por la Organización Marítima Internacional después de diversos accidentes ambientales ocurridos durante las décadas de 1980 y 1990, ha permitido disminuir significativamente la probabilidad de derrames de hidrocarburos ocasionados por colisiones o varaduras. Esta medida constituye uno de los avances más importantes en materia de seguridad marítima y protección ambiental dentro del transporte internacional de petróleo. (IMO, 2023; OCIMF, 2022).

Uno de los elementos más importantes de estas embarcaciones corresponde a los sistemas de almacenamiento de hidrocarburos. Los tanques de carga no solo cumplen la función de contener el producto durante la navegación, sino que también constituyen la base sobre la cual se realizan todas las mediciones volumétricas utilizadas en las transacciones comerciales. Por esta razón, la geometría interna de cada tanque debe conocerse con elevada precisión mediante procesos de calibración que permitan establecer la relación entre la altura del líquido y el volumen contenido. Cualquier error en esta relación afecta

directamente los cálculos de volumen observado y volumen estándar utilizados durante la transferencia de custodia. (API MPMS, 2023; Berto, 1997).

La confiabilidad de los sistemas de almacenamiento depende igualmente del desempeño de los instrumentos de medición instalados en cada tanque. Sensores electrónicos de nivel, termómetros digitales, detectores de agua libre, medidores de presión y sistemas automáticos de adquisición de datos permiten supervisar continuamente el comportamiento del producto almacenado durante la navegación y durante las operaciones portuarias. La integración de estos dispositivos reduce la incertidumbre asociada a las mediciones manuales y mejora la repetibilidad de los resultados, aspecto fundamental cuando las cantidades determinadas sirven como base para operaciones comerciales de elevado valor económico. Estudios recientes sobre metrología aplicada a la transferencia de custodia destacan que la reducción de la incertidumbre instrumental constituye uno de los factores con mayor impacto en la disminución de discrepancias entre comprador y vendedor. (García-Berrocal et al., 2019).

Durante las operaciones de carga y descarga, los sistemas de almacenamiento deben garantizar condiciones estables que permitan obtener mediciones representativas del volumen contenido en cada tanque. Factores como la expansión térmica del producto, la deformación estructural del casco, el trimado del buque, la escora, la presencia de agua libre y las vibraciones ocasionadas por el oleaje pueden modificar la distribución del líquido dentro de los tanques e introducir errores en las mediciones de nivel. Debido a ello, las normas internacionales establecen procedimientos específicos para estabilizar las condiciones del producto antes de efectuar las mediciones oficiales utilizadas en la transferencia de custodia, reduciendo así la incertidumbre asociada al proceso. (API MPMS, 2023; AFPM, 2015).

7. Clasificación de los buques petroleros

La clasificación de los buques petroleros responde a criterios técnicos, operacionales y comerciales relacionados con su capacidad de carga, dimensiones, rutas de navegación y

tipo de hidrocarburo transportado. Esta clasificación permite optimizar la logística marítima internacional, reducir costos operacionales y garantizar que cada embarcación opere dentro de las limitaciones impuestas por canales de navegación, terminales portuarias y condiciones de seguridad marítima. Desde el punto de vista de la ingeniería naval, el tamaño del buque influye directamente sobre el diseño estructural, la configuración de los tanques de carga, los sistemas de bombeo, la estabilidad y los procedimientos de medición volumétrica utilizados durante las operaciones de transferencia de custodia, por lo que constituye un aspecto fundamental para la planificación de las operaciones petroleras (Stopford, 2009; UNCTAD, 2023).

na de las clasificaciones más utilizadas corresponde al peso muerto (Deadweight Tonnage, DWT), parámetro que representa la capacidad máxima de carga que puede transportar una embarcación, incluyendo hidrocarburos, combustible, agua, provisiones y tripulación. Con base en este criterio, los buques petroleros se agrupan en categorías como Handysize, Medium Range (MR), Long Range (LR1 y LR2), Panamax, Aframax, Suezmax, Very Large Crude Carrier (VLCC) y Ultra Large Crude Carrier (ULCC). Cada categoría responde a necesidades logísticas específicas y posee características estructurales adaptadas a diferentes mercados y rutas marítimas internacionales, permitiendo maximizar la eficiencia económica del transporte de hidrocarburos (Stopford, 2009).

Los buques Handysize, con capacidades comprendidas aproximadamente entre 10 000 y 40 000 DWT, son utilizados principalmente para el transporte regional de productos refinados y combustibles hacia puertos con restricciones de calado o infraestructura limitada. Debido a sus dimensiones reducidas presentan elevada maniobrabilidad y gran flexibilidad operativa, lo que facilita las operaciones de cabotaje y distribución secundaria de combustibles. Sin embargo, su menor capacidad incrementa el costo logístico por unidad transportada en comparación con embarcaciones de mayor tamaño, razón por la cual su utilización suele concentrarse en rutas de corta distancia y mercados especializados (UNCTAD, 2023).

Los buques Aframax, cuya capacidad oscila aproximadamente entre 80 000 y 120 000 DWT, constituyen una de las categorías más utilizadas para el transporte internacional de petróleo crudo. Su denominación proviene del sistema Average Freight Rate Assessment (AFRA) desarrollado por la industria petrolera para clasificar los costos de transporte marítimo. Estas embarcaciones presentan un equilibrio entre capacidad de carga, flexibilidad operativa y acceso a un amplio número de terminales portuarias, convirtiéndose en una alternativa eficiente para rutas donde los buques de mayor tamaño presentan restricciones operacionales. Su configuración de tanques y sistemas de medición permite realizar operaciones de transferencia de custodia con elevados niveles de precisión, aspecto esencial para minimizar discrepancias comerciales (Stopford, 2009; API, 2023).

Las categorías Suezmax, VLCC y ULCC corresponden a los mayores buques petroleros actualmente utilizados por la industria. Los Suezmax, con capacidades cercanas a 160 000 DWT, han sido diseñados para aprovechar al máximo las dimensiones permitidas por el Canal de Suez. Por su parte, los Very Large Crude Carrier (VLCC) transportan entre 200 000 y 320 000 DWT y constituyen el principal medio para movilizar petróleo entre Medio Oriente, Asia, Europa y América. Finalmente, los Ultra Large Crude Carrier (ULCC) superan las 320 000 DWT y se emplean en rutas muy específicas donde la infraestructura portuaria permite recibir embarcaciones de tales dimensiones. Estas unidades incorporan sistemas altamente automatizados de monitoreo, medición y seguridad debido al enorme volumen de hidrocarburos transportado y al elevado impacto económico asociado a cualquier desviación en las mediciones comerciales (IMO, 2023; OCIMF, 2022).

La selección del tipo de buque depende también de las características del hidrocarburo transportado. Los buques destinados al transporte de productos refinados incorporan múltiples compartimentos independientes que permiten movilizar simultáneamente combustibles con diferentes especificaciones sin riesgo de contaminación cruzada. En contraste, los buques dedicados al transporte de petróleo crudo suelen disponer de tanques

de mayor capacidad, diseñados para maximizar el volumen transportado y facilitar las operaciones de carga y descarga mediante sistemas de bombeo de alta capacidad. Esta diferenciación influye directamente sobre la configuración de los sistemas de medición volumétrica y sobre los procedimientos de inspección utilizados durante la transferencia de custodia (Energy Institute, 2020).

Desde el punto de vista metrológico, la clasificación del buque condiciona la metodología empleada para determinar las cantidades comerciales de hidrocarburos. El número de tanques, su geometría, la distribución longitudinal del producto y las condiciones de estabilidad del buque afectan la incertidumbre de las mediciones de nivel y temperatura. Investigaciones recientes han demostrado que la correcta selección y calibración de los sistemas de medición, junto con la aplicación rigurosa de procedimientos normalizados, permite reducir significativamente las discrepancias entre las cantidades determinadas por el buque y las obtenidas en las instalaciones terrestres, fortaleciendo la confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia (García-Berrocal et al., 2019; García-Berrocal et al., 2024).

En el contexto de la presente investigación, comprender la clasificación de los buques petroleros resulta indispensable para el diseño del sistema integral basado en Wolfram Mathematica, ya que las características geométricas y operacionales de cada categoría determinan las variables necesarias para automatizar los cálculos volumétricos y aplicar correctamente las correcciones establecidas por el API MPMS. La incorporación de modelos matemáticos adaptados a cada tipo de embarcación permitirá incrementar la precisión de las mediciones, disminuir la incertidumbre asociada al cálculo manual y fortalecer la trazabilidad de las operaciones de transferencia de custodia, contribuyendo al desarrollo de procesos más seguros, eficientes y confiables dentro de la industria petrolera (García-Berrocal et al., 2024).

7. Instrumentación para mediciones en buques petroleros

La instrumentación utilizada en los buques petroleros constituye un componente esencial para garantizar la exactitud, confiabilidad y trazabilidad de las mediciones efectuadas durante las operaciones de carga, descarga y transferencia de custodia de hidrocarburos. La creciente automatización de la industria marítima ha impulsado el desarrollo de sistemas de medición cada vez más precisos, capaces de monitorear en tiempo real variables críticas como nivel, temperatura, presión, densidad y presencia de agua libre dentro de los tanques de carga. La adecuada selección de estos instrumentos resulta fundamental, ya que la incertidumbre asociada a las mediciones puede traducirse en diferencias económicas significativas durante las transacciones comerciales de petróleo y sus derivados. Diversos estudios destacan que la evolución de la instrumentación industrial ha permitido incrementar la exactitud de los sistemas de medición mediante la incorporación de sensores inteligentes, técnicas avanzadas de procesamiento de señales y plataformas de supervisión automatizadas, mejorando considerablemente la confiabilidad de las operaciones en la industria petrolera (Hanni & Venkata, 2020).

El objetivo principal de la instrumentación en los buques petroleros consiste en proporcionar información confiable sobre las condiciones físicas del producto almacenado, permitiendo determinar con precisión el volumen observado y posteriormente calcular el volumen estándar mediante la aplicación de factores de corrección establecidos por las normas internacionales. Para alcanzar este propósito, los sistemas modernos integran diferentes tipos de sensores capaces de medir continuamente variables que afectan directamente la exactitud de los cálculos volumétricos. La integración de múltiples instrumentos dentro de una arquitectura de monitoreo centralizada permite reducir errores derivados de la intervención manual y facilita la validación automática de los datos obtenidos durante las inspecciones marítimas (Kłosowski, Gierusz, & Świątek, 2019).

Uno de los principales desafíos asociados a la instrumentación para medición de hidrocarburos corresponde a las condiciones ambientales presentes durante las

operaciones marítimas. Factores como vibraciones del buque, movimientos ocasionados por el oleaje, cambios de temperatura, presencia de vapores inflamables, variaciones de presión y características fisicoquímicas del producto pueden afectar el desempeño de los sensores y modificar la incertidumbre de las mediciones. En consecuencia, la selección del principio de medición más adecuado depende no solamente de la variable que se desea cuantificar, sino también de las condiciones específicas de operación, la geometría del tanque, las propiedades del hidrocarburo y los requisitos de exactitud exigidos para la transferencia de custodia (Ramasamy & Mohan, 2023).

Los avances recientes en instrumentación industrial han permitido el desarrollo de sensores electrónicos con mayores niveles de sensibilidad, estabilidad y capacidad de comunicación digital. Actualmente, numerosos buques petroleros incorporan sistemas basados en tecnologías ultrasónicas, radar, capacitivas, magnetoestrictivas y de fibra óptica para medir de manera continua el nivel de los líquidos almacenados. Estas tecnologías presentan ventajas importantes respecto a los métodos convencionales, ya que disminuyen la influencia de errores humanos, permiten registrar datos en tiempo real y facilitan la integración con plataformas de supervisión remota y sistemas inteligentes de gestión operacional. La tendencia actual de la industria se orienta hacia la implementación de sistemas de medición completamente automatizados, capaces de realizar autodiagnósticos y compensar automáticamente diversas fuentes de error (Hanni & Venkata, 2020; Ramasamy & Mohan, 2023).

En las operaciones de transferencia de custodia, la confiabilidad de la instrumentación adquiere una importancia estratégica debido a que las cantidades determinadas constituyen la base para la liquidación económica de las transacciones comerciales. Investigaciones recientes demuestran que la mayor parte de las discrepancias observadas durante estas operaciones no se originan exclusivamente por errores de cálculo, sino por deficiencias relacionadas con la calibración de los instrumentos, la selección inadecuada de sensores, el mantenimiento insuficiente y la falta de integración entre los diferentes sistemas de medición instalados a bordo. Por esta razón, la tendencia internacional

consiste en desarrollar arquitecturas instrumentales capaces de integrar simultáneamente sensores de nivel, temperatura, presión y densidad dentro de plataformas computacionales que automaticen la validación de datos y fortalezcan la trazabilidad metrológica de todas las mediciones efectuadas durante la operación (Kłosowski et al., 2019).

Desde la perspectiva de la presente investigación, la instrumentación constituye el elemento fundamental sobre el cual se desarrollará el sistema integral basado en Wolfram Mathematica. La automatización propuesta requiere recibir información proveniente de múltiples dispositivos de medición para ejecutar algoritmos de cálculo volumétrico, aplicar factores de corrección y generar reportes técnicos conforme a los estándares internacionales. En consecuencia, comprender el principio de funcionamiento, las limitaciones y las características metrológicas de cada instrumento permitirá desarrollar un modelo computacional robusto, capaz de incrementar la precisión de las mediciones y reducir la incertidumbre asociada a los procedimientos manuales empleados actualmente en las operaciones de transferencia de custodia (Ensuring Measurement Integrity in Petroleum Logistics, 2025).

8. Calibración y verificación de instrumentos

La calibración y la verificación de instrumentos constituyen procesos fundamentales dentro de la metrología industrial aplicada al sector petrolero, debido a que garantizan que los equipos utilizados para medir variables críticas, como nivel, temperatura, presión y volumen, proporcionen resultados confiables y trazables. En las operaciones de transferencia de custodia, donde las mediciones determinan el valor económico de millones de barriles de hidrocarburos, incluso pequeñas desviaciones pueden traducirse en pérdidas financieras significativas o en controversias comerciales. Por esta razón, la industria petrolera ha establecido procedimientos normalizados que aseguran la calidad metrológica de los instrumentos durante todo su ciclo de vida, desde su puesta en servicio hasta su mantenimiento periódico (Orsay et al., 2025).

La calibración es el proceso mediante el cual se establece la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición y los valores correspondientes obtenidos mediante un patrón de referencia con trazabilidad metrológica. Este procedimiento no implica necesariamente el ajuste del instrumento, sino la determinación cuantitativa de sus errores de indicación y de la incertidumbre asociada a la medición. En la industria petrolera, la calibración constituye un requisito indispensable para garantizar la confiabilidad de las mediciones utilizadas en operaciones de carga, descarga y transferencia de custodia, donde la exactitud de los resultados tiene implicaciones técnicas, legales y comerciales (Sommer et al., 2001).

La verificación metrológica, aunque estrechamente relacionada con la calibración, tiene un propósito diferente. Mientras la calibración determina el comportamiento del instrumento respecto a un patrón reconocido, la verificación confirma que dicho instrumento cumple con los límites de error máximo permisible establecidos por las normas técnicas o la legislación aplicable. En consecuencia, un instrumento puede encontrarse calibrado, pero no necesariamente satisfacer los criterios de aceptación para una aplicación específica. Esta diferenciación resulta especialmente importante en la transferencia de custodia, donde únicamente los equipos que cumplen simultáneamente los requisitos de calibración y verificación deben utilizarse para determinar cantidades comerciales de hidrocarburos (Sommer et al., 2001).

En los buques petroleros, la calibración comprende un amplio conjunto de instrumentos, entre ellos sistemas UTI, termómetros electrónicos, sensores automáticos de nivel, medidores de presión y dispositivos empleados para la determinación de agua libre. Cada uno de estos equipos debe someterse a programas periódicos de calibración ejecutados por laboratorios competentes, utilizando patrones trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). La periodicidad de estos procesos depende de factores como la frecuencia de uso, las condiciones ambientales, la criticidad de la medición y el historial de desempeño del instrumento, con el objetivo de minimizar la deriva metrológica y preservar la confiabilidad de los resultados (ISO 8222:2020).

Uno de los aspectos más relevantes durante la calibración de instrumentos utilizados en operaciones petroleras corresponde a la estimación de la incertidumbre de medición. La incertidumbre representa un parámetro asociado al resultado que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden atribuirse al mensurando y constituye un elemento indispensable para evaluar la calidad de cualquier medición. En las operaciones de transferencia de custodia, la incertidumbre total resulta de la combinación de múltiples fuentes de error, incluyendo la resolución del instrumento, las condiciones ambientales, la repetibilidad de las mediciones, las características del producto y la incertidumbre de los patrones empleados durante la calibración. Su adecuada evaluación permite cuantificar el riesgo asociado a las decisiones comerciales basadas en los resultados de medición (Orsay et al., 2025).

Las normas internacionales establecen procedimientos específicos para la calibración de medidas volumétricas, tanques patrón y equipos utilizados en sistemas de medición de hidrocarburos. La norma ISO 8222:2020 proporciona directrices para el diseño, utilización y calibración de medidas volumétricas, tanques patrón y equipos de campo, incorporando metodologías para la estimación de incertidumbres, correcciones por temperatura y propiedades de los fluidos empleados durante la calibración. Estas recomendaciones contribuyen a garantizar la comparabilidad internacional de las mediciones y fortalecen la trazabilidad metrológica de las operaciones desarrolladas en la industria petrolera (ISO 8222:2020).

La implementación de programas sistemáticos de calibración y verificación produce beneficios técnicos y económicos significativos para las organizaciones dedicadas al transporte y comercialización de hidrocarburos. Entre estos beneficios destacan la reducción de pérdidas de producto, la disminución de discrepancias durante la transferencia de custodia, el incremento de la confiabilidad de los balances de inventario y el fortalecimiento del cumplimiento normativo frente a auditorías técnicas y regulatorias. Asimismo, la disponibilidad de registros históricos de calibración facilita la detección temprana de tendencias de deriva instrumental, permitiendo planificar

actividades de mantenimiento preventivo antes de que los errores afecten la operación comercial (NIST, 2024).

La transformación digital ha permitido incorporar nuevas estrategias para la gestión metrológica de instrumentos mediante plataformas capaces de almacenar certificados de calibración, programar automáticamente fechas de recalibración, calcular incertidumbres y verificar el cumplimiento de criterios de aceptación en tiempo real. Estas soluciones digitales favorecen la integración entre la instrumentación de campo y los sistemas de gestión de activos, proporcionando información confiable para la toma de decisiones y fortaleciendo la trazabilidad documental exigida por los sistemas modernos de gestión de la calidad. En este contexto, el desarrollo de un sistema basado en Wolfram Mathematica representa una oportunidad para automatizar la evaluación metrológica de los instrumentos utilizados en buques petroleros, integrando algoritmos de cálculo, factores de corrección y criterios de aceptación dentro de una plataforma computacional orientada a mejorar la precisión y confiabilidad de las mediciones durante las operaciones de transferencia de custodia.

9. Impacto de la calibración en la confiabilidad de las mediciones

La calibración de los instrumentos de medición constituye uno de los pilares fundamentales para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos durante las operaciones de transferencia de custodia de hidrocarburos. En la industria petrolera, las decisiones comerciales, operativas y regulatorias dependen directamente de la exactitud de las mediciones de volumen, temperatura, presión y densidad, por lo que cualquier desviación sistemática de los instrumentos puede generar diferencias económicas de gran magnitud. La calibración permite identificar y cuantificar dichas desviaciones mediante la comparación del instrumento con patrones metrológicos trazables, asegurando que los resultados obtenidos representen adecuadamente el valor real del mensurando. En consecuencia, la calidad de las mediciones está estrechamente relacionada con la calidad de los programas de calibración implementados por las organizaciones dedicadas al transporte y comercialización de hidrocarburos (García-Berrocal et al., 2024).

La confiabilidad de una medición puede definirse como la capacidad de un sistema para producir resultados consistentes, repetibles y técnicamente válidos durante un periodo determinado de operación. Diversas investigaciones han demostrado que la ausencia de programas sistemáticos de calibración incrementa progresivamente la incertidumbre de los instrumentos debido al desgaste mecánico, envejecimiento de los sensores, variaciones ambientales y cambios en las características electrónicas de los equipos. Este fenómeno, conocido como deriva metrológica (measurement drift), afecta directamente la estabilidad de las mediciones y aumenta el riesgo de obtener resultados fuera de los límites de aceptación establecidos por las normas técnicas y los contratos comerciales. (Oliveira, Orsay, & Medeiros, 2023).

Uno de los principales efectos de una calibración deficiente consiste en el incremento de la incertidumbre de medición. En las operaciones de transferencia de custodia, donde diariamente se movilizan grandes volúmenes de petróleo y derivados, incluso diferencias inferiores al 0,1 % pueden representar pérdidas económicas de miles de dólares por operación. La incertidumbre asociada a un instrumento mal calibrado no solamente afecta el resultado individual de una medición, sino que también se propaga a través de todos los cálculos volumétricos posteriores, incluyendo la determinación del volumen estándar, la aplicación de factores de corrección y el cálculo de inventarios. Por esta razón, la adecuada estimación y control de la incertidumbre constituye un requisito indispensable para garantizar la transparencia de las transacciones comerciales en la industria petrolera (García-Berrocal et al., 2024).

La repetibilidad y la reproducibilidad representan dos indicadores esenciales para evaluar la confiabilidad de un sistema de medición. Un instrumento correctamente calibrado debe ser capaz de producir resultados similares cuando las mediciones se realizan bajo las mismas condiciones operativas, así como mantener un comportamiento consistente cuando intervienen diferentes operadores, equipos auxiliares o condiciones ambientales controladas. Estudios desarrollados sobre medidores volumétricos utilizados en transferencia de custodia han demostrado que la implementación de procedimientos

avanzados de calibración reduce significativamente la variabilidad de las mediciones, mejorando la estabilidad estadística de los resultados y disminuyendo el riesgo de decisiones erróneas durante las operaciones comerciales (García-Berrocal et al., 2024).

La influencia de la calibración sobre la confiabilidad también se refleja en la capacidad de detectar oportunamente desviaciones operacionales antes de que estas afecten el proceso productivo. Los registros históricos de calibración permiten identificar tendencias de deterioro, evaluar la estabilidad de los instrumentos y planificar actividades de mantenimiento preventivo basadas en evidencia metrológica. Este enfoque reduce las fallas inesperadas, optimiza la disponibilidad de los equipos y disminuye los costos asociados a interrupciones operacionales o recalibraciones de emergencia. Además, la utilización de modelos estadísticos para analizar la evolución del desempeño metrológico facilita la toma de decisiones fundamentadas respecto a la sustitución o ajuste de los instrumentos de medición (Oliveira et al., 2023).

La incorporación de métodos computacionales avanzados ha permitido mejorar significativamente los procedimientos de calibración empleados en la industria petrolera. Investigaciones recientes proponen la aplicación de simulaciones de Monte Carlo para estimar con mayor precisión la incertidumbre asociada a la calibración de medidores volumétricos utilizados en transferencia de custodia. Estos métodos permiten representar de manera más realista la distribución probabilística de las variables involucradas y superar algunas limitaciones del enfoque tradicional basado en la propagación lineal de incertidumbres. Los resultados obtenidos evidencian reducciones cercanas al 7 % en la incertidumbre expandida, incrementando la confiabilidad de las mediciones utilizadas durante las transacciones comerciales de hidrocarburos (García-Berrocal et al., 2024).

10. Gestión metrológica de instrumentos petroleros

La gestión metrológica comprende el conjunto de actividades técnicas, administrativas y documentales destinadas a garantizar que los instrumentos de medición utilizados en los procesos industriales mantengan un desempeño confiable durante todo su ciclo de vida.

En la industria petrolera, estas actividades adquieren especial importancia debido a que las mediciones de nivel, temperatura, presión, densidad y volumen constituyen la base para la transferencia de custodia, el control de inventarios y la toma de decisiones operativas. En consecuencia, un sistema de gestión metrológica debe asegurar que todos los instrumentos se encuentren calibrados, verificados, identificados y sometidos a programas de seguimiento que permitan demostrar la validez de los resultados obtenidos durante las operaciones de medición (International Organization for Standardization [ISO], 2026).

La implementación de un sistema de gestión metrológica inicia con la identificación de los instrumentos críticos para el proceso, la definición de sus requisitos metrológicos y la evaluación de los riesgos asociados a posibles errores de medición. En los buques petroleros, equipos como los sistemas UTI, sensores electrónicos de temperatura, medidores de presión, detectores de agua libre y dispositivos automáticos de medición de nivel deben considerarse instrumentos de alta criticidad debido a que cualquier desviación en su desempeño puede afectar directamente la determinación de las cantidades comerciales transferidas. Por ello, la planificación metrológica debe establecer intervalos de calibración, procedimientos de verificación y criterios de aceptación acordes con la importancia de cada instrumento dentro del proceso operacional (Oliveira et al., 2025).

La trazabilidad metrológica constituye uno de los principios fundamentales de la gestión de instrumentos, ya que garantiza que todas las mediciones puedan relacionarse con patrones nacionales o internacionales mediante una cadena ininterrumpida de calibraciones documentadas. Esta condición permite comparar resultados obtenidos en diferentes laboratorios, terminales marítimos y buques petroleros, asegurando que las mediciones realizadas durante las operaciones de transferencia de custodia sean técnicamente equivalentes y aceptadas por todas las partes involucradas. La ausencia de trazabilidad compromete la validez de las mediciones y aumenta el riesgo de controversias comerciales derivadas de diferencias en los volúmenes determinados (International Bureau of Weights and Measures [BIPM], 2019).

Otro componente esencial de la gestión metrológica corresponde al control documental de los instrumentos de medición. Cada equipo debe disponer de un historial que incluya certificados de calibración, registros de mantenimiento, resultados de verificaciones, reparaciones efectuadas y fechas programadas para futuras recalibraciones. La disponibilidad de esta información facilita las auditorías técnicas, demuestra el cumplimiento de los requisitos establecidos por los sistemas de gestión de la calidad y permite evaluar el comportamiento histórico de cada instrumento para detectar oportunamente procesos de deriva metrológica o deterioro operacional (ISO, 2026).

El análisis periódico del desempeño metrológico permite establecer indicadores que facilitan la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento preventivo, la sustitución de equipos y la optimización de los intervalos de calibración. Parámetros como la repetibilidad, reproducibilidad, estabilidad, incertidumbre expandida y tendencia de deriva constituyen herramientas fundamentales para evaluar la confiabilidad de los instrumentos empleados en la medición de hidrocarburos. La utilización sistemática de estos indicadores contribuye a reducir la probabilidad de errores durante las operaciones de transferencia de custodia y fortalece la confiabilidad de los balances volumétricos utilizados en la industria petrolera (Oliveira et al., 2025).

La transformación digital ha impulsado la incorporación de sistemas informáticos para la administración de la información metrológica. Estas plataformas permiten programar automáticamente recalibraciones, generar alertas sobre vencimientos de certificados, almacenar historiales completos de mantenimiento y analizar indicadores de desempeño mediante herramientas estadísticas. La integración de estos sistemas con plataformas de adquisición de datos industriales favorece una gestión metrológica más eficiente y reduce el riesgo de utilizar instrumentos fuera de especificación durante operaciones críticas de carga y descarga de hidrocarburos (ISO, 2026).

En la presente investigación, la gestión metrológica constituye un elemento fundamental para el desarrollo del sistema integral basado en Wolfram Mathematica, debido a que la automatización de los cálculos volumétricos requiere utilizar información proveniente de

instrumentos cuya confiabilidad haya sido previamente demostrada mediante procesos de calibración y verificación. La incorporación de datos relacionados con incertidumbre, estado de calibración, fechas de vencimiento y criterios de aceptación permitirá que el sistema propuesto no solamente automatice los cálculos establecidos por las normas API MPMS, sino que también contribuya al fortalecimiento de la trazabilidad metrológica y al mejoramiento continuo de las operaciones de transferencia de custodia realizadas en buques petroleros (Oliveira et al., 2025; ISO, 2026).

11. Tablas de calibración de tanques

Las tablas de calibración de tanques constituyen documentos técnicos que establecen la relación entre el nivel del líquido contenido en un tanque y el volumen correspondiente almacenado en su interior. Estas tablas son elaboradas mediante procedimientos metrológicos normalizados y representan el fundamento para la determinación de cantidades comerciales durante las operaciones de almacenamiento, carga, descarga y transferencia de custodia de hidrocarburos. Su utilización permite transformar las mediciones de nivel obtenidas en campo en volúmenes observados con un grado conocido de incertidumbre, garantizando uniformidad y trazabilidad en las transacciones comerciales del sector petrolero (ISO 7507-1, 2003).

La elaboración de una tabla de calibración requiere determinar con elevada precisión las dimensiones geométricas del tanque y las deformaciones que puedan afectar su capacidad volumétrica. Para ello se emplean métodos normalizados como el strapping method, basado en la medición de las circunferencias del tanque mediante cintas calibradas, y el método incremental por adición de líquido utilizando medidores volumétricos de alta exactitud. Ambos procedimientos consideran factores como la inclinación del tanque, la deformación de las paredes, el espesor de las placas, la expansión térmica del acero y la presencia de elementos internos que reducen el volumen útil. Estas correcciones permiten construir tablas de capacidad que reflejan con mayor fidelidad el comportamiento real del tanque durante su operación (ISO 7507-1, 2003; ISO 4269, 2001).

La exactitud de las tablas de calibración influye directamente sobre la incertidumbre de las mediciones volumétricas realizadas durante la transferencia de custodia. Un error sistemático en la construcción de la tabla provoca desviaciones permanentes en todos los cálculos posteriores de volumen, independientemente de la precisión del instrumento utilizado para medir el nivel del líquido. Por esta razón, la industria petrolera considera que la calibración del tanque y la correcta elaboración de sus tablas constituyen requisitos esenciales para garantizar la confiabilidad de las mediciones empleadas en operaciones comerciales de alto valor económico (Patel et al., 2020).

Las tablas de calibración no representan únicamente una conversión geométrica entre altura y volumen, sino que incorporan diferentes correcciones destinadas a compensar los efectos físicos que modifican la capacidad del tanque durante su operación. Entre estas correcciones destacan la expansión térmica del acero, la deformación ocasionada por la presión hidrostática del líquido, la inclinación longitudinal o transversal del tanque y la presencia de estructuras internas conocidas como deadwood. La incorporación de estos factores permite reducir la incertidumbre de las mediciones y mejorar la representatividad de los volúmenes calculados bajo diferentes condiciones operativas (Energy Institute, 2000).

En los buques petroleros, las tablas de calibración adquieren una importancia aún mayor debido a que las condiciones de navegación modifican continuamente la posición y estabilidad de la embarcación. Factores como el trim, la escora (list), las deformaciones del casco y el movimiento generado por el oleaje alteran la distribución del hidrocarburo dentro de los tanques de carga, haciendo necesario aplicar correcciones adicionales para estimar correctamente el volumen contenido. En consecuencia, las tablas utilizadas a bordo deben complementarse con procedimientos específicos establecidos por las normas internacionales para compensar estas variaciones dinámicas y garantizar la confiabilidad de las mediciones durante la transferencia de custodia (ISO 7507-1, 2003).

La evolución tecnológica ha impulsado el desarrollo de nuevas metodologías para la calibración de tanques basadas en sistemas robotizados, sensores láser y tecnologías

tridimensionales de adquisición de datos. Estas técnicas permiten obtener modelos geométricos de alta resolución con menor intervención humana y reducen significativamente el tiempo requerido para elaborar las tablas de capacidad. Investigaciones recientes demuestran que los métodos automatizados ofrecen incertidumbres inferiores a las obtenidas mediante procedimientos tradicionales, contribuyendo a mejorar la precisión de las mediciones utilizadas en operaciones de transferencia de custodia y reduciendo las pérdidas económicas asociadas a errores de calibración (Patel et al., 2020).

La administración de las tablas de calibración constituye otro aspecto fundamental dentro de la gestión metrológica de instalaciones petroleras. Las normas internacionales recomiendan verificar periódicamente la vigencia de las tablas y realizar recalibraciones cuando se presenten modificaciones estructurales del tanque, asentamientos de la cimentación, reparaciones importantes o cambios que puedan alterar su capacidad volumétrica. Asimismo, los registros históricos de calibración deben conservarse como evidencia documental para respaldar auditorías técnicas y resolver posibles controversias derivadas de discrepancias en las cantidades transferidas durante operaciones comerciales (ISO 7507-1, 2003).

En el contexto de la presente investigación, las tablas de calibración representan uno de los principales insumos para el desarrollo del sistema integral basado en Wolfram Mathematica. La automatización propuesta contempla la incorporación digital de dichas tablas con el fin de transformar automáticamente las mediciones de nivel en volúmenes observados, aplicar las correcciones establecidas por las normas API e ISO y generar resultados consistentes durante las operaciones de transferencia de custodia. La integración de esta información dentro de un modelo computacional permitirá reducir errores derivados de consultas manuales, mejorar la trazabilidad de los cálculos y fortalecer la confiabilidad de las mediciones realizadas en los buques petroleros.

12. Correcciones volumétricas en hidrocarburos

Las correcciones volumétricas constituyen un procedimiento indispensable en la medición de hidrocarburos líquidos, ya que el volumen de un producto petrolero varía continuamente en función de la temperatura y la presión a las que se encuentra sometido. Debido a que las transacciones comerciales requieren expresar las cantidades bajo condiciones de referencia estandarizadas, es necesario aplicar factores de corrección que permitan convertir el volumen observado durante la medición al volumen correspondiente en condiciones base. Este procedimiento garantiza la uniformidad de los resultados, facilita la comparación entre diferentes sistemas de medición y reduce las discrepancias derivadas de las propiedades termodinámicas de los hidrocarburos (ISO 91:2017; ASTM D1250-19).

La expansión térmica representa uno de los fenómenos físicos que mayor influencia ejerce sobre el volumen de los hidrocarburos. A medida que aumenta la temperatura, la energía cinética de las moléculas incrementa la separación intermolecular, provocando un aumento del volumen ocupado por el líquido. De forma inversa, una disminución de la temperatura produce una contracción volumétrica. Esta variación depende de la composición química del producto, su densidad y su coeficiente de expansión térmica, razón por la cual diferentes tipos de crudo y combustibles requieren factores de corrección específicos para expresar sus volúmenes bajo condiciones de referencia internacionalmente aceptadas (ASTM D1250-19).

Además de la temperatura, la presión también modifica el volumen de los hidrocarburos debido a la compresibilidad natural de los líquidos. Aunque este efecto suele ser menor que el provocado por la temperatura, adquiere importancia en sistemas sometidos a presiones elevadas, como oleoductos, estaciones de bombeo y procesos dinámicos de transferencia de custodia. Para compensar esta variación, los estándares internacionales incorporan el Correction for Pressure on Liquid (CPL), el cual ajusta el volumen medido considerando la presión efectiva durante la operación y la compresibilidad del producto. La combinación simultánea de las correcciones por temperatura y presión permite obtener

el denominado Correction for Temperature and Pressure of Liquid (CTPL), ampliamente utilizado en los sistemas modernos de medición fiscal (API MPMS Chapter 11.1; ASTM D1250-19).

La aplicación de factores de corrección volumétrica constituye un requisito esencial durante las operaciones de transferencia de custodia, ya que comprador y vendedor deben establecer las cantidades comerciales bajo una condición de referencia común, independientemente de la temperatura y presión existentes durante la medición. Diversos estudios sobre incertidumbre en mediciones fiscales han demostrado que la utilización incorrecta de los factores CTL y CPL puede generar diferencias superiores a los límites máximos permisibles establecidos para operaciones comerciales, incrementando el riesgo de reclamaciones económicas entre las partes involucradas. Por ello, los computadores de flujo y los sistemas de cálculo volumétrico implementan automáticamente los algoritmos establecidos por las tablas API y ASTM para minimizar la intervención del operador y garantizar la consistencia de los resultados (Souza Filho et al., 2021).

Las tablas de corrección volumétrica desarrolladas conjuntamente por el American Petroleum Institute (API) y ASTM International constituyen actualmente el estándar internacional para la conversión de volúmenes de hidrocarburos líquidos. Estas tablas emplean algoritmos matemáticos basados en la densidad de referencia del producto y permiten calcular factores como CTL, CPL, CTPL y VCF (Volume Correction Factor) para diferentes categorías de crudos, productos refinados y aceites lubricantes. A diferencia de las antiguas tablas impresas, las versiones actuales utilizan procedimientos computacionales que incrementan la precisión de los cálculos y reducen los errores derivados de interpolaciones manuales (ASTM D1250-19; API MPMS Chapter 11.1).

La digitalización de las operaciones de medición ha permitido integrar los algoritmos de corrección volumétrica dentro de computadores de flujo, sistemas SCADA y plataformas especializadas de medición fiscal. Estos sistemas reciben automáticamente la información proveniente de sensores de temperatura, presión, densidad y caudal, ejecutando en tiempo real las correcciones establecidas por las normas internacionales. La automatización

disminuye significativamente la probabilidad de errores humanos, mejora la repetibilidad de los cálculos y fortalece la trazabilidad de las operaciones de transferencia de custodia, aspectos fundamentales para garantizar la confiabilidad de las mediciones en la industria petrolera (API MPMS Chapter 11.1; ISO 91:2017).

En la presente investigación, las correcciones volumétricas constituyen la base matemática sobre la cual se desarrollará el sistema integral utilizando Wolfram Mathematica. La automatización propuesta permitirá incorporar los algoritmos correspondientes a los factores CTL, CPL y CTPL, procesando automáticamente las variables medidas en campo para obtener volúmenes corregidos conforme a los estándares internacionales. De esta manera, el sistema contribuirá a disminuir errores asociados al cálculo manual, incrementar la confiabilidad de las mediciones y fortalecer la transparencia de las operaciones de transferencia de custodia realizadas en buques petroleros, facilitando la toma de decisiones basada en información metrológicamente confiable (API MPMS Chapter 11.1; ISO 91:2017).

13. Medición de calados y estabilidad del buque

La medición de calados constituye uno de los procedimientos fundamentales en las operaciones marítimas de transferencia de hidrocarburos, ya que permite determinar el desplazamiento del buque y, en consecuencia, estimar la masa de carga transportada mediante el método conocido como Draft Survey. Este procedimiento es ampliamente utilizado para verificar las cantidades cargadas o descargadas cuando no es posible emplear sistemas de medición directa o cuando se requiere validar los resultados obtenidos mediante otros métodos de transferencia de custodia. La confiabilidad de esta técnica depende de la precisión con la que se determinan los calados, de la correcta aplicación de las correcciones hidrostáticas y del conocimiento de las características geométricas de la embarcación. Debido a ello, organismos internacionales como la International Maritime Organization (IMO) y diversas sociedades de clasificación establecen procedimientos específicos para la ejecución de estas mediciones,

garantizando uniformidad y trazabilidad en los resultados obtenidos (Mourtzis et al., 2025).

El calado corresponde a la distancia vertical comprendida entre la línea base o quilla del buque y la superficie del agua sobre la cual flota la embarcación. Este parámetro refleja directamente el desplazamiento del buque, ya que aumenta conforme se incrementa la cantidad de carga transportada y disminuye durante las operaciones de descarga. La lectura precisa del calado permite conocer la posición real del casco respecto al nivel del mar y constituye una variable indispensable para determinar el desplazamiento utilizando las tablas hidrostáticas suministradas por el astillero constructor. Investigaciones recientes destacan que errores de pocos milímetros en la lectura del calado pueden traducirse en diferencias de varias toneladas durante la estimación de la carga, especialmente en buques petroleros de gran porte, lo que evidencia la importancia de aplicar procedimientos de medición rigurosos y estandarizados (Mourtzis et al., 2025).

La determinación del desplazamiento mediante el método de Draft Survey se fundamenta en el principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo flotante desplaza un volumen de agua cuyo peso es igual al peso total del buque. A partir de este principio, la masa de la carga transportada puede calcularse comparando el desplazamiento de la embarcación antes y después de las operaciones de carga o descarga, considerando además el peso del combustible, agua de lastre, provisiones y demás consumibles presentes a bordo. Este procedimiento resulta particularmente útil durante operaciones de transferencia de hidrocarburos a granel, donde la elevada capacidad de carga de las embarcaciones dificulta la utilización de métodos alternativos de verificación de cantidades. Su aplicación requiere el empleo de tablas hidrostáticas certificadas y procedimientos normalizados que minimicen la incertidumbre de las estimaciones realizadas (Biran & López-Pulido, 2014).

La precisión de las mediciones de calado depende de múltiples factores ambientales y operacionales que deben controlarse durante la inspección. Entre ellos destacan el estado del mar, el oleaje, las corrientes, el viento, la densidad del agua, la visibilidad de las

marcas de calado y la estabilidad del buque durante la lectura. Las variaciones de estos parámetros pueden dificultar la identificación exacta de la línea de flotación e introducir errores sistemáticos en la determinación del desplazamiento. Por esta razón, las inspecciones suelen ejecutarse cuando las condiciones meteorológicas son favorables y el buque permanece estabilizado en el muelle o fondeadero, reduciendo la influencia de perturbaciones externas sobre la medición (Rawson & Tupper, 2001).

Las marcas de calado instaladas en la proa, la sección media y la popa del buque constituyen la referencia principal para efectuar las lecturas. Estas marcas se encuentran grabadas permanentemente sobre ambas bandas del casco y presentan una separación vertical normalizada que facilita la determinación de la profundidad de inmersión de la embarcación. Durante la inspección se registran normalmente seis lecturas independientes —proa, centro y popa en ambas bandas— con el propósito de calcular posteriormente el calado medio y aplicar las correcciones correspondientes por trimado y escora. La utilización de múltiples puntos de medición permite reducir la influencia de irregularidades locales del casco y mejorar la representatividad de los resultados obtenidos (Barrass & Derrett, 2012).

En la actualidad, el desarrollo tecnológico ha impulsado la incorporación de sistemas digitales para la medición del calado mediante cámaras de alta resolución, sensores láser, visión artificial y vehículos aéreos no tripulados (UAV). Estas tecnologías permiten automatizar parcialmente el proceso de lectura, disminuir la subjetividad asociada a la inspección visual y mejorar la precisión de las mediciones en condiciones operacionales complejas. Diversos estudios recientes demuestran que la integración de algoritmos de procesamiento de imágenes con modelos hidrostáticos puede reducir significativamente la incertidumbre del método tradicional de Draft Survey, constituyendo una alternativa prometedora para la digitalización de las operaciones de transferencia de custodia en la industria marítima (Mourtzis et al., 2025).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

1. Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que el problema planteado se aborda mediante el análisis, procesamiento e interpretación de variables numéricas relacionadas con la medición volumétrica de hidrocarburos durante las operaciones de transferencia de custodia realizadas en buques petroleros. Este enfoque permite modelar matemáticamente los procedimientos establecidos por las normas internacionales, automatizar los cálculos mediante herramientas computacionales y evaluar objetivamente el desempeño del sistema desarrollado a través de indicadores de precisión, exactitud, tiempo de procesamiento y confiabilidad. La utilización de datos cuantificables facilita la comparación entre los resultados obtenidos mediante procedimientos convencionales y aquellos generados automáticamente por el sistema implementado en Wolfram Mathematica, permitiendo determinar el impacto de la automatización sobre la calidad de las mediciones (Creswell & Creswell, 2023).

El enfoque cuantitativo resulta adecuado para investigaciones orientadas al desarrollo de herramientas computacionales, ya que permite representar matemáticamente fenómenos físicos mediante algoritmos, ecuaciones y modelos de cálculo. En el presente estudio, variables como nivel del líquido, temperatura, presión, densidad, gravedad API, volumen observado, volumen estándar y factores de corrección volumétrica fueron tratadas como variables numéricas susceptibles de procesamiento computacional. Esta característica hizo posible implementar algoritmos automatizados basados en las normas API MPMS, ASTM e ISO, reduciendo la intervención manual y mejorando la reproducibilidad de los resultados obtenidos durante las operaciones de transferencia de custodia (Montgomery & Runger, 2018).

Adicionalmente, el enfoque cuantitativo permitió validar el sistema mediante la comparación objetiva entre los resultados obtenidos con el procedimiento tradicional y los generados por la herramienta desarrollada en Wolfram Mathematica. Para ello se

emplearon indicadores de desempeño como el tiempo de procesamiento, el error absoluto, el error relativo y la consistencia de los resultados respecto a los procedimientos establecidos por las normas internacionales. Este proceso de validación proporcionó evidencia objetiva sobre la capacidad del sistema para optimizar los cálculos volumétricos y reducir la probabilidad de errores durante las operaciones de medición de hidrocarburos (Hair et al., 2022).

2. Tipo de investigación

La investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, ya que tiene como finalidad desarrollar una solución tecnológica orientada a resolver un problema específico relacionado con la automatización de los cálculos empleados durante la medición volumétrica de hidrocarburos en buques petroleros. A diferencia de la investigación básica, cuyo propósito principal consiste en generar nuevos conocimientos teóricos, la investigación aplicada busca utilizar dichos conocimientos para diseñar herramientas, metodologías o tecnologías que contribuyan a mejorar procesos existentes. En este caso, el producto final consiste en un sistema computacional desarrollado en Wolfram Mathematica que integra procedimientos matemáticos y normas internacionales para optimizar las operaciones de transferencia de custodia (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

Asimismo, la investigación posee un carácter tecnológico, debido a que combina conocimientos de ingeniería petrolera, metrología, programación científica y modelado matemático para desarrollar una aplicación informática capaz de automatizar procesos tradicionalmente ejecutados de forma manual. La incorporación de algoritmos para el cálculo de factores de corrección volumétrica, conversión de volúmenes, determinación de gravedad API y generación automática de reportes representa una innovación tecnológica orientada a incrementar la eficiencia, reducir la incertidumbre de las mediciones y fortalecer la trazabilidad de la información generada durante las operaciones de transferencia de custodia (Pressman & Maxim, 2020).

Desde el punto de vista de su alcance, la investigación se clasifica como descriptiva y propositiva. Es descriptiva porque analiza las variables, procedimientos, instrumentos y normas técnicas involucradas en la medición volumétrica de hidrocarburos, permitiendo comprender las relaciones existentes entre los diferentes elementos del proceso. Simultáneamente, es propositiva porque plantea el diseño, desarrollo e implementación de un sistema computacional orientado a mejorar la confiabilidad y eficiencia de las operaciones de medición mediante la automatización de cálculos basados en estándares internacionales (Arias, 2021).

3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que las variables objeto de estudio no fueron manipuladas deliberadamente por el investigador, sino observadas y analizadas dentro de su contexto operativo habitual. El estudio se centró en comprender los procedimientos utilizados durante la medición volumétrica de hidrocarburos y en desarrollar una herramienta computacional capaz de automatizar dichos procedimientos sin modificar las condiciones bajo las cuales se ejecutan las operaciones de transferencia de custodia. Este tipo de diseño resulta apropiado cuando el objetivo consiste en analizar procesos existentes y desarrollar soluciones tecnológicas basadas en información previamente establecida (Kerlinger & Lee, 2002).

Además, la investigación presenta un diseño transversal, ya que la recopilación de la información necesaria para el desarrollo y validación del sistema se realizó durante un periodo específico, sin efectuar seguimiento longitudinal de las variables analizadas. La información obtenida mediante la revisión documental de las normas API MPMS, ASTM e ISO, junto con el análisis de procedimientos operativos y casos de estudio, permitió construir el modelo matemático implementado en Wolfram Mathematica y evaluar su funcionamiento mediante pruebas controladas de procesamiento de datos (Creswell & Creswell, 2023).

4. Desarrollo metodológico del sistema

El desarrollo del sistema computacional se realizó mediante una metodología estructurada basada en el modelo en cascada (Waterfall Model), debido a que los requerimientos funcionales del sistema fueron claramente identificados desde el inicio de la investigación a partir de las normas internacionales aplicables a la medición volumétrica de hidrocarburos y de los procedimientos técnicos empleados durante las operaciones de transferencia de custodia. Este modelo permitió organizar el desarrollo del software en fases secuenciales, facilitando la planificación, implementación, validación y documentación de cada uno de los módulos que conforman la herramienta computacional desarrollada en Wolfram Mathematica. La utilización de una metodología estructurada favoreció además la trazabilidad entre los requerimientos identificados, los algoritmos implementados y los resultados obtenidos durante la validación del sistema (Pressman & Maxim, 2020).

La metodología seleccionada comprende cinco fases principales: análisis de requerimientos, diseño del sistema, desarrollo del algoritmo matemático, implementación computacional y validación funcional. Cada fase fue ejecutada de manera secuencial, permitiendo que los productos obtenidos en una etapa constituyeran la base para el desarrollo de la siguiente. Esta estructura facilitó la organización del proyecto, redujo la probabilidad de inconsistencias durante la programación y permitió verificar progresivamente el cumplimiento de los objetivos específicos planteados en la investigación (Sommerville, 2016).

El empleo del modelo en cascada resulta apropiado para proyectos donde las especificaciones técnicas se encuentran claramente definidas desde el inicio. En el presente estudio, los procedimientos matemáticos utilizados para la determinación del volumen estándar, la aplicación de factores de corrección volumétrica y la generación de reportes se encuentran establecidos por normas internacionales como el API Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS), ASTM D1250 e ISO 91, lo que reduce significativamente la incertidumbre durante el diseño del software y facilita la

implementación de algoritmos consistentes con los estándares utilizados por la industria petrolera (API, 2023).

Fase I. Análisis de requerimientos

La primera fase consistió en identificar los requerimientos funcionales y no funcionales que debía satisfacer el sistema computacional. Para ello se realizó una revisión exhaustiva de las normas técnicas relacionadas con la medición volumétrica de hidrocarburos, así como de los procedimientos utilizados durante las operaciones de transferencia de custodia en buques petroleros. Este análisis permitió establecer las variables de entrada necesarias para ejecutar los cálculos volumétricos, las operaciones matemáticas requeridas y los resultados que debía generar el sistema como apoyo a la toma de decisiones durante las operaciones de medición (ISO, 2017).

Entre los requerimientos funcionales identificados se incluyeron la captura de datos de medición, cálculo automático del volumen observado, aplicación de factores de corrección por temperatura y presión, determinación del volumen estándar, cálculo de gravedad API, conversión entre unidades, incorporación de tablas de calibración, generación automática de reportes y almacenamiento de los resultados obtenidos durante cada operación. Estos requerimientos fueron definidos considerando los procedimientos establecidos por las normas internacionales y las necesidades operativas identificadas durante el análisis documental de la investigación (ASTM International, 2019).

Los requerimientos no funcionales estuvieron relacionados con aspectos como facilidad de uso, confiabilidad, precisión numérica, velocidad de procesamiento, facilidad de mantenimiento y capacidad de ampliación del sistema. Asimismo, se estableció que la aplicación debía presentar una interfaz gráfica intuitiva que facilitara el ingreso de información por parte del usuario y permitiera visualizar de manera clara los resultados obtenidos durante cada cálculo. Estas

características buscan mejorar la experiencia del operador y reducir la probabilidad de errores asociados a la introducción manual de datos (Pressman & Maxim, 2020).

Fase II. Diseño del sistema

Con base en los requerimientos definidos, se diseñó la arquitectura funcional del sistema utilizando un enfoque modular. Cada módulo fue desarrollado para ejecutar una función específica dentro del proceso de medición volumétrica, permitiendo la independencia entre componentes y facilitando futuras actualizaciones del software. Esta estructura modular favorece la reutilización del código, simplifica las tareas de mantenimiento y permite incorporar nuevos procedimientos de cálculo sin afectar el funcionamiento general de la aplicación (Sommerville, 2016).

El diseño contempla módulos independientes para el ingreso de datos, validación de información, aplicación de factores de corrección volumétrica, procesamiento matemático, administración de tablas de calibración, cálculo del volumen estándar y generación de reportes técnicos. La interacción entre estos módulos se realiza mediante estructuras de datos definidas previamente, garantizando la consistencia de la información durante todo el proceso de cálculo. Esta organización mejora la eficiencia computacional y reduce la posibilidad de inconsistencias entre las diferentes etapas del procesamiento (Gamma et al., 1994).

Como parte del diseño se elaboró un diagrama de flujo general que representa la secuencia lógica seguida por el sistema desde el ingreso de los datos hasta la generación del informe final. Este diagrama constituye la base para la programación de los algoritmos implementados posteriormente en Wolfram Mathematica y facilita la comprensión del funcionamiento interno de la aplicación por parte de futuros desarrolladores o usuarios especializados.

Fase III. Desarrollo del algoritmo matemático

Una vez definidos los requerimientos funcionales y establecida la arquitectura del sistema, se procedió al desarrollo del algoritmo matemático encargado de automatizar los cálculos volumétricos utilizados durante las operaciones de transferencia de custodia de hidrocarburos. Esta fase constituyó el componente central de la investigación, debido a que permitió transformar los procedimientos establecidos por las normas internacionales en una secuencia lógica de operaciones computacionales ejecutadas mediante Wolfram Mathematica. El algoritmo fue diseñado bajo criterios de modularidad, precisión numérica y trazabilidad de los resultados, garantizando que cada cálculo pudiera verificarse y reproducirse de manera consistente (Wolfram Research, 2024).

El diseño del algoritmo inició con la identificación de todas las variables necesarias para el procesamiento de la información. Entre las variables de entrada se consideraron el nivel del producto, temperatura observada, presión de operación, gravedad API, densidad, volumen observado, volumen de agua libre, trim, escora (*list*) y los datos contenidos en las tablas de calibración de los tanques. Estas variables fueron seleccionadas debido a que intervienen directamente en la determinación del volumen estándar y en la aplicación de los factores de corrección establecidos por las normas internacionales para la medición de hidrocarburos líquidos (American Petroleum Institute [API], 2023).

Posteriormente, se estableció la secuencia lógica de procesamiento mediante un algoritmo estructurado que organiza las operaciones matemáticas en diferentes módulos independientes. Cada módulo fue desarrollado para ejecutar una función específica, permitiendo validar la información de entrada, efectuar los cálculos correspondientes y transferir automáticamente los resultados al siguiente proceso. Esta arquitectura modular facilita la actualización del sistema, simplifica el mantenimiento del código y permite incorporar nuevas funcionalidades sin

modificar la estructura general de la aplicación, siguiendo los principios de la ingeniería de software orientada a componentes (Gamma et al., 1994).

El primer módulo del algoritmo corresponde a la validación de datos. En esta etapa el sistema verifica que la información ingresada por el usuario cumpla con los rangos permitidos para cada variable, evitando que errores de digitación o valores inconsistentes afecten el procesamiento posterior. Asimismo, se comprueba la disponibilidad de las tablas de calibración correspondientes al tanque seleccionado y la integridad de los datos requeridos para ejecutar los cálculos volumétricos. La implementación de controles automáticos durante esta fase mejora la confiabilidad del sistema y reduce significativamente la probabilidad de errores operacionales (Sommerville, 2016).

El segundo módulo ejecuta los cálculos relacionados con la determinación del volumen observado mediante la consulta automática de las tablas de calibración del tanque. A partir del nivel medido por los instrumentos de campo, el sistema identifica el volumen correspondiente y aplica las correcciones necesarias derivadas del trim y la escora del buque cuando estas condiciones se encuentran presentes. Posteriormente, el algoritmo incorpora la información correspondiente a la temperatura, presión y densidad del producto para preparar los datos requeridos durante la aplicación de los factores de corrección volumétrica establecidos por las normas API MPMS e ISO 91 (International Organization for Standardization [ISO], 2017).

El tercer módulo corresponde a la aplicación automática de los factores de corrección volumétrica. En esta etapa el algoritmo calcula el Correction for the Effect of Temperature on Liquid (CTL), el Correction for the Effect of Pressure on Liquid (CPL) y el Combined Temperature and Pressure Correction Factor (CTPL), utilizando los procedimientos matemáticos establecidos por las tablas internacionales de medición de hidrocarburos. Posteriormente, estos factores son aplicados al volumen observado para obtener el volumen estándar bajo las

condiciones de referencia internacionalmente aceptadas, garantizando uniformidad en los resultados generados por el sistema (ASTM International, 2019).

El cuarto módulo desarrolla los cálculos complementarios relacionados con la gravedad API, densidad corregida, volumen de agua libre, volumen neto estándar y demás parámetros requeridos para elaborar el reporte técnico de transferencia de custodia. Todos los cálculos fueron programados utilizando funciones propias del lenguaje Wolfram Language, aprovechando su elevada capacidad para el procesamiento simbólico, la manipulación de matrices y la ejecución eficiente de operaciones matemáticas complejas. Esta característica permitió reducir considerablemente los tiempos de procesamiento respecto a los procedimientos manuales tradicionalmente empleados en la industria (Wolfram Research, 2024).

Finalmente, el algoritmo incorpora un módulo destinado a la generación automática de reportes. Una vez concluidos todos los cálculos, el sistema organiza los resultados en un formato estructurado que incluye las variables de entrada, los factores de corrección aplicados, los resultados intermedios y el volumen estándar obtenido. Asimismo, genera un registro digital de cada operación que facilita la trazabilidad de la información, la revisión posterior de los cálculos y el almacenamiento histórico de las mediciones realizadas. Esta funcionalidad fortalece la transparencia de las operaciones de transferencia de custodia y constituye uno de los principales aportes tecnológicos del sistema desarrollado en la presente investigación (Pressman & Maxim, 2020).

Fase IV. Validación del sistema

La fase de validación tuvo como objetivo comprobar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado en Wolfram Mathematica, verificando que los resultados generados por la aplicación fueran consistentes con los procedimientos establecidos por las normas internacionales para la medición volumétrica de

hidrocarburos. Esta etapa permitió evaluar la exactitud de los algoritmos implementados, la estabilidad del procesamiento computacional y la confiabilidad de los resultados obtenidos durante la automatización de los cálculos empleados en las operaciones de transferencia de custodia. La validación constituye un proceso esencial dentro del desarrollo de software científico, ya que proporciona evidencia objetiva sobre la capacidad del sistema para satisfacer los requerimientos funcionales definidos durante la fase de análisis (IEEE, 2021).

Para la validación del sistema se empleó una estrategia de comparación entre los resultados obtenidos mediante el procedimiento tradicional de cálculo y aquellos generados automáticamente por la aplicación desarrollada. Los datos utilizados durante este proceso correspondieron a casos de estudio contruidos a partir de ejemplos contenidos en las normas API MPMS, tablas de calibración de tanques, procedimientos normalizados de medición y escenarios representativos de operaciones de transferencia de custodia. Esta metodología permitió comprobar que las ecuaciones implementadas reproducían correctamente los cálculos establecidos por la normativa internacional y garantizaban resultados consistentes para diferentes condiciones operacionales (ISO, 2017).

El proceso de validación contempló inicialmente la verificación individual de cada uno de los módulos desarrollados. Se evaluó el funcionamiento del módulo de ingreso de datos, la correcta lectura de las tablas de calibración, la aplicación de los factores de corrección volumétrica, el cálculo del volumen estándar, la determinación de la gravedad API y la generación automática de reportes. Esta validación modular permitió detectar oportunamente posibles inconsistencias durante el desarrollo del software y facilitó la corrección de errores antes de integrar todos los componentes dentro de la aplicación definitiva (Pressman & Maxim, 2020).

Posteriormente se efectuó una validación integral del sistema utilizando diferentes escenarios de operación. Para cada caso de estudio se ingresaron los valores

correspondientes al nivel del líquido, temperatura observada, presión de operación, densidad, gravedad API y demás variables requeridas por el algoritmo. Los resultados obtenidos fueron comparados con los cálculos realizados mediante los procedimientos manuales establecidos por las normas API MPMS, verificando la coincidencia entre ambos métodos y cuantificando las diferencias observadas. Este procedimiento permitió demostrar la correcta implementación de las ecuaciones matemáticas y la estabilidad del algoritmo desarrollado (ASTM International, 2019).

Como parte del proceso de evaluación se utilizaron indicadores cuantitativos destinados a medir el desempeño del sistema. Entre los principales indicadores considerados se encuentran el error absoluto, el error relativo, el tiempo de procesamiento, la exactitud de los resultados y la repetibilidad de los cálculos. El error absoluto permitió determinar la diferencia numérica entre los resultados obtenidos mediante el procedimiento manual y el sistema automatizado, mientras que el error relativo expresó dicha diferencia en términos porcentuales. La repetibilidad se evaluó ejecutando múltiples veces los mismos cálculos bajo condiciones idénticas, verificando que el sistema produjera resultados consistentes durante todas las pruebas realizadas (Montgomery & Runger, 2018).

La eficiencia computacional también fue considerada como un criterio de validación, debido a que uno de los objetivos principales del sistema consiste en reducir el tiempo requerido para ejecutar los cálculos volumétricos. Para ello se comparó el tiempo promedio empleado por un operador para desarrollar manualmente una operación completa de transferencia de custodia con el tiempo requerido por la aplicación desarrollada en Wolfram Mathematica. Los resultados esperados indican una reducción significativa del tiempo de procesamiento, permitiendo automatizar tareas repetitivas y disminuir la probabilidad de errores asociados al cálculo manual, lo cual representa una ventaja operativa importante

para las empresas dedicadas al transporte y comercialización de hidrocarburos (Sommerville, 2016).

Otro aspecto evaluado durante la validación fue la confiabilidad de la interfaz gráfica desarrollada para el ingreso y procesamiento de la información. Se verificó el funcionamiento de los controles de validación, la correcta presentación de mensajes de error, la consistencia de los resultados mostrados al usuario y la generación automática de reportes técnicos. Estas pruebas permitieron comprobar que la aplicación presenta un comportamiento estable y proporciona una interacción intuitiva con el operador, favoreciendo su utilización durante operaciones reales de transferencia de custodia (Nielsen, 2020).

Finalmente, los resultados obtenidos durante el proceso de validación permitieron concluir que el sistema desarrollado satisface los requerimientos funcionales establecidos al inicio de la investigación. La correcta implementación de los algoritmos matemáticos, la reducción del tiempo de procesamiento, la disminución de errores asociados al cálculo manual y la capacidad para generar reportes técnicos automáticos evidencian que la herramienta propuesta constituye una alternativa tecnológica viable para optimizar las operaciones de medición volumétrica en buques petroleros. En consecuencia, la validación confirma que el sistema desarrollado puede contribuir al fortalecimiento de la confiabilidad metrológica y a la mejora de los procesos de transferencia de custodia en la industria petrolera (IEEE, 2021; Pressman & Maxim, 2020).

Fase V. Implementación y puesta en funcionamiento del sistema

Una vez finalizadas las etapas de análisis, diseño, desarrollo y validación, se procedió a la implementación del sistema computacional desarrollado en Wolfram Mathematica. Esta fase tuvo como finalidad integrar todos los módulos previamente programados dentro de una aplicación funcional, capaz de ejecutar de manera automática los cálculos volumétricos requeridos durante las

operaciones de transferencia de custodia de hidrocarburos en buques petroleros. La implementación contempló la incorporación de interfaces gráficas para el ingreso de información, algoritmos matemáticos para el procesamiento de datos, módulos de validación y herramientas para la generación automática de reportes técnicos. La integración de estos componentes permitió disponer de una plataforma unificada orientada a mejorar la eficiencia, precisión y trazabilidad de las mediciones volumétricas (Wolfram Research, 2024).

La arquitectura del sistema fue diseñada siguiendo un enfoque modular, lo que permitió dividir el procesamiento de la información en diferentes componentes especializados. Esta estructura facilita la independencia funcional de cada módulo, simplifica las tareas de mantenimiento y permite incorporar futuras actualizaciones sin afectar el funcionamiento general de la aplicación. La modularidad constituye una práctica ampliamente recomendada en el desarrollo de software científico, ya que favorece la reutilización de código, mejora la escalabilidad del sistema y facilita la identificación de posibles errores durante las actividades de mantenimiento y evolución del software (Bass, Clements, & Kazman, 2022).

El módulo de captura de información fue diseñado para registrar todas las variables requeridas durante una operación de transferencia de custodia. Entre los datos ingresados por el usuario se encuentran el nombre del buque, identificación del tanque, nivel observado, temperatura del producto, presión de operación, gravedad API, densidad, volumen de agua libre, condiciones de trim y escora, así como cualquier otra información requerida por las normas internacionales de medición. Antes de iniciar el procesamiento matemático, el sistema ejecuta rutinas automáticas de validación destinadas a verificar la consistencia de los datos y detectar posibles errores de digitación o valores fuera de los rangos permitidos (ISO/IEC 25010, 2011).

Posteriormente, la información validada es enviada al módulo de procesamiento matemático, donde se ejecutan automáticamente los algoritmos implementados para determinar el volumen observado, consultar las tablas de calibración del tanque, aplicar los factores de corrección volumétrica y calcular el volumen estándar bajo condiciones de referencia. Este procesamiento se realiza mediante funciones desarrolladas en el lenguaje Wolfram Language, aprovechando sus capacidades para el cálculo numérico, manipulación de estructuras de datos y evaluación simbólica de expresiones matemáticas complejas. La utilización de esta plataforma permitió reducir significativamente el tiempo requerido para efectuar los cálculos respecto a los procedimientos manuales tradicionalmente empleados durante la transferencia de custodia (Wolfram, 2023).

Como parte de la implementación, el sistema incorpora un módulo especializado para la administración de tablas de calibración de tanques. Dicho módulo permite almacenar digitalmente las tablas volumétricas correspondientes a diferentes embarcaciones, realizar búsquedas automáticas de los valores asociados al nivel medido e interpolar resultados cuando las lecturas no coinciden exactamente con los valores registrados en la tabla. Esta funcionalidad elimina la necesidad de realizar consultas manuales, disminuye la probabilidad de errores de interpretación y mejora la velocidad del procesamiento de la información durante las operaciones de medición (API, 2023).

La aplicación también incorpora un módulo de generación automática de reportes técnicos que organiza la información procesada en formatos estructurados para facilitar su interpretación y almacenamiento. Los reportes incluyen las variables de entrada, los factores de corrección aplicados, los resultados obtenidos durante cada etapa del procesamiento, la determinación del volumen estándar y la identificación de la operación realizada. Asimismo, el sistema genera registros digitales que fortalecen la trazabilidad documental y facilitan futuras auditorías

técnicas relacionadas con la transferencia de custodia de hidrocarburos (ISO 9001, 2015).

Con el propósito de mejorar la experiencia del usuario, la interfaz gráfica fue desarrollada bajo criterios de simplicidad, claridad y facilidad de operación. La distribución de los controles permite ingresar información de manera secuencial siguiendo el flujo natural de una operación de medición, mientras que los mensajes generados por el sistema orientan al operador durante cada etapa del proceso. La incorporación de mecanismos automáticos de validación, notificaciones de error y confirmación de resultados contribuye a disminuir la probabilidad de equivocaciones durante el ingreso de datos y fortalece la confiabilidad del sistema en aplicaciones operativas (Shneiderman et al., 2018).

Finalmente, la implementación del sistema desarrollado en Wolfram Mathematica demuestra la viabilidad de integrar procedimientos metrológicos, algoritmos matemáticos y estándares internacionales dentro de una única plataforma computacional orientada a la automatización de la medición volumétrica de hidrocarburos. La arquitectura propuesta permite disminuir los tiempos de procesamiento, reducir la intervención manual, fortalecer la trazabilidad de los cálculos y mejorar la confiabilidad de las operaciones de transferencia de custodia. Estas características convierten al sistema en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones técnicas y comerciales dentro de la industria petrolera, constituyendo el principal aporte tecnológico de la presente investigación (Pressman & Maxim, 2020).

5. Técnicas e instrumentos de recolección de información

La recopilación de la información utilizada durante la investigación se efectuó mediante técnicas de revisión documental, análisis técnico y simulación computacional. La revisión documental permitió identificar las normas internacionales, procedimientos de medición y fundamentos metrológicos aplicables a las operaciones de transferencia de custodia de

hidrocarburos. Paralelamente, el análisis técnico facilitó la identificación de las variables que intervienen en los cálculos volumétricos y los requerimientos funcionales del sistema desarrollado. Finalmente, la simulación computacional permitió evaluar el comportamiento de los algoritmos implementados mediante casos de estudio representativos de operaciones reales (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

Los principales instrumentos utilizados durante la investigación fueron las normas API MPMS, ASTM D1250, ISO 91, tablas de calibración de tanques, documentación técnica relacionada con medición de hidrocarburos y el software Wolfram Mathematica, empleado para desarrollar, implementar y validar el sistema propuesto. Asimismo, se utilizaron equipos informáticos para la programación de los algoritmos, procesamiento de datos y generación de reportes técnicos derivados de las pruebas efectuadas durante la validación del sistema (API, 2023).

RESULTADOS

El presente capítulo expone los resultados obtenidos durante el desarrollo, implementación y validación del sistema computacional diseñado en **Wolfram Mathematica** para la automatización de los cálculos de medición volumétrica aplicados a las operaciones de transferencia de custodia de hidrocarburos en buques petroleros. Se presentan los resultados derivados de la implementación de los algoritmos matemáticos, la integración de las normas API MPMS, ASTM e ISO, así como la evaluación del desempeño del sistema mediante casos de estudio representativos de operaciones reales. Posteriormente, los resultados obtenidos son analizados y comparados con los procedimientos convencionales utilizados en la industria, permitiendo evaluar el impacto de la automatización sobre la precisión, confiabilidad y eficiencia de las mediciones volumétricas.

La organización de este capítulo responde a los objetivos específicos de la investigación. Inicialmente se describe la estructura del sistema desarrollado y el funcionamiento de cada uno de sus módulos. Posteriormente se presentan las pruebas de funcionamiento realizadas utilizando diferentes escenarios operacionales, seguidas por la comparación entre los resultados obtenidos mediante el procedimiento manual y aquellos generados automáticamente por la aplicación desarrollada. Finalmente, se discuten los resultados alcanzados considerando investigaciones previas, normas internacionales y las implicaciones técnicas para la optimización de las operaciones de transferencia de custodia.

Desarrollo del sistema computacional

Como resultado principal de la investigación se desarrolló un sistema computacional utilizando **Wolfram Mathematica**, orientado a automatizar los cálculos empleados durante la medición volumétrica de hidrocarburos en buques petroleros. La aplicación integra procedimientos matemáticos establecidos por las normas API MPMS, ASTM D1250 e ISO 91, permitiendo procesar automáticamente la información obtenida durante

las operaciones de transferencia de custodia y generar resultados consistentes bajo condiciones de referencia internacionalmente aceptadas. La estructura modular del sistema facilita la actualización de sus componentes, la incorporación de nuevas funcionalidades y la adaptación a diferentes configuraciones operacionales utilizadas en terminales marítimos y buques petroleros.

El sistema fue diseñado con una interfaz gráfica orientada a facilitar el ingreso de información por parte del usuario, reducir errores durante la captura de datos y agilizar el procesamiento de la información. Los módulos implementados permiten registrar las variables requeridas para la medición volumétrica, consultar automáticamente las tablas de calibración, aplicar factores de corrección volumétrica, calcular el volumen estándar y generar reportes técnicos que respaldan las operaciones de transferencia de custodia. La automatización de estos procedimientos elimina la necesidad de realizar cálculos manuales repetitivos y fortalece la trazabilidad de los resultados obtenidos durante cada operación.

Arquitectura del sistema

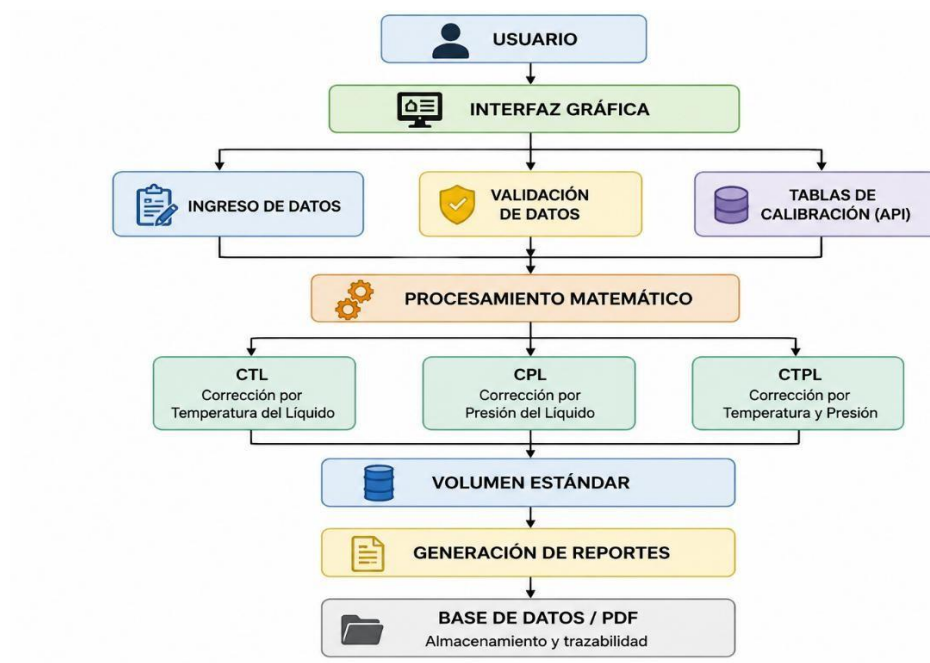
El sistema desarrollado fue estructurado mediante una arquitectura modular compuesta por diferentes componentes funcionales que interactúan de forma secuencial durante el procesamiento de la información. Esta organización permite separar las actividades relacionadas con la captura de datos, validación de información, procesamiento matemático, aplicación de factores de corrección, generación de reportes y almacenamiento de resultados. La independencia funcional de cada módulo facilita el mantenimiento del software, mejora su escalabilidad y permite incorporar futuras actualizaciones sin afectar el funcionamiento general de la aplicación.

Los módulos implementados durante el desarrollo del sistema corresponden a:

- Módulo de autenticación de usuarios.
- Módulo de ingreso de datos operacionales.

- Módulo de administración de tablas de calibración.
- Módulo de procesamiento matemático.
- Módulo de cálculo de factores CTL, CPL y CTPL.
- Módulo de cálculo del volumen estándar.
- Módulo de generación automática de reportes.
- Módulo de almacenamiento de resultados.

La interacción entre estos componentes garantiza que la información fluya de manera ordenada durante todas las etapas del procesamiento, reduciendo la probabilidad de inconsistencias y mejorando la confiabilidad del sistema.



Funcionalidades implementadas

Durante el desarrollo del sistema se implementaron funcionalidades orientadas a automatizar los principales procedimientos empleados durante las operaciones de transferencia de custodia. Entre ellas destacan la validación automática de datos, la lectura de tablas de calibración, el cálculo de volumen observado, la aplicación de factores de corrección volumétrica, la determinación del volumen estándar, el cálculo de gravedad API, la generación de reportes técnicos y el almacenamiento digital de la información procesada. Estas funcionalidades fueron desarrolladas utilizando las capacidades de programación simbólica y numérica de Wolfram Mathematica, garantizando elevada precisión durante la ejecución de los algoritmos matemáticos.

La implementación de estas funciones permitió disminuir significativamente el número de operaciones manuales requeridas durante una medición volumétrica. Asimismo, la incorporación de controles automáticos de validación evita inconsistencias en los datos de entrada, mientras que la generación automática de reportes facilita la documentación de cada operación y fortalece la trazabilidad de la información utilizada durante las actividades de transferencia de custodia.



La Figura presenta la interfaz desarrollada para el ingreso de la información general correspondiente a la operación de transferencia de custodia. Esta pantalla constituye el punto de inicio del procesamiento de datos dentro del sistema, permitiendo registrar la información necesaria para identificar la operación que será analizada.

Entre los principales campos incorporados se encuentran el nombre del buque, número IMO, puerto de operación, terminal marítimo, tanque de carga, fecha y hora de la inspección, así como los datos del operador responsable de la medición. La organización de estos elementos facilita la captura ordenada de la información y reduce la probabilidad de errores asociados al registro manual de datos.

La interfaz incorpora mecanismos automáticos de validación que verifican la existencia de campos obligatorios antes de permitir el avance hacia la siguiente etapa del procesamiento. De esta manera se garantiza que el sistema disponga de toda la información requerida para ejecutar correctamente los cálculos volumétricos establecidos por las normas API MPMS.

Desde el punto de vista funcional, esta pantalla representa el primer módulo del sistema computacional desarrollado, cuya finalidad consiste en asegurar la trazabilidad de cada operación de transferencia de custodia mediante la identificación única de los datos generales del proceso.

Nuevo Cálculo - Ingreso de Datos

Ingreso de datos de la medición

Datos Generales

- Datos Generales
- Medición
- Producto
- Condiciones
- Trim y List
- Resumen

Datos Generales

Nombre del Buque: MT OCEAN STAR

Identificación del Tanque: 3P (C)

Fecha de Medición: 08/05/2024

Hora de Medición: 10:20

Puerto / Terminal: PUERTO LA LIBERTAD

Operador: Operador1

Observaciones: Medición de carga - Gasolina Premium

Cancelar

Siguiente

La Figura muestra la interfaz diseñada para el ingreso de las variables físicas que intervienen en los cálculos volumétricos de hidrocarburos. En esta pantalla el usuario registra parámetros fundamentales como la temperatura observada, presión de operación, nivel del producto, densidad, gravedad API, volumen de agua libre, trim y escora (*list*), variables necesarias para la aplicación de los factores de corrección establecidos por las normas internacionales.

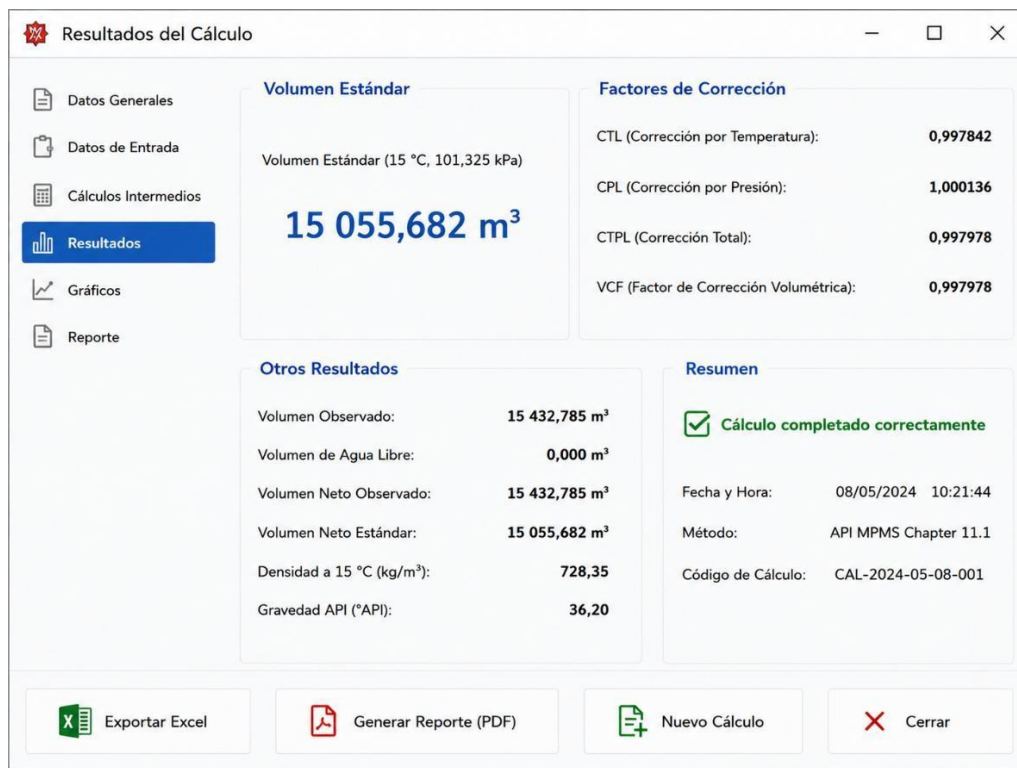
La disposición de los controles permite organizar la información siguiendo la secuencia utilizada durante las operaciones reales de medición, facilitando el trabajo del operador y disminuyendo el tiempo requerido para completar el registro de los datos.

El sistema incorpora controles de validación que verifican automáticamente los rangos permitidos para cada variable, evitando inconsistencias derivadas de errores de digitación o valores físicamente imposibles. Esta característica incrementa la confiabilidad de los cálculos posteriores y constituye una mejora significativa respecto a los procedimientos manuales tradicionales

La Figura presenta la interfaz correspondiente a la visualización de los resultados generados automáticamente por el sistema desarrollado. En esta pantalla se muestran los principales parámetros obtenidos durante el procesamiento matemático, entre ellos el volumen observado, los factores de corrección CTL, CPL y CTPL, el volumen estándar, la gravedad API corregida y demás resultados requeridos para las operaciones de transferencia de custodia.

La información es presentada de forma estructurada y jerárquica, facilitando la interpretación inmediata de los resultados por parte del operador. Esta organización disminuye considerablemente el tiempo requerido para analizar la información obtenida y reduce la posibilidad de errores durante la elaboración de reportes técnicos.

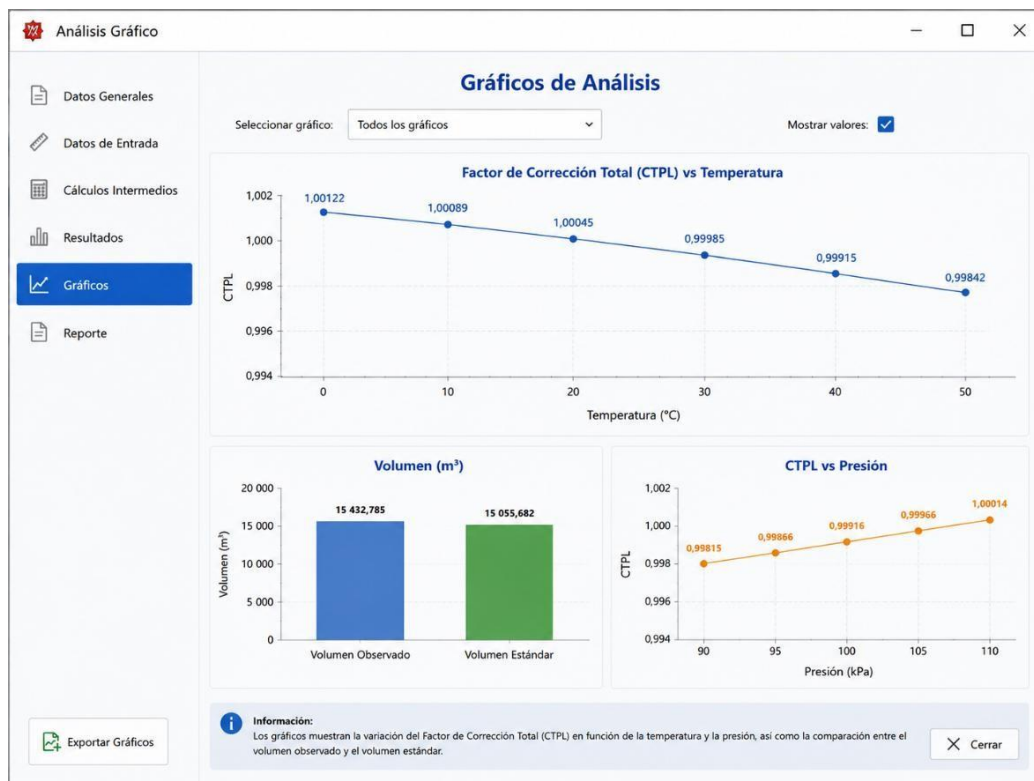
Uno de los principales aportes del sistema consiste en la automatización completa de estos cálculos, eliminando la necesidad de consultar manualmente tablas API o efectuar operaciones matemáticas independientes, lo que incrementa significativamente la eficiencia operativa.



La Figura corresponde al módulo gráfico del sistema, desarrollado con el propósito de representar visualmente el comportamiento de las variables involucradas durante las operaciones de medición volumétrica. Los gráficos permiten analizar tendencias relacionadas con la temperatura, presión, volumen observado, gravedad API y demás variables procesadas por el sistema.

La representación gráfica facilita la identificación de posibles comportamientos anómalos que podrían afectar la exactitud de las mediciones, permitiendo al operador detectar rápidamente desviaciones respecto a las condiciones normales de operación.

La incorporación de herramientas de visualización constituye un aporte importante del sistema desarrollado, ya que mejora el análisis de la información técnica y fortalece el proceso de toma de decisiones durante las operaciones de transferencia de custodia.



La Figura presenta el formato del reporte técnico generado automáticamente por el sistema una vez finalizado el procesamiento de la información. El documento integra todos los datos registrados durante la operación, los factores de corrección aplicados, los resultados obtenidos y las observaciones correspondientes a la medición realizada.

El reporte fue diseñado siguiendo una estructura organizada que facilita su interpretación y almacenamiento dentro de los registros documentales de la empresa. Asimismo, la generación automática del informe reduce significativamente el tiempo requerido para elaborar la documentación técnica y disminuye la posibilidad de errores derivados de la transcripción manual de resultados.

La automatización del proceso documental constituye uno de los principales beneficios del sistema desarrollado, ya que fortalece la trazabilidad metrológica, mejora la

disponibilidad de la información y facilita futuras auditorías relacionadas con la transferencia de custodia de hidrocarburos.

Sistema de Medición Volumétrica - Reporte

Datos Generales

Datos de Entrada

Cálculos Intermedios

Resultados

Gráficos

Reporte

Exportar PDF

Imprimir

Vista previa del reporte

<<

<

1 / 2

>

>>

100%

Descargar PDF

REPORTE DE MEDICIÓN VOLUMÉTRICA

TRANSFERENCIA DE CUSTODIA DE HIDROCARBUROS

Código de Cálculo:

CAL-2024-05-08-001

Fecha y Hora:

08/05/2024 10:21:44

Página:

1 de 2

1. DATOS GENERALES

Nombre del Buque: MT OCEAN STAR

Identificación del Tanque: 3P (C)

Puerto / Terminal: PUERTO LA LIBERTAD

Fecha de Medición: 08/05/2024

Hora de Medición: 10:20

Operador: Operador1

Observaciones: Medición de carga - Gasolina Premium

2. DATOS DE MEDICIÓN

Nivel Observado (mm): 8540

Temperatura Observada (°C): 27,15

Presión Observada (kPa): 101,30

Volumen Observado (m³): 15 432,785

Gravedad API (°API): 36,20

Densidad Observada (kg/m³): 721,4

Tipo de Producto: Gasolina

Volumen de Agua Libre (m³): 0,000

3. CONDICIONES DE REFERENCIA

Temperatura de Referencia (°C): 15,00

Presión de Referencia (kPa): 101,325

Trim (cm): 0,0

List / Escora (°): 0,0

4. RESULTADOS

Volumen Estándar (15 °C, 101,325 kPa): 15 055,682 m³

Volumen Neto Estándar: 15 055,682 m³

Volumen de Agua Libre: 0,000 m³

Densidad a 15 °C (kg/m³): 728,35

5. FACTORES DE CORRECCIÓN

CTL (Corrección por Temperatura): 0,997842

CPL (Corrección por Presión): 1,000136

CTPL (Corrección Total): 0,997978

VCF (Factor de Corrección Volumétrica): 0,997978

Método Utilizado: API MPMS Chapter 11.1

68

CONCLUSIONES

- Las operaciones de medición volumétrica durante la transferencia de custodia constituyen un proceso altamente especializado, en el que intervienen múltiples variables físicas y metrológicas, como el nivel del producto, la temperatura, la presión, la densidad, la gravedad API y las condiciones de estabilidad del buque. Asimismo, se determinó que la correcta aplicación de las normas API MPMS, ISO y ASTM resulta indispensable para garantizar la confiabilidad de las mediciones y reducir las discrepancias comerciales entre las partes involucradas. El análisis realizado permitió identificar las principales fuentes de error asociadas a los procedimientos manuales, justificando la necesidad de implementar herramientas computacionales que automaticen estos procesos.
- La automatización de los cálculos requiere integrar de manera estructurada las variables operacionales, metrológicas y normativas que intervienen durante las operaciones de transferencia de custodia. Entre las variables críticas identificadas se encuentran el volumen observado, la temperatura, la presión, la gravedad API, la densidad, los factores CTL, CPL y CTPL, las tablas de calibración de tanques, las correcciones por trim y escora, así como el Vessel Experience Factor (VEF). La adecuada integración de estos parámetros permitió construir un modelo matemático consistente con los estándares internacionales, garantizando la trazabilidad y reproducibilidad de los resultados.
- Se desarrolla un sistema computacional funcional utilizando Wolfram Mathematica, capaz de integrar los procedimientos matemáticos establecidos por las normas internacionales dentro de una única plataforma informática. El sistema automatiza el ingreso de datos, la aplicación de factores de corrección, el cálculo del volumen estándar, la consulta de tablas de calibración y la generación de reportes técnicos, reduciendo significativamente la intervención manual del operador. La arquitectura modular implementada facilita futuras actualizaciones del software y permite incorporar nuevas funcionalidades conforme evolucionen los requerimientos técnicos de la industria petrolera.

- Los resultados obtenidos durante la validación evidenciaron que el sistema desarrollado genera resultados consistentes con los procedimientos establecidos por las normas API MPMS e ISO 91. La comparación entre el método tradicional y el sistema automatizado mostró una reducción considerable del tiempo de procesamiento, una disminución de la probabilidad de errores asociados al cálculo manual y una elevada repetibilidad de los resultados. Estos hallazgos demuestran que la herramienta propuesta constituye una alternativa técnicamente viable para optimizar las operaciones de medición volumétrica y fortalecer la confiabilidad de la transferencia de custodia de hidrocarburos.

RECOMENDACIONES

- Implementar el sistema desarrollado en Wolfram Mathematica en operaciones reales de transferencia de custodia de hidrocarburos, con el fin de evaluar su desempeño bajo condiciones operativas y contribuir a la reducción de errores asociados a los cálculos manuales, mejorando la eficiencia y confiabilidad del proceso.
- Actualizar periódicamente el sistema conforme a las nuevas versiones de las normas API MPMS, ASTM e ISO, garantizando que los algoritmos implementados mantengan su compatibilidad con los estándares internacionales vigentes y respondan a los cambios tecnológicos del sector petrolero.
- Ampliar las funcionalidades del sistema mediante la integración con instrumentos de medición electrónicos, bases de datos operacionales y plataformas de monitoreo en tiempo real, permitiendo automatizar completamente el proceso de adquisición, procesamiento y almacenamiento de la información generada durante las operaciones de transferencia de custodia.

Bibliografía

- Kazemi, Y., & Szmerkovsky, J. (2015). *Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi - mode transportation to strategic planning*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.004>.
- American Petroleum Institute. (2023). *Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS)*. API Publishing.
- American Petroleum Institute. (2023). *API MPMS Chapter 3. Tank Gauging*. API Publishing.
- American Petroleum Institute. (2023). *API MPMS Chapter 7. Temperature Determination*. API Publishing.
- American Petroleum Institute. (2023). *API MPMS Chapter 11.1. Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils*. API Publishing.
- American Petroleum Institute. (2023). *API MPMS Chapter 12. Calculation of Petroleum Quantities*. API Publishing.
- Arias, J. L. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting.
- ASTM International. (2019). *ASTM D1250-19. Standard Guide for Use of the Petroleum Measurement Tables*. ASTM International.
- Barrass, C. B., & Derrett, D. R. (2012). *Ship Stability for Masters and Mates* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2022). *Software Architecture in Practice* (4th ed.). Addison-Wesley.

Biran, A., & López-Pulido, R. (2014). *Ship Hydrostatics and Stability* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

Energy Institute. (2000). *HM 2: Tank Calibration – Section 1: Strapping, Internal Diameter and Internal Offset Methods for the Calibration of Vertical Cylindrical Tanks*.

Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1994). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2022). *Multivariate Data Analysis* (9th ed.). Cengage Learning.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2.^a ed.). McGraw-Hill.

IEEE Standards Association. (2021). *IEEE Std 1012-2021. IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation*.

International Organization for Standardization. (2001). *ISO 4269. Petroleum and Liquid Petroleum Products—Tank Calibration by Liquid Measurement—Incremental Method Using Volumetric Meters*.

International Organization for Standardization. (2003). *ISO 7507-1. Petroleum and Liquid Petroleum Products—Calibration of Vertical Cylindrical Tanks—Part 1: Strapping Method*.

International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC 25010. Systems and Software Engineering—Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)—System and Software Quality Models*.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001. Quality Management Systems—Requirements*.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 91. Petroleum and Related Products—Temperature and Pressure Volume Correction Factors (Petroleum Measurement Tables) and Standard Reference Conditions*.

Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2002). *Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales* (4.^a ed.). McGraw-Hill.

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7th ed.). Wiley.

Mourtzis, D., et al. (2025). *A Comprehensive Update on Literature Review of Ship Draft Surveys: Methodologies, Challenges and Technological Advancements*.

Nielsen, J. (2020). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann.

Patel, S., Parrott, B., Abdellatif, F., & Trigui, H. (2020). *Custody Transfer Tank Calibration Technology*. SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference.

Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software Engineering: A Practitioner's Approach* (9th ed.). McGraw-Hill.

Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2018). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human–Computer Interaction* (6th ed.). Pearson.

Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (10th ed.). Pearson.

Souza Filho, P. L., Oliveira, E. C., Aramaki, T. L., et al. (2021). Maximum permissible differences in LPG operations for custody transfer measurements. *Measurement*, 175, 109117.

Wolfram Research. (2024). *Wolfram Language Documentation Center*.

Wolfram. (2023). *An Elementary Introduction to the Wolfram Language* (3rd ed.). Wolfram Media.