

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS NORMAS
VIGENTES PARA LA CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA EN EL SISTEMA DE
INFORMACIÓN OPERACIONAL DE LA GERENCIA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA**

ANDREA JULIANA HERNÁNDEZ VILLAMIZAR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS NORMAS
VIGENTES PARA LA CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA EN EL SISTEMA DE
INFORMACIÓN OPERACIONAL DE LA GERENCIA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA**

ANDREA JULIANA HERNANDEZ VILLAMIZAR

**Trabajo de grado en modalidad de práctica industrial para optar al título
de Ingeniero Químico**

Director:

ALVARO NUÑEZ VARGAS

Químico Coordinación Inspección de Calidad

Lector:

Prof. SONIA AZUCENA GIRALDO

Ingeniera Química Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

*A Dios, por acompañarme y bendecirme en cada momento de
mi vida y por hacerme ver detrás de cada obstáculo una
oportunidad para crecer.*

*A mis padres, por su apoyo incondicional, su confianza y su
ejemplo de vida.*

*A Mario por ser esa persona especial que comparte mis
alegrías y me ayuda a superar las dificultades.*

*A mis amigas, por su apoyo y compañía en todos los momentos
de nuestra maravillosa vida universitaria.*

Juliana.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Química por la formación recibida durante estos años.

A Ecopetrol S.A. por la oportunidad de realizar la práctica industrial durante la cual pude tener un acercamiento a la industria del petróleo y la vida laboral.

A Alvaro Nuñez por su apoyo durante la realización de este proyecto.

A la Dra. Sonia Azucena Giraldo por su orientación.

CONTENIDO

	Pág.
1.INTRODUCCIÓN	1
2.CONCEPTOS TEÓRICOS	3
2.1 DISTINCIÓN ENTRE CONDICIÓN OBSERVADA, CONDICIÓN BASE Y CONDICIÓN ALTERNATIVA	3
2.2 CONVERSIÓN DE LA DENSIDAD EN VACÍO A DENSIDAD EN EL AIRE	3
2.3 DENSIDAD RELATIVA	4
2.4 FACTORES DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA POR EFECTO DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN EN CRUDOS, PRODUCTOS REFINADOS Y LUBRICANTES SEGÚN NORMA API MPMS CAPÍTULO 11 SECCIÓN 1:	5
2.5 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA PARA PRODUCTOS AROMÁTICOS SEGÚN NORMA ASTM D 1555	5
2.6 MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN CORREGIDO DE ASFALTO A TEMPERATURA BASE SEGÚN NORMA ASTM D 4311-04:	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1 DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE AUDITORÍA PARA LA CONVERSIÓN DE DENSIDAD, MASA, PESO Y VOLUMEN	7

CONFORME A LAS NORMAS API MPMS, ASTM D155, ASTM D4311

3.1.1 Procedimiento de cálculo de Factores de Corrección Volumétricos para crudos, productos refinados y lubricantes	8
3.1.2 Procedimiento de Cálculo de Factores de Corrección Volumétrica para productos aromáticos	13
3.1.3 Procedimiento de Cálculo para Factores de Corrección Volumétrica para Asfaltos	15
3.1.4 Procedimiento de Cálculo a partir de Volumen Observado:	16
3.1.5 Procedimiento de Cálculo a partir de Peso en báscula:	17
3.1.6 Procedimiento de Cálculo a partir de masa:	18
3.2 CONSULTA DE VOLÚMENES CORREGIDOS EN EL SISTEMA OPERACIONAL DE LA REFINERÍA SIO	18
3.3 CONSULTA DE CORRECCIONES VOLUMÉTRICAS Y PESO EN EL SISTEMA DE INFORMACIÓN OPERACIONAL DEL LLENADERO	19
3.4 EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS EN LAS CORRECCIONES VOLUMÉTRICAS REALIZADAS POR EL SISTEMA DE INFORMACIÓN Y LAS REALIZADAS SEGÚN LAS NORMAS API MPMS CAPÍTULO 11 SECCIÓN 1, ASTM D 1555, ASTM D4311	19
3.4.1 Evaluación para los tanques de inventarios de productos	19
3.4.2 Evaluación para los productos liquidados en el Llenadero	20

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	21
4.1 EVALUACIÓN DE LAS CORRECCIONES EFECTUADAS EN LOS TANQUES DE INVENTARIO DE PRODUCTOS	21
4.2 EVALUACIÓN DE LAS CORRECCIONES EFECTUADAS EN LA LIQUIDACIÓN DE PRODUCTOS AROMÁTICOS	23
CONCLUSIONES	27
BIBLIOGRAFIA	28
ANEXOS	29

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coeficientes K_i para crudos, productos refinados y lubricantes	12
Tabla 2. Constantes para el cálculo de VCF de productos aromáticos	14
Tabla 3. Cálculo de pérdidas para Crudos y Productos Refinados	21
Tabla 4. Cálculo de pérdidas para Lubricantes	22
Tabla 5 . Pérdidas obtenidas para Asfalto en Inventario	23
Tabla 6. Pérdidas encontradas en la liquidación de productos aromáticos	24
Tabla 7. Pérdidas encontradas en la conversión de productos aromáticos despachados a condiciones de balance volumétrico	24
Tabla 8. Pérdidas presentadas en la liquidación de productos aromáticos en el año 2007	25

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología para la realización del proyecto	7

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Método para convertir temperatura a partir de una base ITS-90 (Internacional Temperature Scale of 1990) a IPTS-68 (Internacional Temperature Scale of 1968)	29
Anexo B. Cambio en el valor de la temperatura base	31
Anexo C. Propiedades físicas de productos aromáticos y ciclohexano	32
Anexo C. Guía para el manejo de la herramienta de auditoría para correcciones volumétricas según normas API MPMS Capítulo 11 Sección 1, ASTM D1555-04, ASTM D4311.	33

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS NORMAS VIGENTES PARA LA CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA EN EL SISTEMA DE INFORMACIÓN OPERACIONAL DE LA GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA.

AUTOR: Andrea Juliana Hernández Villamizar*

PALABRAS CLAVE: Medición, condiciones observadas, condiciones base, corrección volumétrica.**

Los procesos de medición en una refinería constituyen un factor importante, puesto que son los encargados de la contabilización de las materias primas, inventarios y ventas de productos.

Actualmente en la Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB), se están adelantando una serie de proyectos que buscan el mejoramiento de los sistemas de información del complejo, aumentando su eficiencia y confiabilidad. Uno de estos sistemas es el Sistema de Información Operacional (SIO), el cual se encarga de procesar los datos que se llevan al Balance Volumétrico de la Refinería.

Este trabajo constituye la etapa inicial para la reestructuración y mejoramiento del sistema de información operacional dentro de la GRB y está orientado a evaluar las desviaciones tangibles en los volúmenes netos (a 60 °F) calculados en el SIO versus los obtenidos con las normas API-MPMS y ASTM vigentes. Como parte esencial para el cumplimiento de este propósito, se creó una herramienta de auditoría que permite convertir el volumen observado, masa y peso de productos a un volumen equivalente a las condiciones de referencia de los balances volumétricos de la refinería y a condiciones de despacho de los productos en el llenadero, conforme a las normas de corrección volumétrica API MPMS 11.1 2004 (crudos, productos refinados y lubricantes), ASTM D1555 2004 (productos aromáticos y ciclohexano) y norma ASTM D4311 2004 (asfaltos).

Finalmente se realizó una evaluación de los datos obtenidos mediante el sistema de información actual y la herramienta desarrollada, logrando así un diagnóstico de las desviaciones existentes. Esta herramienta también permitirá dar continuidad a las futuras etapas de prueba y validación de las actualizaciones que deben implementarse en el SIO.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Qco. Alvaro Nuñez Vargas; Lector: Ph.D. Sonia Azucena Giraldo; Universidad Industrial de Santander.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE IMPACT OF IMPLEMENTING CURRENT VOLUMETRIC CORRECTION STANDARDS IN THE OPERATIONAL INFORMATION SYSTEM OF THE BARRANCABERMEJA REFINERY

AUTHOR: Andrea Juliana Hernández Villamizar*

KEY WORDS: measuring, observed conditions, base conditions, volumetric correction.**

Measuring processes in a refinery are very important since they are used to keep account of raw materials, stock and product sales.

Currently, the Barrancabermeja Refinery in Colombia (GRB) is developing some projects in order to improve the information systems at the refinery, by increasing its accuracy and reliability. One of those systems is the SIO (Operational Information System), which is in charge of processing Volumetric Balance data.

This work is the first step for improving the SIO at GRB. It evaluates net volume deviations (at 60°F) in volumes calculated by the SIO versus volumes calculated by current API MPMS and ASTM Standards. As an essential part to achieve this goal, an audit tool was created. This tool allows to convert observed volume, mass and weight of the products to an equivalent volume evaluated at volumetric balance reference conditions and products sells conditions at Llenadero, according to volumetric correction standards API MPMS 11.1 2001 (Crude oils, refined products and lubricating oils), ASTM D1555 (Aromatic Hydrocarbons and Cyclohexane) and ASTM D4311 2004(Asphalts).

Finally, an evaluation of the data calculated through the current information system and the data calculated through the developed tool was made, in order to obtain a diagnostic of the existing deviation. This tool will also be useful in future stages of the project, such as the test and validation stages that must be implemented in the SIO.

* Degree Work

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Advisor: Alvaro Nuñez Vargas; Text Reader: PhD. Sonia Azucena Giraldo; Universidad Industrial de Santander.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de medición en una refinería constituyen un factor importante en la contabilización de los flujos de caja, dentro de los cuales se establecen los inventarios de productos que junto con la infraestructura, valorizan el costo de la compañía. Por esta razón, se deben establecer los mecanismos para controlar las pérdidas tangibles, (Cálculos, errores de calibración en medidores, errores en aforos de tanques, uso de normas desactualizados, etc.) e intangibles (Incertidumbre en los sistemas de medición).

Actualmente en la Gerencia Refinería Barrancabermeja (GRB), se están adelantando una serie de proyectos que buscan el mejoramiento de los sistemas de información del complejo, en aras de mejorar la eficiencia y calidad de los mismos y por ende aumentar la confiabilidad de los datos obtenidos a través de ellos. Uno de estos sistemas es el Sistema de Información Operacional (SIO), el cual se encarga de procesar los datos que se llevan al Balance Volumétrico de la Refinería.

Este trabajo constituye la etapa inicial para la reestructuración y mejoramiento del sistema de información operacional dentro de la GRB y está orientado a evaluar las desviaciones tangibles en los volúmenes netos (a 60 °F) calculados en el SIO de la Gerencia Refinería Barrancabermeja versus los obtenidos con las normas API-MPMS y ASTM vigentes. Como parte esencial para el cumplimiento de este propósito, se creó una herramienta de auditoría que permite convertir el volumen observado, masa y peso de productos a un volumen equivalente a las condiciones de referencia de los balances volumétricos de la refinería y a condiciones de despacho de los productos en el llenadero, conforme a las normas API MPMS 11.1 2004 (crudos, productos refinados y lubricantes), ASTM D1555 2004 (productos aromáticos y ciclohexano) y norma ASTM D4311 2004 (asfaltos).

Finalmente se realizó una evaluación de los datos obtenidos mediante el sistema de información actual y la herramienta desarrollada, logrando así una evaluación diagnóstica de las desviaciones existentes. Esta herramienta también permitirá dar continuidad a las futuras etapas de prueba y validación de las actualizaciones que deben implementarse en el SIO.

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

Los factores de corrección volumétricos, en su forma básica, son el resultado de un conjunto de ecuaciones derivadas y basadas en datos empíricos que relacionan el cambio de volumen de hidrocarburos sobre un rango de temperaturas y presiones. Tradicionalmente, los factores han sido listados en un formato tabular llamado “Tablas de Medida del Petróleo” (MPMS).

2.1 DISTINCIÓN ENTRE CONDICIÓN OBSERVADA, CONDICIÓN BASE Y CONDICIÓN ALTERNATIVA

Condición observada, es la temperatura y presión a la cual la densidad y volumen de un líquido ha sido medida; la condición “estándar” ó “base”, es la temperatura y presión a la cual se expresa el volumen de un líquido para propósitos de transferencia de custodia.

Las tres condiciones referencia en el mundo para transacción de hidrocarburos son los volúmenes corregidos a temperaturas de 20 °C, 15 °C y 60 °F, todas ellas a una presión de 0 psig. En Colombia, la legislación establece como condición referencia 0 psig y 60 °F para hidrocarburos líquidos.

Condiciones alternativas, son condiciones de temperatura y presión, diferentes de la observada y la condición de referencia a la cual se desea conocer la densidad y el volumen equivalente.

2.2 CONVERSIÓN DE LA DENSIDAD EN VACÍO A DENSIDAD EN EL AIRE.

El principio de Arquímedes establece que cualquier sustancia sumergida en un fluido pesa menos dependiendo del peso del fluido desplazado. Una sustancia pesada comúnmente es empujada por el aire que la rodea y para pesadas exactas, en especial de objetos de volumen apreciable, debe hacerse una

corrección por efecto del empuje. Esta influencia en el peso, hace que la densidad en el vacío y en el aire sea diferente y por esta razón se hace necesario realizar la conversión entre ellas.

El término “peso en el aire” es el peso que una cantidad de fluido aparenta tener cuando es pesado contra pesos comerciales que han sido estandarizados, de manera que cada uno tenga una masa (peso en el vacío) igual a la masa nominal asociada con él. El término “peso en el vacío” se refiere a la masa verdadera de un fluido.

Según la norma ASTM D1555 para convertir la densidad en vacío (g/ml) a densidad en el aire (Kg/gal) se utiliza la ecuación 1 [1]:

$$\left[\frac{m}{v}\right]^{60} = [1.00014992597 * D^{60} - 0.00119940779543] \quad (1)$$

Donde:

$[m/v]^{60}$ = Densidad en el aire a 60 °F, gramos/mililitro

D = Densidad en el vacío a 60 °F, gramos / mililitro

Para convertir la densidad en vacío a densidad en aire de los productos que están bajo el alcance del API MPMS, se debe consultar el volumen XI de las Tablas de Medida del Petróleo, publicadas por ASTM [2].

2.3 DENSIDAD RELATIVA

La densidad relativa se define como la relación entre la densidad de un fluido y la densidad de agua, donde las dos densidades son valores “en vacío” determinados a idénticas temperaturas. Las densidades de fluidos puros como se reportan en la literatura, usadas para la calibración de densitómetros se basan en “peso en el vacío”. Por lo tanto, las lecturas de densitómetros obtenidas son también valores “en el vacío”.

2.4 FACTORES DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA POR EFECTO DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN EN CRUDOS, PRODUCTOS REFINADOS Y LUBRICANTES SEGÚN API MPMS CAPÍTULO 11 SECCIÓN 1

Esta norma contiene los algoritmos y procedimientos para la determinación de los factores de corrección por efecto de temperatura y presión en la medida de densidad y volumen de crudos, productos refinados y lubricantes. Los factores combinados para corrección se denominan C_{TPL} , compuesto por el factor de corrección por efecto de la temperatura en el líquido, C_{TL} y por el factor de corrección por efecto de la presión en el líquido C_{PL} . Estos factores de corrección aplican para un rango de temperaturas entre -58 y 302 °F (-50.00 a 150.00 °C) y un rango de presión de 0 a 1500 psi (0 a 10340 kPa).

Dentro del grupo de productos refinados se encuentran: *Gasolina Regular, Gasolina Extra, Nafta Crackeada, Nafta Virgen, Nafta Pesada, Virginoil, Diesel Regular, Diesel Extra, Jet A1, Keroseno, Combustóleo, Alquilate, Avigas, Disolventes 1, 2, 3 y 4 y Mezcla de Hexanos.*

2.5 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA PARA PRODUCTOS AROMÁTICOS SEGÚN NORMA ASTM D 1555

Esta norma contiene el procedimiento para calcular el factor de corrección volumétrica por efecto de la temperatura para ciclohexano, benceno, tolueno, mezcla de xilenos, estireno, o-Xileno, m-Xileno, p-Xileno, cumeno, etilbenceno y Productos Aromáticos en el rango de destilación de 300 a 350°F y 350 a 400 °F.

El factor de corrección por efecto de la presión para los productos aromáticos se calcula de acuerdo a la Norma API MPMS Capítulo 11 Sección 1.

2.6 MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN CORREGIDO DE ASFALTO A TEMPERATURA BASE SEGÚN NORMA ASTM D 4311-04

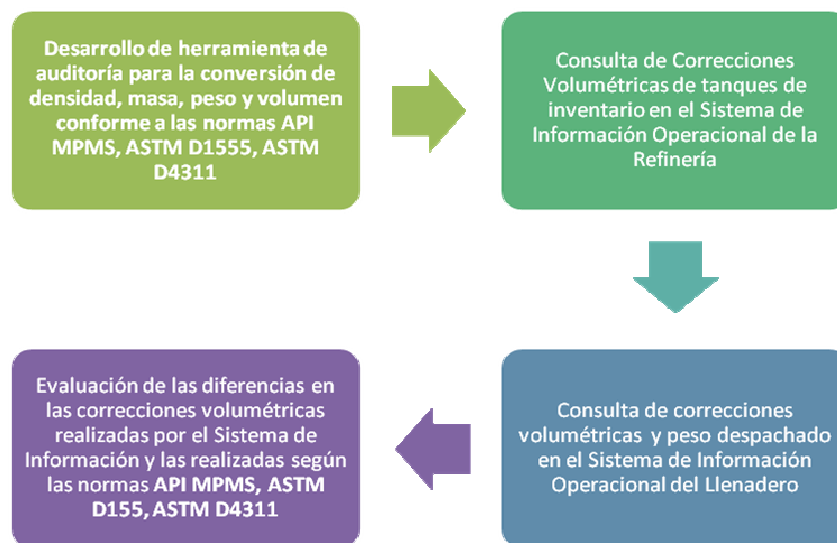
La norma ASTM D4311 proporciona las fórmulas para generar los factores de corrección volumétrica, que permiten convertir volúmenes de asfalto medidos a diferentes temperaturas en un volumen equivalente a una temperatura base o estándar. Estas fórmulas aplican a todos los tipos de asfalto excepto al asfalto emulsificado. Las fórmulas contenidas en esta norma proporcionan los C_{TL} para convertir volúmenes de asfalto a condiciones estándar de 60°F en un rango de temperatura desde -25 hasta +275°C o 0 a 500°F.

El factor de corrección por efecto de la presión para los asfaltos se calcula de acuerdo a la Norma API MPMS [3].

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología empleada para la evaluación del impacto de la implementación de las normas vigentes de corrección volumétrica versus lo implementado actualmente en el Sistema de Información Operacional; esta metodología se representa en la Figura 1.

Figura 1. Metodología para la realización del proyecto



3.1 DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE AUDITORÍA PARA LA CONVERSIÓN DE DENSIDAD, MASA, PESO Y VOLUMEN CONFORME A LAS NORMAS API MPMS, ASTM D155, ASTM D4311

Para evaluar las diferencias existentes en las correcciones volumétricas realizadas por el SIO y las correcciones según las normas vigentes, se elaboró una herramienta de auditoría que permite corregir de las condiciones observadas (operación) a condiciones referencia utilizadas en los balances volumétricos de la refinería.

La herramienta desarrollada consiste en un programa en Visual Basic Excel, que realiza las correcciones volumétricas a partir de tres tipos de datos de entrada: peso, masa y volumen, implementando las normas de corrección API MPMS, ASTM D1555, y ASTM D4311. A continuación se presentan los procedimientos realizados por el programa para cada una de las normas. Posteriormente se muestran los cálculos realizados dependiendo del tipo de datos de entrada.

3.1.1 Procedimiento de cálculo de Factores de Corrección Volumétricos para crudos, productos refinados y lubricantes: Este procedimiento permite calcular el factor de corrección volumétrico (C_{TPL}) a una temperatura diferente a la de referencia (60°F).

El cálculo se hace en dos partes:

- Se aplica una corrección térmica al líquido para el cambio a partir de la temperatura base (°F) a la temperatura deseada, a una presión base constante.
- Se aplica una corrección de presión al líquido para el cambio a partir de la presión base (0 psig) a la presión deseada, a una temperatura deseada.

En el cálculo de los factores de corrección volumétricos se tienen los siguientes datos:

- ✓ Valores de entrada

API: Gravedad API a condiciones base (60°F y 0 psig) (°API)

t : Temperatura (°F)

P : Presión (psig)

- ✓ Valores de salida

C_{TPL} : Factor de corrección volumétrico combinado debido a la temperatura y la presión

✓ Valores intermedios

C_{TL} : Factor de corrección volumétrico debido a la temperatura

C_{PL} : Factor de corrección volumétrico debido a la presión

F_P : Factor de compresibilidad a escala (psi^{-1})

δ_{60} : Valor de temperatura (es una constante, $0.01374979547^\circ\text{F}$)

t^* : Temperatura a una base **International Practical Temperature Scale** IPTS-68 ($^\circ\text{F}$)

ρ^* : Densidad base a IPTS-68 (kg/m^3)

Δ_t : Temperatura observada menos la temperatura base a 60°F ($^\circ\text{F}$)

α_{60} : Factor de expansión térmica a 60°F ($^\circ\text{F}^{-1}$)

K_0 : Coeficiente en correlación para α_{60} ($\text{kg}^2/\text{m}^6 \text{ }^\circ\text{F}$)

K_1 : Coeficiente en correlación para α_{60} ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{F}$)

K_2 : Coeficiente en correlación para α_{60} ($^\circ\text{F}^{-1}$)

A, B : Variables usadas en el cálculo de ρ^*

El cambio de volumen de un fluido causado por la variación de la temperatura se relaciona mediante el coeficiente de expansión térmica, cuya definición fundamental se presenta en la ecuación 2.

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Donde α = coeficiente de expansión térmica

V = volumen a cualquier temperatura.

El coeficiente de expansión térmica se relaciona con el coeficiente de expansión térmica a la temperatura base mediante la ecuación (3)

$$\alpha = \alpha_T + \beta \Delta t \quad (3)$$

Donde:

$\alpha_T = \alpha$ a la temperatura base.

β = función de α y es independiente de la temperatura.

Remplazando la ecuación (3) en la ecuación (2), se obtiene:

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \alpha_T + \beta \Delta t \quad (4)$$

Donde $\Delta t = t - T$

Al integrar la ecuación (4) entre t y T se obtiene:

$$\ln \frac{V}{V_T} = \alpha_T \Delta t + \frac{\beta}{2} \Delta t^2 \quad (5)$$

El grupo de estudio del **American Petroleum Institute** API y el **National Bureau of Standards** NBS que desarrolló las tablas de medida del petróleo demostró que la expresión para β que mejor representaba el comportamiento de los datos era la mostrada en la ecuación 6 [3].

$$\beta = k \alpha_T^2 \quad (6)$$

Donde:

k= constante independiente de la temperatura.

Estas ecuaciones fueron validadas estadísticamente mediante estudios de la base de datos del NBS. El valor preciso de k fue seleccionado considerando los estudios estadísticos, la curva teórica de la densidad con la temperatura y los datos de la literatura de crudos y fracciones de petróleo. El valor de k que mejor expresa estos criterios es 1.6.

El cambio de volumen de un fluido causado por el cambio de una temperatura base a una temperatura t, se puede calcular mediante la ecuación 7 [3].

$$\frac{V_T}{V} = \frac{\rho}{\rho_T} = \exp[-\alpha_T \Delta t (1 + 0.8 \alpha_T \Delta t)] \quad (7)$$

Donde:

t = cualquier temperatura

T = temperatura base

Se determinó que los coeficientes de expansión térmica a temperatura base para cada grupo están relacionados con las densidades a la temperatura base mediante la ecuación 8:

$$\alpha_T = \frac{K_0 + K_1 \rho_T^2 + K_2 \rho_T^3}{\rho_T^3} \quad (8)$$

Los valores de los parámetros K_0 , K_1 y K_2 fueron establecidos de acuerdo a la base de datos del NBS para cada grupo de productos.

La base de datos empleada para el desarrollo de las correlaciones fue desarrollada en 1979. En ese momento la escala de temperatura en uso era la **International Practical Temperature Scale (IPTS-68)**. Esta escala fue sustituida con la **International Temperature Scale (ITS-90)** en el año 1990. Para reconocer las diferencias entre la escala de temperatura ITS-90 y la escala IPTS-68, se deben realizar correcciones a la temperatura t, y la temperatura base T, y se debe utilizar un factor de corrección de temperatura δ_{60} (Ver Anexo B).

Primero se debe sustituir la temperatura de entrada t (en escala ITS-90) a la temperatura t* (en escala IPTS-68) siguiendo lo indicado en el numeral 11.1.5.3 de la norma API MPMS (Ver Anexo B).

La densidad usada en las correlaciones, es ligeramente diferente de la densidad ρ_{60} medida de acuerdo con la escala ITS-90, por lo tanto se debe

realizar una corrección antes de ser usada en las correlaciones definidas por el estándar. Ésta corrección se realiza utilizando la ecuación 9 [3]:

$$\rho^* = \rho_{60} \left\{ 1 + \frac{\exp[A(1+0.8A)]-1}{1+A(1+1.6A)B} \right\} \quad (9)$$

Donde los factores A y B se calculan con las Ecuaciones 10 y 11 [3]:

$$A = \frac{\delta_{60}}{2} \left[\left(\frac{K_0}{\rho_{60}} + K_1 \right) \frac{1}{\rho_{60}} + K_2 \right] \quad (10)$$

$$B = \frac{2K_0 + K_1 \rho_{60}}{K_0 + (K_1 + K_2 \rho_{60}) \rho_{60}} \quad (11)$$

Los coeficientes K_i utilizados en estas ecuaciones dependen del grupo de productos. Los coeficientes que se deben usar se presentan en la Tabla 1 [3]:

Tabla 1. Coeficientes K_i para crudos, productos refinados y lubricantes

Producto	Rango de Densidad (Kg/m ³)	K0	K1	K2
Crudo	610.6 ≤ ρ_{60} < 1163.5	341.0957	0.0	0.0
Combustóleo y Diesel	838.3127 ≤ ρ_{60} ≤ 1163.5	103.8720	0.2701	0.0
Jet	787.5195 ≤ ρ_{60} < 838.3127	330.3010	0.0	0.0
Zona de transición	770.3520 ≤ ρ_{60} < 787.5195	1489.0670	0.0	-0.00186840
Gasolinas	610.6 ≤ ρ_{60} < 770.3520	192.4571	0.2438	0.0
Lubricantes	800.9 ≤ ρ_{60} ≤ 1163.5	0.0	0.34878	0.0

Se determina el coeficiente de expansión térmica a la temperatura base de 60°F, α_{60} mediante la ecuación 8 [3]:

Se calcula la diferencia entre la temperatura alterna y la temperatura base mediante la ecuación 12, teniendo en cuenta que la temperatura base 60°F (en escala ITS-90) es equivalente a 60.006874 (en escala IPTS-68) [3]:

$$\Delta t = t^* - 60.006874 \quad (12)$$

Se calcula el factor de corrección debido a la temperatura, C_{TL} , mediante la ecuación 13. [3]:

$$C_{TL} = \exp\{-\alpha_T(t - T)[1 + 0.8\alpha_T(t - T + \delta_T)]\} \quad (13)$$

El modelo matemático básico, usado para desarrollar la expresión para el cálculo del factor de compresibilidad se presenta en la ecuación 14 [3]:

$$F_p = \exp\left(A + BT + \frac{C+DT}{P_{so}^2}\right) \quad (14)$$

Los parámetros de esta ecuación fueron hallados de acuerdo a una base de datos desarrollada por Jessup, Downer y Gardiner, obteniendo la ecuación 15, mediante la cual se calcula el factor de compresibilidad [3]:

$$F_p = \exp\left(-1.9947 + 0.00013427t^* + \frac{793920 + 2326t^*}{P^{*2}}\right) \quad (15)$$

Se calcula el factor de corrección debido a la presión, C_{PL} , según la ecuación 16[3]:

$$C_{PL} = \frac{1}{1 - 1 \cdot 10^{-3} F_p \cdot P} \quad (16)$$

Se calcula el factor de corrección combinado de temperatura y presión C_{TPL} según la ecuación 17[3]:

$$C_{TPL} = C_{TL} C_{PL} \quad (17)$$

3.1.2 Procedimiento de Cálculo de Factores de Corrección Volumétrica para productos aromáticos: Permite calcular el C_{TL} del producto a la temperatura observada mediante la ecuación 18[2]:

$$C_{TL} = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 \quad (18)$$

Donde:

a, b, c, d y e = constantes que dependen del tipo de producto

t = Temperatura en °F

Las constantes (a, b, c, d, e) para el cálculo de *Factores de Corrección Volumétrica* para los productos aromáticos se relacionan en la Tabla 2 [2]:

Tabla 2. Constantes para el cálculo de VCF de productos aromáticos

Producto	A	b	c	d	e
Benceno	1.038382492	-6.23070E-04	-2.8505E-07	1.26920E-10	0.0E+00
Cumeno	1.032401114	-5.34450E-04	-9.5067E-08	3.62720E-11	0.0E+00
Ciclohexano	1.039337296	-6.47280E-04	-1.4582E-07	1.03538E-10	0.0E+00
Etilbenceno	1.033346632	-5.5243E-04	8.37035E-10	-1.2692E-09	5.55061E-12
Stireno	1.032227515	-5.3444E-04	-4.4323E-08	0.0000E+00	0.0E+00
Tolueno	1.035323647	-5.8887E-04	2.46508E-09	-7.2802E-12	0.0E+00
m-Xileno	1.031887514	-5.2326E-04	-1.3253E-07	-7.3596E-11	0.0E+00
o-Xileno	1.031436449	-5.2302E-04	-2.5217E-09	-2.1384E-10	0.0E+00
p-Xileno	1.032307000	-5.2815E-04	-1.8416E-07	1.89256E-10	0.0E+00
300 - 350 °F	1.031118000	-5.1827E-04	-3.5109E-09	-1.9836E-11	0.0E+00
300 - 400 °F	1.029099000	-4.8287E-04	-3.7692E-08	3.78575E-11	0.0E+00

Se calcula el C_{PL} mediante la ecuación 16, donde el F_p se calcula mediante la ecuación 19 [3]:

$$F_p = \exp\left(-1.9947 + 0.00013427t + \frac{793920 + 2326t}{\rho^2}\right) \quad (19)$$

Donde

F_p = Factor de compresibilidad a escala (psi^{-1})

t = Temperatura en °F

ρ = Densidad del producto a 60°F

Finalmente se realiza el cálculo del factor de corrección combinado de temperatura y presión, C_{TPL} según la ecuación 17.

3.1.3 Procedimiento de Cálculo para Factores de Corrección Volumétrica para Asfaltos: Dependiendo de la densidad relativa, se selecciona la ecuación a utilizar para calcular el Factor de Corrección Volumétrico.

Para Asfaltos con gravedad API a $60^{\circ}\text{F} \leq 14.9^{\circ}\text{API}$ o densidad relativa $60/60^{\circ}\text{F} \geq 0.967$ el Factor de Corrección Volumétrico se calcula mediante la Ecuación 20 [4]:

$$A = 1.0211326242 - 3.548988118 * 10^{-4}T + 4.498813 * 10^{-8}T^2 \quad (20)$$

Donde:

A= Factor de corrección volumétrico.

T($^{\circ}\text{F}$) = Temperatura del asfalto en $^{\circ}\text{F}$.

Para Asfaltos con gravedad API a 60°F de 15.0°API a 34.9°API o densidad relativa $60/60^{\circ}\text{F}$ de 0.850 a 0.966, el Factor de Corrección Volumétrico se calcula utilizando la ecuación 21 [4]:

$$B = 1.02413769 - 4.0641418 * 10^{-4}T + 6.79176 * 10^{-8}T^2 \quad (21)$$

Donde:

B = Factor de corrección volumétrico.

T ($^{\circ}\text{F}$) = Temperatura del asfalto en $^{\circ}\text{F}$.

Cálculo del C_{PL} mediante la ecuación 9, donde el F_p se calcula mediante la ecuación 22 [3]:

$$F_p = \exp\left(-1.9947 + 0.00013427t + \frac{793920 + 2326t}{\rho^2}\right) \quad (22)$$

Donde

F_p = Factor de compresibilidad a escala (psi^{-1})

t = Temperatura en °F

ρ = Densidad del producto a 60°F

Cálculo del factor de corrección combinado de temperatura y presión, C_{TPL} según la ecuación 17.

3.1.4 Procedimiento de Cálculo a partir de Volumen Observado: Estos cálculos permiten a partir de un volumen a ciertas condiciones de temperatura y presión, obtener un volumen equivalente a 60°F y adicionalmente a unas condiciones alternativas.

A partir de la gravedad API a 60°F y la Temperatura y Presión observadas, se calcula un Factor de Corrección Volumétrico C_{TPL} , según el procedimiento correspondiente al tipo de producto.

Con este C_{TPL} y el Volumen observado, se calcula el volumen a 60°F mediante la ecuación 23 [3]:

$$\text{Volumen observado (gal)} * C_{TPL} = \text{Volumen a 60°F (gal)} \quad (23)$$

Si se desea obtener el volumen a condiciones alternativas, mediante el API, la temperatura y presión alternativas, se calcula un segundo factor de corrección volumétrico C_{PTL2} según el procedimiento que corresponda al tipo de producto.

Con este C_{PTL2} y el Volumen a 60°F se calcula el volumen a las condiciones alternativas mediante la Ecuación 24 [3]:

$$\text{Volumen a cond. alternativas (gal)} = \frac{\text{Volumen a } 60^{\circ}\text{F (gal)}}{C_{TPL2}} \quad (24)$$

3.1.5 Procedimiento de Cálculo a partir de Peso en báscula: Estos cálculos permiten a partir del peso en báscula y la gravedad API, obtener un volumen equivalente a 60°F y adicionalmente a unas condiciones alternativas.

Primero se realiza la conversión de la gravedad API a Densidad a 60°F mediante la Ecuación 25 [3]:

$$\rho = \frac{141.5}{G+131.5} \rho_{w,60} = \frac{141.5}{G+131.5} 999.016 \quad (25)$$

Esta densidad es un valor de densidad en el vacío, por lo cual debe ser convertido a densidad en el aire, mediante la ecuación 1. Con la densidad en el aire a 60°F y el peso en báscula, se calcula el Volumen a 60°F mediante la ecuación 26:

$$\text{Volumen a } 60^{\circ}\text{F (gal)} = \frac{\text{Peso en báscula (Kg)}}{\text{Densidad en el aire a } 60^{\circ}\text{F } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{gal}}\right)} \quad (26)$$

Adicionalmente, si se desea convertir el volumen a unas condiciones alternativas, se calcula el Factor de Corrección Volumétrico (C_{TPL}) a dichas condiciones de presión y temperatura siguiendo el procedimiento adecuado para el tipo de producto y posteriormente se calcula el volumen mediante la ecuación 27 [3]:

$$\frac{\text{Volumen a } 60^{\circ}\text{F (gal)}}{C_{TPL}} = \text{Volumen a condiciones alternativas (gal)} \quad (27)$$

3.1.6 Procedimiento de Cálculo a partir de masa: Estos cálculos permiten a partir de masa y la gravedad API, calcular el volumen a 60°F y a condiciones alternativas. Primero se realiza la conversión de la gravedad API a Densidad a 60°F mediante la Ecuación 25 y posteriormente se calcula el volumen a 60°F mediante la Ecuación 28:

$$\text{Volumen a } 60^{\circ}\text{F (gal)} = \frac{\text{Masa (Kg)}}{\text{Densidad en el vacío a } 60^{\circ}\text{F} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{gal}}\right)} \quad (28)$$

Opcionalmente, para corregir a unas condiciones alternativas, se calcula el Factor de Corrección Volumétrico (C_{TPL}) a dichas condiciones de presión y temperatura siguiendo el procedimiento adecuado para el tipo de producto y posteriormente se calcula el volumen mediante la ecuación 27.

3.2 CONSULTA DE VOLÚMENES CORREGIDOS EN EL SISTEMA OPERACIONAL DE LA REFINERÍA (SIO)

Para efectos de hacer la evaluación comparativa de las correcciones volumétricas realizadas por el SIO versus las realizadas por normas vigentes, se accedió al sistema y se consultaron una serie de datos de medición de tanques de los inventarios de productos.

Se consultaron datos de *Volumen bruto* (Volumen observado), *temperatura observada*, *Gravedad API* y *Volumen Neto a 60°F*. Este último es el resultado de la corrección volumétrica efectuada dentro del SIO. Esta información fue consultada para tanques de Crudo, Jet, Diesel, Gasolina, Disolventes 1,2,3 y 4, Gasolina de Aviación, Base Nafténica Media, Base Nafténica Pesada, Base Parafínica Liviana, Base Parafínica Media, Base Parafínica **Bright Stock**, Parafina Liviana, Parafina Media y Asfalto.

3.3 CONSULTA DE CORRECCIONES VOLUMÉTRICAS Y PESO EN EL SISTEMA DE INFORMACIÓN OPERACIONAL DEL LLENADERO

Para poder realizar una valoración de la forma en la cual se corrigen los volúmenes de los productos liquidados en el Llenadero, se accedió a información de facturas de venta de productos aromáticos (o-xileno, benceno, tolueno, ciclohexano, xilenos, y aromáticos pesados), incluyendo peso en báscula y volumen a 82°F (volumen calculado por el Sistema de Información Operacional del Llenadero a la temperatura de despacho).

3.4 EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS EN LAS CORRECCIONES VOLUMÉTRICAS REALIZADAS POR EL SISTEMA DE INFORMACIÓN Y LAS REALIZADAS SEGÚN LAS NORMAS API MPMS CAPÍTULO 11 SECCIÓN 1 , ASTM D1555, ASTM D4311

3.4.1 Evaluación para los tanques de inventarios de productos: Se calcularon los volúmenes a 60°F de los tanques de productos según las normas vigentes, para lo cual se utilizó el programa desarrollado, teniendo como entradas los datos de la gravedad API, temperatura observada y volumen observado.

Las pérdidas tangibles causadas por las diferencias en los volúmenes corregidos se calculan mediante la Ecuación 29:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{V_{60 \text{ SIO}} - V_{60 \text{ normas vigentes}}}{V_{60 \text{ normas vigentes}}} * 100 \quad (29)$$

Donde:

$V_{60 \text{ SIO}}$ = Volumen a 60°F calculado por SIO

$V_{60 \text{ normas vigentes}}$ = Volumen a 60°F calculado según normas vigentes

3.4.2 Evaluación para los productos liquidados en el Llenadero: Esta evaluación se realizó para productos aromáticos, los cuales son medidos mediante el peso en báscula, pero liquidados de acuerdo a su volumen a 82°F; actualmente, esta corrección es efectuada por el SIO del Llenadero.

Para poder evaluar las diferencias en los volúmenes corregidos a las condiciones de liquidación, se calcularon los volúmenes a 82°F mediante el uso del programa desarrollado, teniendo como entrada el peso en báscula de los productos.

Se calcularon las pérdidas tangibles causadas por la diferencia en los volúmenes corregidos mediante la Ecuación 30:

$$\% \text{ Diferencias} = \frac{V_{82 \text{ SIO}} - V_{82 \text{ normas vigentes}}}{V_{82 \text{ normas vigentes}}} * 100 \quad (30)$$

Donde:

$V_{82 \text{ SIO}}$ = Volumen a 82°F calculado por SIO

$V_{82 \text{ normas vigentes}}$ = Volumen a 82°F calculado según normas vigentes

En este caso las diferencias calculadas representan el porcentaje sobre el volumen de ventas que la refinería está entregando al cliente sin obtener beneficios económicos.

Adicionalmente, el peso de los productos vendidos debe ser convertido a un volumen equivalente a 60°F para efectos de ser tomados en cuenta en el balance volumétrico de la refinería.

Para estimar las diferencias en las condiciones del balance volumétrico, se calculó el volumen equivalente a 60°F a partir del peso en báscula, usando el programa realizado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos al evaluar las pérdidas tangibles debidas a las diferencias en las correcciones volumétricas efectuadas a los diferentes productos analizados. Primero se presentan las desviaciones encontradas en la evaluación de las correcciones volumétricas realizadas a los tanques de inventario de productos y posteriormente las halladas en las correcciones hechas a los productos liquidados en el Llenadero.

4.1 EVALUACIÓN DE LAS CORRECCIONES EFECTUADAS EN LOS TANQUES DE INVENTARIO DE PRODUCTOS

Los resultados obtenidos para las correcciones volumétricas de los tanques de crudos, productos refinados y lubricantes se presentan en las Tablas 3 y 4:

Tabla 3. Cálculo de pérdidas para Crudos y Productos Refinados

Tipo de producto	Producto	API	Temperatura °F	Volumen bruto (bl)	Volumen neto SIO (bl)	Volumen según norma vigente (bl)	% Desviación
CRUDOS	Crudo	24	89,8	168340,43	166262,43	166262,43	0
REFINADOS	Diesel	34	88,9	77572,31	76539,82	76539,82	0
	Jet	41,9	87,6	37850,34	37328,76	37328,76	0
	Disolvente 4	47,7	88,3	7890,43	7771,44	7771,44	0
	Gasolina	60	88,6	79323,67	77764,17	77764,17	0
	Disolvente 1	79,1	87,3	6730,32	6584,14	6584,14	0
	Disolvente 2	63,2	86,1	5823,15	5716,01	5716,01	0
	Disolvente 3	55,9	86,2	5420,52	5326,09	5326,09	0
	Gasolina de Aviación	71,1	85,4	5324,63	5223,36	5223,36	0

Tabla 4. Cálculo de pérdidas para Lubricantes

Tipo de producto	Producto	API	Temperatura °F	Volumen bruto (bl)	Volumen neto SIO (bl)	Volumen según norma vigente (bl)	% Desviación
LUBRICANTES	Base nafténica media	24	100	15115	14864,24	14881,93	0,12
	Base nafténica pesada	22,5	89,6	5087,86	5026,52	5030,42	0,08
	Base parafínica liviana	33,1	103,7	5887,73	5768,03	5782,69	0,25
	Base parafínica media	30	85	8142,15	8051,45	8060,81	0,12
	Base Bright Stock	26,6	86	975,92	964,92	965,99	0,11
	parafina liviana producto	41,7	150	4599,44	4390,68	4420,61	0,68
	parafina media producto	40,4	166	7236,33	6861,42	6906,93	0,66

Para los crudos y productos refinados no se observan diferencias en las correcciones volumétricas. Dentro del grupo de productos lubricantes analizado se incluye: base nafténica media, base nafténica pesada, base parafínica liviana, base parafínica media, base parafínica **bright stock**, parafina liviana y parafina media. Para estos productos se observa que se está reportando un volumen a 60°F inferior al valor real de volumen de producto, lo que ocasiona desviaciones que conducen a una contabilización en el balance volumétrico de hasta un 0,68% menos sobre el volumen total de inventario en este caso de parafina liviana producto.

La forma actual de cálculo de los factores de corrección volumétrica, está generando unos volúmenes de productos en los inventarios que no corresponden a las existencias reales de productos. Además, estos valores son utilizados en la realización de los balances volumétricos de la refinería, por lo

cual se está afectando la veracidad de los mismos y generando pérdidas tangibles para la refinería. Existe entonces una oportunidad de mejora en las correcciones volumétricas de estos productos, que puede ser realizada mediante la implementación de las normas vigentes al Sistema de Información Operacional de la GRB.

Por otra parte, los resultados obtenidos de las correcciones volumétricas para el asfalto se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Pérdidas obtenidas para Asfalto en Inventario

Producto	API	Temperatura (°F)	Volumen bruto (bl)	Volumen SIO60°F (bl)	Volumen a 60 °F según norma vigente	Desviación %
Asfalto	7,2	302	8324,56	7573,19	7642,78	0,92

Al evaluar las diferencias en las correcciones para el asfalto según el SIO y según las normas vigentes (ASTM D4311) se encuentran desviaciones que causan una contabilización en el Balance Volumétrico de la Refinería de 0,92% menos del volumen total de inventario de asfalto, que junto con las desviaciones causadas por los productos lubricantes restan exactitud y confiabilidad a los Balances Generales.

4.2 EVALUACIÓN DE LAS CORRECCIONES EFECTUADAS EN LA LIQUIDACIÓN DE PRODUCTOS AROMÁTICOS

Las desviaciones encontradas en la liquidación de productos aromáticos se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6. Pérdidas encontradas en la liquidación de productos aromáticos

Producto	Peso pto Kg	Volumen a 82°F calculado según norma vigente	Volumen a 82°F liquidado ECP	% Desviación
O-Xileno	34210	10362,59	10350,1	0,12
Ciclohexano	32060	10997,6241	10982,4	0,14
Tolueno	17130	5270,36	5263,9	0,12
Benceno	18350	5573,09	5566,4	0,12
Xileno	8870	2735,07	2731,7	0,12
Aromáticos pesados	32390	9919,53	9907,4	0,12

Para todos los productos aromáticos analizados se observa que el volumen a 82°F, liquidado en las facturas de venta de Ecopetrol es inferior al calculado según la norma vigente. Las diferencias calculadas representan el porcentaje sobre el volumen de ventas que la refinería está entregando al cliente sin obtener beneficios económicos, que para este caso, con la forma actual de liquidación, representan aproximadamente una reducción del 0,12% sobre el volumen total de ventas de estos productos.

Adicionalmente, en el Llenadero se deben convertir los pesos de productos despachados a volúmenes equivalentes a 60°F para ser tenidos en cuenta en los balances volumétricos. Los volúmenes corregidos para estas condiciones se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7. Pérdidas encontradas en la conversión de productos aromáticos despachados a condiciones de balance volumétrico

Producto	Peso producto Kg	Volumen a 60°F calculado según norma vigente	Volumen a 60°F ECP	% Desviación
O-Xileno	34210	10242,53	10230,16	0,12
Ciclohexano	32060	10836,39	10821,41	0,14
Tolueno	17130	5202,11	5195,73	0,12
Benceno	18350	5491,97	5485,30	0,12
Xilenos	8870	2702,38	2699,05	0,12
Aromáticos pesados	32390	9806,26	9794,26	0,12

Según los resultados se encuentra que el volumen de productos a 60°F vendidos por Ecopetrol, es siempre inferior al calculado según la norma ASTM D 1555 vigente, de esta manera se entregan datos de volúmenes de producto despachado hacia el balance volumétrico de la refinería con una desviación del 0,12% menos del volumen total de ventas real, causando una alteración en dicho balance.

Se realizó un estimado de las pérdidas económicas causadas por estas desviaciones basados en los datos de ventas del año 2007, ya que teniendo en cuenta el gran volumen de ventas esto puede generar un gran impacto económico para la compañía. Estas pérdidas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Pérdidas presentadas en la liquidación de productos aromáticos en el año 2007

Producto	Volumen venta 2007 (gal)	Precio por galón a 82 °F	Pérdidas 2007 (\$)
O-Xileno	2684779	7457,51	24026119,5
Ciclohexano	8367531	6554,5	76782974,7
Tolueno	10781566	7623	98625453,1
Benceno	30418	8760	319754,016
Xilenos	12421902	7623	113630591
Aromáticos pesados	745068	7128	6373013,64

Esta desviación para el grupo de aromáticos demuestra que la no implementación de las normas está generando unas pérdidas económicas que alcanzan los \$320.000.000 anuales que aunque no represente un valor significativo comparado con las utilidades anuales de la compañía, podrían evitarse mediante la implementación de las normas vigentes sin requerir inversiones pues sus derechos ya fueron adquiridos.

Las correlaciones desarrolladas por el API y el ASTM se basan en datos experimentales que incluyen valores de diferentes productos a diferentes

condiciones y que fueron ajustados de manera que puedan ser utilizadas en todas partes del mundo. Sin embargo, su aplicación debe ser rigurosa y tener en cuenta los parámetros específicos de cada lugar. Para el caso de la GRB, los productos aromáticos se están liquidando mediante su corrección a 82°F considerando ésta como la temperatura promedio de Barrancabermeja y a la cual se despachan los productos. Esta temperatura no representa las condiciones actuales de la ciudad y al liquidar a menor temperatura se está contabilizando una menor cantidad de producto como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Volúmenes calculados a diferentes temperaturas de despacho.

Producto	Volumen 82 °F	Volumen 84 °F	Pérdidas (\$)
O-Xileno	10363	10374	21229943
Ciclohexano	10998	11013	74700329,5
Tolueno	5270	5277	109023146
Benceno	5573	5581	381955,463
Xilenos	2735	2738	103753279
Aromáticos pesados	9920	9930	5348282,68

La temperatura de despacho tiene una gran incidencia en el volumen liquidado, lo cual está disminuyendo los ingresos por ventas de productos aromáticos en aproximadamente 300.000.000 anuales si se considera que la temperatura ambiente es 84°F. Debido a esto se hace necesario que se replantee la condición de temperatura promedio de Barrancabermeja y se recomienda que se realice un estudio de dicha temperatura para poder establecer un valor acorde a las condiciones actuales.

CONCLUSIONES

Los procedimientos implementados para las correcciones volumétricas en el Sistema de Información Operacional de la Gerencia Refinería Barrancabermeja, requieren ser actualizados, puesto que están generando desviaciones en los volúmenes de productos que se reportan a los balances volumétricos y restando confiabilidad a los procesos de medición; encontrándose las principales desviaciones volumétricas en los productos lubricantes cuyos volúmenes corregidos presentaron diferencias hasta del 0,66% en volumen con respecto a las correcciones según las normas vigentes, y en el asfalto para el cual la diferencia llega a 0,92 % sobre el volumen total de inventario de producto.

Las correcciones volumétricas que se realizan actualmente a los productos en el Llenadero de la GRB están generando pérdidas tangibles del 0,12% sobre el volumen total de venta de los productos aromáticos; estas desviaciones representan el porcentaje sobre el volumen de ventas que la refinería está entregando al cliente sin obtener beneficios económicos. Las pérdidas anteriormente mencionadas pueden evitarse mediante la implementación de los procedimientos de corrección volumétrica vigentes de acuerdo a las normas ASTM D1555

Las correcciones volumétricas de los hidrocarburos generan un gran impacto en la contabilización de los productos, en la confiabilidad de los balances volumétricos de la refinería y en los beneficios económicos de la compañía, ya que aunque las desviaciones no superan el 1%, al considerar el alto valor de los productos y volumen de ventas, este porcentaje se considera significativo.

La implementación de las normas vigentes para las correcciones volumétricas no requiere mayores inversiones económicas para la empresa, pero si genera beneficios económicos importantes

BIBLIOGRAFÍA

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test method for calculation of volume and weight of industrial aromatic hydrocarbons and cyclohexane. West Conshohocken: ASTM,2004. (D-1555-04)

[2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS Standard Guide for Petroleum Measurement Tables. West Conshohocken: ASTM,1997 (ASTM D1250-80)

[3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Manual for petroleum measurement standards. Chapter 11, Physical Properties Data. Section 1, Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils.Washington: *API*,2004. (API MPMS 11.1-2004)

[4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS Standard practice for determining asphalt volume correction to a base temperature. West Conshohocken:ASTM,2004. D 4311-04

ANEXOS

ANEXO A: Método para convertir temperatura a partir de una base ITS-90 (Internacional Temperature Scale of 1990) a IPTS-68 (Internacional Temperature Scale of 1968)

Cuando se realizaron las Tablas de Medida del Petróleo, la escala de temperatura en uso era la **International Practical Temperature Scale** (IPTS-68). Esta escala fue sustituida con la **International Temperature Scale** (ITS-90) en en el año 1990. El principal parámetro físico contenido en las Tablas de Medida del Petróleo que se afecta con el cambio de escala de temperatura es la densidad y sus propiedades relacionadas densidad relativa y gravedad API.

Debido a estos cambios se decidió incorporar procedimientos para tomar en cuenta las diferencias entre estas dos escalas, convirtiendo las temperaturas de entrada en ITS-90 a valores equivalentes en IPST-68 antes de realizar cualquier cálculo.

Los desarrolladores de la escala ITS-90 ajustaron las diferencias entre las temperaturas en escala IPTS-68 e ITS-90 mediante un polinomio de grado 8 según la ecuación A1.

$$\Delta_t = t_{C,90} - t_{C,68} = \sum_{i=1}^8 a_i \left(\frac{t_{C,90}}{630} \right)^i \quad (A1)$$

Donde los coeficientes a_i se presentan en la siguiente tabla B1 [2]:

Tabla B1. Coeficientes a_i

i	a_i
1	-0.148759
2	-0.267408
3	1.080760
4	1.269056
5	-4.089591
6	-1.871251
7	7.438081
8	-3.536296

ANEXO B. CAMBIO EN EL VALOR DE LA TEMPERATURA BASE.

Para utilizar una temperatura base diferente de 60°F (en escala IPTS-68), se dividen las dos expresiones que relacionan las densidades a la temperatura deseada y a la temperatura base.

$$\frac{\rho}{\rho_T} = \frac{\frac{\rho}{\rho_{60}}}{\frac{\rho_T}{\rho_{60}}} = \frac{\exp\{-\alpha_{60}(t - 60)[1 + 0.8\alpha_{60}(t - 60)]\}}{\exp\{-\alpha_{60}(T - 60)[1 + 0.8\alpha_{60}(T - 60)]\}}$$

Esto da como resultado la ecuación B1 que sirve para calcular el Factor de corrección por efecto de la temperatura para una temperatura base diferente de 60°F (en escala IPTS-68)

$$\frac{\rho}{\rho_T} = \exp\{-\alpha_{60}(t - T)[1 + 0.8\alpha_{60}(t - T + 2(T - 60))]\} \quad (B1)$$

El factor $2(T-60)$ se define como el factor de corrección de base de temperatura δ_T y su valor para una temperatura base de 60°F (en escala ITS-90) se calcula como:

$$\delta_T = 2(60.007-60) = 0.01374979547 \quad (B2)$$

ANEXO C. PROPIEDADES FÍSICAS DE PRODUCTOS AROMÁTICOS Y CICLOHEXANO.

Las propiedades físicas de los productos aromáticos se presentan a continuación [2]:

Tabla C1. Propiedades físicas productos aromáticos y ciclohexano

Producto	Punto de congelación °F	Punto de ebullición °F	Densidad a 60 °F en el vacío g / cc	Densidad a 60 °F en el vacío Kg / gal	Densidad a 60 °F en el aire Kg / gal
Benceno	42.0	176.2	0.88373	3.34528	3.34124
Cumeno	-140.9	306.3	0.86538	3.27582	3.27177
Ciclohexano	43.8	177.3	0.78265	2.96265	2.95856
Etilbenceno	-139	277.1	0.87077	3.29622	3.29218
Stireno	-23.1	293.4	0.90979	3.44393	3.43991
Tolueno	-139.0	231.1	0.87096	3.29694	3.29290
m-Xileno	-54.2	282.4	0.86784	3.28513	3.28108
o-Xileno	-13.3	291.9	0.88340	3.34403	3.33999
p-Xileno	55.9	281.0	0.86456	3.27272	3.26867

ANEXO D.GUÍA PARA EL MANEJO DE LA HERRAMIENTA DE AUDITORÍA PARA CORRECCIONES VOLUMÉTRICAS SEGÚN NORMAS API MPMS CAPITULO 11 SECCIÓN 1, ASTM D 155-04, ASTM D4311.

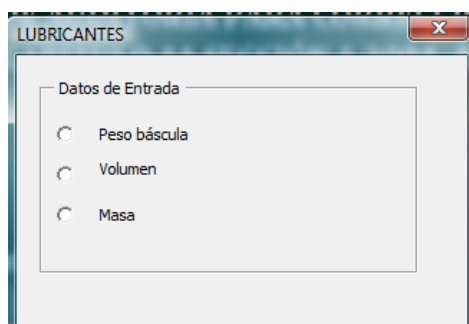
Primero se debe seleccionar el tipo de producto para el cual se desean realizar las correcciones, en la Figura A1 se muestran las opciones de productos para seleccionar.

Figura A1. Selección de productos en la herramienta de auditoría.



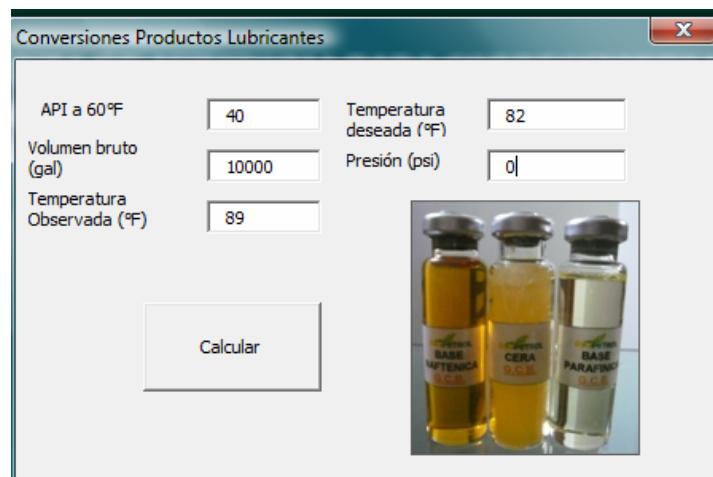
Al seleccionar el tipo de producto, aparece una ventana como la mostrada en la Figura A2, en la cual se debe seleccionar el tipo de dato de entrada, es decir si el valor que se desea corregir es un volumen medido, un peso o una masa de producto.

Figura A2. Selección de datos de entrada en la herramienta de auditoría.



Después de seleccionar el tipo de datos de entrada, aparece una ventana para ingresar los datos, según se muestra en la Figura A3. Los datos solicitados son la gravedad API a 60°F, el volumen medido (bruto), la temperatura observada, la temperatura deseada (a la cual se quiere calcular el volumen equivalente) y la presión a la cual se desea corregir.

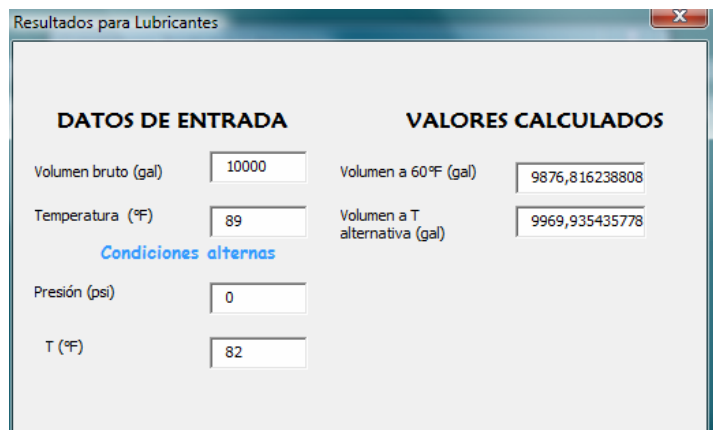
Figura A3. Ventana para ingreso de datos de entrada para la herramienta de auditoría



The screenshot shows a software window titled "Conversiones Productos Lubricantes". It contains several input fields for data entry: "API a 60°F" (value: 40), "Volumen bruto (gal)" (value: 10000), "Temperatura Observada (°F)" (value: 89), "Temperatura deseada (°F)" (value: 82), and "Presión (psi)" (value: 0). A "Calcular" button is located at the bottom left. On the right side, there is an image of three small glass vials containing different colored liquids (yellow, orange, and clear).

Al hacer clic en el botón Calcular se visualiza una ventana como la mostrada en la Figura A4, en la cual se presentan tanto los datos de entrada del programa, como los valores calculados. La herramienta calcula tanto el volumen equivalente a 60 °F como el volumen a la temperatura que el usuario desee.

Figura A4. Ventana de Resultados de la herramienta de auditoría.



The screenshot shows a software window titled "Resultados para Lubricantes". It is divided into two main sections: "DATOS DE ENTRADA" and "VALORES CALCULADOS".

DATOS DE ENTRADA		VALORES CALCULADOS	
Volumen bruto (gal)	10000	Volumen a 60°F (gal)	9876,816238808
Temperatura (°F)	89	Volumen a T alternativa (gal)	9969,935435778
Condiciones alternas			
Presión (psi)	0		
T (°F)	82		