

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**APLICACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL MÉTODO DE
CÁLCULO VOLUMÉTRICO EN TANQUES ESTACIONARIOS DE
PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP**

OPCIÓN: TRABAJO TÉCNICO EXPERIMENTAL

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
PETRÓLEOS**

ROMEL RICAR ARIAS CASTELLANO

romel.arias2013b@gmail.com

DIRECTOR: MSc. FRANKLIN VINICIO GÓMEZ SOTO

franklin.gomez@epn.edu.ec

Quito, Enero 2019

DECLARACIÓN

Yo, Romel Richar Arias Castellano, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Romel Richar Arias Castellano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Romel Richar Arias Castellano, bajo mi supervisión.

MSc. Franklin Vinicio Gómez
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Georgina y a mi padre Jorge, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida. A mis hermanos que siempre han estado pendientes de mi bienestar y desempeño.

A la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero “ARCH”, en especial a las Ingenieras Lizbeth Calispa, Fernanda Puga y a todos los Ingenieros que conforman la Coordinación de Gestión de Control Técnico de la comercialización de GLP y Gas Natural, mi gratitud con todos ustedes por apoyarme en el desarrollo de mi trabajo de titulación, sobretodo el agradecimiento por su confianza y amistad durante mi estancia en la ARCH.

Al Ingeniero Franklin Gómez, por su guía y ayuda constante durante el desarrollo de este trabajo de titulación, le estoy muy agradecido.

A mis amigos y compañeros de la universidad, les agradezco por su amistad y apoyo en todo momento.

DEDICATORIA

Mi dedicatoria a mi madre y mi padre por su cariño, su apoyo, su confianza en mí y por guiarme siempre por el buen camino. Les expreso mi infinito agradecimiento por su sacrificio para poder brindarme la educación y por siempre estar a mi lado en todo momento, escuchándome y aconsejándome.

A mis hermanos por su apoyo y constante guía a largo de toda mi vida.

A todos mis amigos, que han estado presentes en todo momento apoyándome.

A mis primos ausentes, gracias por su amistad y apoyo en vida, nos encontraremos algún día.

Muchas gracias a todos ustedes.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| DECLARACIÓN | I |
| CERTIFICACIÓN | II |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| DEDICATORIA..... | IV |
| CONTENIDO..... | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| ÍNDICE DE ANEXOS | X |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | XI |
| SIMBOLOGÍA..... | XIV |
| RESUMEN | 1 |
| PRESENTACIÓN | 2 |
| CAPÍTULO I | 4 |
| MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 1.1. GENERALIDADES DEL GLP | 4 |
| 1.1.1. DEFINICIÓN DE GLP | 4 |
| 1.1.2. OBTENCIÓN DEL GLP..... | 4 |
| 1.1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL GLP | 5 |
| 1.1.3.1. Estado..... | 5 |
| 1.1.3.2. Peso..... | 5 |
| 1.1.3.3. Olor y Color | 5 |
| 1.1.3.4. Toxicidad..... | 5 |
| 1.1.3.5. Inflamabilidad..... | 6 |
| 1.1.4. TIPOS DE GLP COMERCIALES | 6 |
| 1.1.4.1. GLP Propano Comercial | 7 |
| 1.1.4.2. GLP Butano Comercial | 7 |
| 1.2. ALMACENAMIENTO DE GLP..... | 7 |
| 1.2.1. DEFINICIÓN DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO | 7 |
| 1.2.2. CALIBRACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO | 7 |
| 1.2.2.1. Métodos de calibración de tanques de almacenamiento. | 8 |
| 1.2.3. TANQUES ESTACIONARIOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE GLP..... | 10 |

| | | |
|--------------------------|---|-----------|
| 1.2.3.1. | Tipos de Tanques Estacionarios | 10 |
| 1.2.4. | PARTES DE UN TANQUE ESTACIONARIO..... | 12 |
| 1.2.4.1. | Válvula para llenado..... | 13 |
| 1.2.4.2. | Válvula de servicio para líquido | 13 |
| 1.2.4.3. | Válvula de seguridad..... | 13 |
| 1.2.4.4. | Válvula para retorno de vapor | 13 |
| 1.2.4.5. | Válvula de servicio de gas | 14 |
| 1.2.4.6. | Válvula de drenaje | 14 |
| 1.2.4.7. | Medidor Magnético de nivel | 14 |
| 1.2.4.8. | Rotogage | 14 |
| 1.2.4.9. | Termómetro | 15 |
| 1.2.4.10. | Manómetro..... | 15 |
| 1.2.4.11. | Placa de identificación del tanque..... | 15 |
| 1.3. | PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP..... | 15 |
| 1.3.1. | CONFIGURACIÓN GENERAL DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 15 |
| 1.3.2. | PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP EXISTENTES A NIVEL NACIONAL | 18 |
| 1.3.3. | DESPACHO DE PRODUCTO HACIA PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP CONSIDERADAS..... | 19 |
| 1.4. | DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE GLP ALMACENADO EN TANQUES ESTACIONARIOS SEGÚN LA NORMA API 14.8..... | 20 |
| CAPÍTULO II | | 22 |
| METODOLOGÍA | | 22 |
| 2.1. | ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE GLP EN TANQUES ESTACIONARIOS BASADO EN LA NORMA API 14.8..... | 22 |
| 2.1.1. | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA NORMA PARA OBTENCIÓN DE VOLÚMENES EN ESTADO LÍQUIDO Y DE VAPOR..... | 22 |
| 2.1.2. | PROCEDENCIA DE LAS ECUACIONES APLICADAS EN EL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE LA NORMA 14.8..... | 23 |
| 2.1.2.1. | Ecuación para la obtención del Volumen de GLP en estado líquido a condiciones estándar | 24 |
| 2.1.2.2. | Ecuación para la obtención del volumen de GLP en estado de vapor a condiciones estándar..... | 24 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.1.2.3. | Ecuación para obtención del volumen total de GLP | 25 |
| 2.1.3. | CONSIDERACIONES PREVIAS A LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO | 25 |
| 2.1.3.1. | Presión y Temperatura..... | 25 |
| 2.1.3.2. | Volumen de GLP Líquido | 26 |
| 2.1.3.3. | Volumen de GLP en estado de vapor | 27 |
| 2.1.4. | EJEMPLO DE CÁLCULO DE VOLUMEN DE GLP | 31 |
| 2.2. | APLICACIÓN DEL CÁLCULO VOLUMÉTRICO PARA LA OBTENCIÓN DE MASA DE GLP | 36 |
| 2.2.1. | APLICACIÓN 1 USANDO PROPIEDADES DE LÍQUIDOS Y GASES PARA LA OBTENCIÓN DE MASA | 36 |
| 2.2.1.1. | Procedencia de las ecuaciones a usarse en la Aplicación 1 para la obtención de masa | 37 |
| 2.2.1.2. | Consideraciones previas al cálculo de masa del GLP con la Aplicación 1 | 42 |
| 2.2.1.3. | Cálculo de masa del GLP con la Aplicación 1..... | 48 |
| 2.2.2. | APLICACIÓN 2 USANDO PROPIEDADES DE LÍQUIDOS Y EQUIVALENTE DE GAS EN LÍQUIDO | 50 |
| 2.2.2.1. | Procedencia de las ecuaciones s a usarse en la Aplicación 2 para la obtención de masa. | 50 |
| 2.2.2.2. | Cálculo de masa del GLP con la Aplicación 2..... | 51 |
| 2.3. | ANÁLISIS DETALLADO DE MÉTODOS DE CÁLCULO VOLUMÉTRICOS Y DE MASA EMPLEADOS EN LAS PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP CONSIDERADAS | 52 |
| 2.3.1. | ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA ECOGAS SALCEDO | 53 |
| 2.3.1.1. | Descripción del Método proporcionado por Ecogas Salcedo... .. | 54 |
| 2.3.1.2. | Estructuración del Método aplicado en Ecogas Salcedo | 56 |
| 2.3.2. | ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA DURAGAS PIFO | 62 |
| 2.3.2.1. | Descripción del Método proporcionado por Duragas Pifo | 64 |
| 2.3.2.2. | Estructuración del Método aplicado por Duragas Pifo | 66 |
| 2.3.3. | ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA ENI PIFO | 71 |
| 2.3.3.1. | Descripción del Método proporcionado por ENI Pifo..... | 73 |
| 2.3.3.2. | Estructuración completa del Método proporcionado por ENI Pifo..... | 74 |

| | |
|--|-----|
| 2.4. CÁLCULO DE PORCENTAJES DE ERROR | 78 |
| 2.4.1. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ECOGAS SALCEDO. | 79 |
| 2.4.2. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA DURAGAS PIFO..... | 81 |
| 2.4.3. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ENI PIFO | 82 |
| CAPÍTULO III | 84 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 84 |
| 3.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS Y ESTRUCTURACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LAS PLANTAS CONSIDERADAS | 84 |
| 3.1.1. RESULTADOS EN LA PLANTA ECOGAS SALCEDO | 84 |
| 3.1.2. RESULTADOS EN LA PLANTA DURAGAS PIFO | 85 |
| 3.1.3. RESULTADOS EN LA PLANTA ENI PIFO. | 86 |
| 3.2. CONSIDERACIONES PARA LA ESTANDARIZACIÓN DE UN MÉTODO DE CÁLCULO DE MASA DE GLP..... | 88 |
| 3.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE MASA EMPLEADOS EN PLANTAS Y EL MÉTODO ESTANDARIZADO..... | 90 |
| 3.4. RESULTADOS DE PORCENTAJES DE ERROR EN LAS PLANTAS CONSIDERADAS | 91 |
| 3.4.1. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ECOGAS SALCEDO..... | 91 |
| 3.4.2. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA DURAGAS PIFO. | 91 |
| 3.4.3. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ENI PIFO..... | 92 |
| CAPÍTULO IV | 93 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 93 |
| 4.1. CONCLUSIONES..... | 93 |
| 4.2. RECOMENDACIONES | 95 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| ANEXOS | 101 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. TANQUE ESTACIONARIO HORIZONTAL PARA EL ALMACENAMIENTO DE GLP..... | 11 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 1.2. TANQUES ESTACIONARIOS ESFÉRICOS PARA ALMACENAMIENTO DE GLP | 12 |
| Figura 1.3. CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN TANQUE ESTACIONARIO HORIZONTAL PARA ALMACENAMIENTO DE GLP..... | 12 |
| Figura 1.4. ISLA DE CARGA Y DESCARGA EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 16 |
| Figura 1.5. TANQUES ESTACIONARIOS EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 16 |
| Figura 1.6. SISTEMA DE BOMBAS-COMPRESORES EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP. | 17 |
| Figura 1.7. CARRUSEL DE ENVASADO EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 17 |
| Figura 1.8. SISTEMA DE TUBERÍAS CONTRA INCENDIOS EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 18 |
| Figura 1.9. TALLER DE MANTENIMIENTO PARA CILINDROS EN PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | 18 |
| Figura 2.1. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA ECOGAS SALCEDO Y EL ESTANDARIZADO | 80 |
| Figura 2.2. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA ECOGAS SALCEDO Y EL ESTANDARIZADO..... | 80 |
| Figura 2.3. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA DURAGAS PIFO Y EL ESTANDARIZADO | 81 |
| Figura 2.4. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA DURAGAS PIFO Y EL ESTANDARIZADO | 81 |
| Figura 2.5. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA ENI PIFO Y EL ESTANDARIZADO..... | 82 |
| Figura 2.6. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA ENI PIFO Y EL ESTANDARIZADO..... | 83 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|---|
| Tabla 1.1. PROPIEDADES QUÍMICAS ADICIONALES DEL GLP..... | 6 |
|--|---|

| | |
|--|----|
| Tabla 1.2. RESUMEN DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN SEGÚN EL TIPO DE TANQUE..... | 10 |
| Tabla 1.3. CONSOLIDADO DE PLANTAS EXISTENTES EN ECUADOR..... | 19 |
| Tabla 1.4. DESPACHO DE GLP EN PLANTAS DE COTOPAXI-PICHINCHA... | 20 |
| Tabla 2.1. INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA A 60°F | 33 |
| Tabla 2.2. INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL PESO MOLECULAR . | 43 |
| Tabla 2.3. COMPOSICIÓN EN VOLUMEN DEL GLP PRODUCIDO EN SUSHUFINDI | 44 |
| Tabla 2.4. PESO MOLECULAR DE LOS COMPONENTES DEL GLP..... | 45 |
| Tabla 2.5. CÁLCULOS DE PESO MOLECULAR APARENTE..... | 46 |
| Tabla 2.6. FACTOR “z” A CONDICIONES ESTÁNDAR PARA CADA COMPONENTE DEL GLP | 47 |
| Tabla 2.7. CÁLCULO DE VALORES DE "z" PARA CADA COMPONENTE DEL GLP CON FRACCIONES MOLARES | 48 |
| Tabla 2.8. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ECOGAS SALCEDO | 80 |
| Tabla 2.9. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA DURAGAS PIFO | 81 |
| Tabla 2.10. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ENI PIFO..... | 82 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO 1. GRÁFICA PARA DETERMINACIÓN DE FACTOR B DESCRITO EN LA NORMA GPA 8195-95..... | 102 |
| ANEXO 2. GRÁFICA PARA DETERMINACIÓN DE FACTOR F DESCRITO EN LA NORMA GPA 8195-95..... | 104 |
| ANEXO 3. INSTRUCCIONES DE USO DE TABLA 33 DESCRITA EN LA NORMA ASTM 1250-80 | 106 |
| ANEXO 4. INSTRUCCIONES DE USO DE LA TABLA 34 DESCRITA EN LA NORMA ASTM 1250-80..... | 108 |
| ANEXO 5. TABLA 33 EXTRAIDA DE LA NORMA ASTM 1250-80..... | 110 |
| ANEXO 6. TABLA 34 EXTRAIDA DE LA NORMA ASTM 1250-80..... | 115 |
| ANEXO 7. CÁLCULOS DE PORCENTAJES DE ERROR EN PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP..... | 119 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| (2.1) VOLUMEN TOTAL DE GLP A CONDICIONES ESTÁNDAR (API 14.8) ... | 22 |
| (2.2) VOLUMEN DE GLP EN FASE LÍQUIDA A CONDICIONES ESTÁNDAR (API 14.8)..... | 22 |
| (2.3) VOLUMEN DE GLP VAPOR EQUIVALENTE EN LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR (API 14.8)..... | 22 |
| (2.4) LEY COMBINADA DE LOS GASES IDEALES | 24 |
| (2.5) VOLUMEN DE GLP VAPOR A CONDICIONES ESTÁNDAR | 25 |
| (2.6) VOLUMEN SIMPLIFICADO DE GLP VAPOR EQUIVALENTE EN LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR | 25 |
| (2.7) OBTENCIÓN DE LA PRESIÓN ABSOLUTA | 25 |
| (2.8) OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNIDADES DE KELVIN | 26 |
| (2.9) OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNIDADES DE RANKINE | 26 |
| (2.10) OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNIDADES DE GRADOS FARENHEIT | 26 |
| (2.11) VOLUMEN DE GLP VAPOR MEDIDO EN EL TANQUE ESTACIONARIO | 28 |
| (2.12) FACTOR DE CORRECCIÓN DE VOLUMEN PARA FASE DE VAPOR.. | 29 |
| (2.13) FACTOR DE TRANSFORMACIÓN DEL VOLUMEN DE GLP EN ESTADO DE VAPOR EN SU EQUIVALENTE EN LÍQUIDO | 29 |
| (2.14) VOLUMÉN DE GLP VAPOR EQUIVALENTE EN LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR (GPA 8195-95) | 30 |
| (2.15) MASA TOTAL DE GLP A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 1) | 36 |
| (2.16) MASA DE GLP EN FASE LÍQUIDA A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 1)..... | 36 |
| (2.17) MASA DE GLP EN FASE VAPOR A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 1)..... | 36 |
| (2.18) GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL GLP LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR..... | 38 |
| (2.19) DENSIDAD DEL GLP LÍQUIDO..... | 38 |
| (2.20) LEY DE GASES REALES..... | 39 |

| | |
|--|----|
| (2.21) MOLES DE UN GAS..... | 39 |
| (2.22) ECUACIÓN DE LA CONSTANTE UNIVERSAL DE LOS GASES | 40 |
| (2.23) OBTENCIÓN DEL PESO MOLECULAR APARENTE DE UNA MEZCLA DE GASES..... | 44 |
| (2.24) MOLES DE UN GAS DESPEJADA DE LEY DE GASES REALES | 45 |
| (2.25) FRACCIÓN MOLAR | 45 |
| (2.26) OBTENCIÓN DEL FACTOR DE DESVIACIÓN “z” PARA UNA MEZCLA DE GASES..... | 47 |
| (2.27) MASA TOTAL DE GLP A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 2) | 50 |
| (2.28) MASA DE GLP LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 2) | 50 |
| (2.29) MASA DE GLP VAPOR A CONDICIONES ESTÁNDAR (APLICACIÓN 2) | 50 |
| (2.30) DENSIDAD DEL GLP EN FUNCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA ESTÁNDAR..... | 51 |
| (2.31) MASA DE GLP LÍQUIDO USADA POR ECOGAS SALCEDO | 54 |
| (2.32) MASA DE GLP VAPOR USADA POR ECOGAS SALCEDO..... | 55 |
| (2.33) FACTOR DE PRESIÓN USADA POR ECOGAS SALCEDO..... | 55 |
| (2.34) MASA TOTAL DE GLP USADA POR ECOGAS SALCEDO..... | 56 |
| (2.35) VOLUMEN DE GLP LÍQUIDO ESTRUCTURADO PARA ECOGAS SALCEDO | 57 |
| (2.36) MASA DE GLP LÍQUIDO ESTRUCTURADO PARA ECOGAS SALCEDO | 58 |
| (2.37) VOLUMEN DE GLP LÍQUIDO A CONDICIONES DEL TANQUE ESTRUCTURADA PARA ECOGAS SALCEDO..... | 58 |
| (2.38) OBTENCIÓN DEL FACTOR RA | 60 |
| (2.39) OBTENCIÓN DE PRESIÓN ABSOLUTA ESTRUCTURADA PARA ECOGAS SALCEDO..... | 62 |
| (2.40) MASA DE GLP VAPOR ESTRUCTURADO PARA ECOGAS SALCEDO | 62 |
| (2.41) VOLUMEN DE GLP LÍQUIDO EN TANQUE USADA POR DURAGAS PIFO | 64 |

| | |
|--|----|
| (2.42) VOLUMEN DE GLP LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR USADA POR DURAGAS PIFO | 64 |
| (2.43) MASA DE GLP LÍQUIDO USADA POR DURAGAS PIFO | 65 |
| (2.44) VOLUMEN DE GLP VAPOR EN TANQUE USADA POR DURAGAS PIFO | 65 |
| (2.45) MAS DE GLP VAPOR USADA POR DURAGAS PIFO | 65 |
| (2.46) FACTOR DE PRESIÓN USADA POR DURAGAS PIFO | 66 |
| (2.47) MASA TOTAL DE GLP USADA DE DURAGAS PIFO | 66 |
| (2.48) PORCENTAJE EN VOLUMEN DE GLP VAPOR ESTRUCTURADO PARA DURAGAS PIFO | 69 |
| (2.49) FACTOR DE PRESIÓN ESTRUCTURADO PARA DURAGAS PIFO..... | 71 |
| (2.50) MASA DE GLP VAPOR ESTRUCTURADO PARA DURAGAS PIFO..... | 71 |
| (2.51) MASA DE GLP LÍQUIDO USADA POR ENI PIFO..... | 73 |
| (2.52) MASA DE GLP VAPOR USADA POR ENI PIFO..... | 73 |
| (2.53) MASA TOTAL DE GLP USADA POR ENI PIFO..... | 74 |
| (2.54) VOLUMEN DE GLP LÍQUIDO A CONDICIONES ESTÁNDAR ESTRUCTURADA PARA ENI PIFO..... | 75 |
| (2.55) MASA DE GLP LÍQUIDO ESTRUCTURADA PARA ENI PIFO | 76 |
| (2.56) VOLUMEN DE GLP VAPOR EN EL TANQUE ESTRUCTURADA PARA ENI PIFO..... | 76 |
| (2.57) OBTENCIÓN DE PRESIÓN ABSOLUTA ESTRUCTURADA PARA ENI PIFO..... | 78 |
| (2.58) MASA DE GLP VAPOR ESTRUCTURADA PARA ENI PIFO..... | 78 |
| (2.59) CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR | 79 |

SIMBOLOGÍA

| SÍMBOLO | SIGNIFICADO | DIMENSIONES |
|------------------------------------|---|----------------------|
| GLP | Gas Licuado de Petróleo | |
| ST | Condiciones Estándar | |
| C₃H₈ | Propano | |
| C₄H₁₀ | Butano | |
| BLEVE | Explosión de Vapores | |
| z | Factor de desviación de un gas | |
| FCV | Factor de corrección volumétrica para líquido | |
| B | Variable algebraica para cálculo de factor de compresibilidad del vapor | |
| F | Variable algebraica para cálculo de factor de compresibilidad del vapor | |
| F_{VL/VG} | Factor de relación entre estado líquido y de gas | |
| V_{TK} | Máxima capacidad volumétrica de un tanque | L³ |
| mT_{ST} | Masa total del GLP a condiciones estándar | M |
| VT_{ST} | Volumen total de GLP a condiciones estándar | L³ |

RESUMEN

El presente trabajo se basa en la estructuración de un método de cálculo volumétrico del Gas Licuado de Petróleo (GLP) contenido en recipientes denominados tanques estacionarios, el proceso de cálculo del cual parte este trabajo sigue los lineamientos descritos en la norma API MPMS 14.8, además es necesario el uso adicional de las normas ASTM D 1250-80 y GPA 8195-95 las mismas que serán de gran utilidad para la obtención de datos y factores que se incluyen en este proceso.

Posteriormente el cálculo volumétrico se utilizará en la obtención de la masa del GLP en unidades de kg, considerándose que existen 2 aplicaciones para lograr este propósito, la primera consiste en el uso de propiedades de líquido y gas real, mientras que la segunda emplea un proceso de conversión de la fase de gas (estado de vapor) a la fase líquida con el fin de utilizar propiedades únicamente para líquido y facilitar los cálculos.

Finalmente la aplicación más adecuada es estandarizada, considerándose los datos de 3 plantas de almacenamiento y envasado de GLP como son ENI Pifo, Duragas Pifo y Ecogas Salcedo, constituyéndose de esta manera un método único de cálculo de masa en el que se incluye la obtención de volumen.

Es importante indicar que el método de cálculo de masa se estructura de acuerdo a las normas técnicas mencionadas, y posteriormente se realiza un análisis comparativo entre los métodos que usan las plantas y el método estandarizado, además se realiza porcentajes de error para comprobar la confiabilidad del método estandarizado y así poderlo recomendar en procesos de fiscalización del GLP.

PRESENTACIÓN

La problemática identificada en la actualidad a nivel nacional en cuanto a la fiscalización de la cantidad de Gas Licuado de Petróleo presente en los sitios de despacho de este producto que son las plantas de almacenamiento y envasado, es la carencia de un método adecuado para la determinación de la cantidad de GLP almacenado en tanques estacionarios, lo cual se constituye en otro problema que radica en que cada planta utiliza un proceso diferente para la determinación de la cantidad del producto con lo que los valores calculados son reportados al ente regulador sin la previa verificación de la veracidad de los resultados

Entonces con la consideración de esta problemática, lo que se propone en el presente trabajo es estructurar en primer lugar el método de cálculo volumétrico de GLP almacenado en tanques estacionarios presentes en la plantas, para posteriormente incluir este proceso en el cálculo de masa en unidades de kg, y así finalmente construir un solo método de obtención de masa en base a las respectivas justificaciones y lineamientos descritos en normas internacionales exclusivas para el manejo de este producto como son normas: API, ASTM y GPA, además del uso de las respectivas propiedades de líquidos y gases.

El método aquí descrito podrá ser aplicado a nivel nacional, debido a su facilidad de uso y a que cuenta con la justificación correspondiente, además el método fue probado usando información de las plantas: ENI Pifo, Duragas Pifo y Ecogas Salcedo, por lo que es confiable y recomendable su uso.

Objetivo General

Aplicar y estandarizar un método de cálculo volumétrico de GLP almacenado en tanques estacionarios.

Objetivos Específicos

- Analizar los métodos para calibración de recipientes contenedores de GLP, para el posterior cálculo del volumen del producto.

- Revisar detalladamente el procedimiento para el cálculo volumétrico de GLP almacenado en tanques estacionarios, descrito en la norma API 14-sección 8.
- Evaluar los métodos usados en cada una de las plantas de almacenamiento y envasado de GLP a considerarse en este trabajo.
- Determinar los errores existentes entre el método descrito en la norma API y los métodos empleados actualmente en las plantas de almacenamiento y envasado de GLP ubicadas en las provincias de Pichincha y Cotopaxi.
- Estandarizar un único método luego del respectivo análisis técnico.
- Recomendar el método desarrollado para aplicación específica en las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas.

Alcance

El trabajo aquí presentado, pretende estandarizar un método o procedimiento de cálculo del volumen de GLP contenido en tanques estacionarios y que tendrá aplicación para el posterior cálculo de masa en plantas de almacenamiento y envasado de GLP.

Específicamente las plantas que se serán consideradas para la aplicación del método son: ENI Pifo, Duragas Pifo y Ecogas Salcedo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. GENERALIDADES DEL GLP

1.1.1. DEFINICIÓN DE GLP

El significado de las siglas GLP corresponde a Gas Licuado de Petróleo, el cual es un producto que se obtiene de una mezcla de hidrocarburos derivados del petróleo, entre los que se destacan en mayor porcentaje el propano (C_3H_8) y el butano (C_4H_{10}), además de otros componentes en menor cantidad como pueden ser etano, pentano entre otros (Guevara, A. y Vinueza, J., 2001).

Un dato de importancia es diferenciar el GLP del Gas natural, una forma sencilla tiene que ver con la composición, pues el Gas natural esencialmente está compuesto por aproximadamente un 90% de metano, mientras que el GLP como ya se explicó se constituye principalmente por propano y butano (Osinergmin, 2012).

1.1.2. OBTENCIÓN DEL GLP

El GLP puede ser producido fundamentalmente mediante 2 formas conocidas:

- Mediante extracción del Gas natural y procesamiento del mismo en plantas recuperadoras del Gas natural para separar sus componentes y así realizar la posterior obtención del GLP (Di Pelino, A., Vianco, G., Iglesias, F., Katz, P. y Daniele, M., 2002).
- Mediante procesos de refinación del petróleo crudo, el proceso más común es el denominado destilación fraccionada, que también es aplicado para la obtención de otros combustibles derivados como es el caso de las gasolinas (Di Pelino, A., Vianco, G., Iglesias, F., Katz, P. y Daniele, M., 2002).

Un dato importante en cuanto al término de Gas Licuado, tiene su explicación considerando que este producto para su adecuado transporte, almacenamiento y comercialización en recipientes o tanques presurizados, necesita estar en una

fase o estado líquido, entonces, la mezcla de propano-butano en estado gaseoso y demás hidrocarburos presentes en el GLP , es sometida a elevados valores de presión que superan a la presión atmosférica, partiendo para ello desde la presión de vapor de la mezcla de gases, además se aplica temperaturas muy bajas menores que la ambiente, lo cual finalmente dará como resultado una mezcla de gases en estado o fase líquida. A todo este proceso se le denomina licuefacción y que dará como resultado el GLP en el estado líquido que se requiere (Guevara, A. y Vinuesa, J., 2001).

1.1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL GLP

1.1.3.1. Estado

El GLP tiene la característica de encontrarse en estado de gas cuando se expone a condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente El estado líquido del GLP se obtiene mediante el proceso de licuefacción (Di Pelino, A., Vianco, G., Iglesias, F., Katz, P. y Daniele, M., 2002).

1.1.3.2. Peso

El GLP en estado gaseoso pesa alrededor del doble que el aire, razón por la cual en caso de fugas tiende a depositarse en sitios bajos, sin embargo el GLP líquido presenta un peso equivalente a la mitad del agua y en el caso de encontrarse ambos fluidos en contacto el agua se ubicaría en el fondo del recipiente que los contenga (López, J., 2001).

1.1.3.3. Olor y Color

El GLP no tiene un color ni un olor definido, sin embargo para poder prevenir cualquier inconveniente en caso de fugas y detectarlo a tiempo, previo al almacenamiento o envasado del producto , se le añade una sustancia odorizante a base de mercaptanos (Osinergmin, 2012).

1.1.3.4. Toxicidad

El GLP no es tóxico, sin embargo tiene la característica de desplazar al oxígeno presente en el aire, por lo que dado el caso de una fuga de GLP en un lugar con

poca ventilación, el aire en contacto con las personas tendría un elevado contenido de gas, lo cual ocasionaría daño fisiológico (Osinergmin, 2012).

1.1.3.5. Inflamabilidad

El GLP es un producto inflamable en espacios abiertos y explosivo cuando el producto se encuentra en lugares cerrados o confinado, además en el caso de tener grandes cantidades de GLP almacenado en recipientes, al incrementarse la temperatura existe el riesgo de BLEVE, nombre que se le conoce a una explosión de vapores originada al calentar un recipiente contenedor de GLP (Abastible, 2015).

En la Tabla 1.1 se incluyen propiedades químicas adicionales del GLP, considerando que este producto se identificará por las características que presentan sus componentes en mayor proporción que son propano y butano, entonces se tiene la siguiente tabla informativa:

Tabla 1.1. PROPIEDADES QUÍMICAS ADICIONALES DEL GLP

| PROPIEDAD | Propano | Butano |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
| Fórmula | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ |
| Punto de ebullición, °F | -44 | 15 |
| Gravedad específica del gas (Aire=1.00) | 1.50 | 2.01 |
| Gravedad específica del líquido (Agua=1.00) | 0.504 | 0.582 |
| Lbs por galón de líquido a 60°F | 4.20 | 4.81 |
| BTU por galón de gas a 60°F | 91502 | 102032 |
| Temperatura de ignición en aire, °F | 920-1020 | 900-1000 |
| Temperatura máxima de la flama en aire, °F | 3595 | 3615 |

FUENTE: Engineered Controls International, Inc- REGO productos, 2018.

1.1.4. TIPOS DE GLP COMERCIALES

El GLP como se ha señalado se constituye en una mezcla de hidrocarburos entre los que destacan el propano y butano, en este punto es importante aclarar que el GLP para la distribución comercial va a tener una diferencia en cuanto su composición, la cual puede variar según el porcentaje o cantidad de cada hidrocarburo presente en la mezcla, es así que solo a modo de entendimiento para la comercialización de este producto, se puede clasificar al GLP en 2 tipos como son:

1.1.4.1. GLP Propano Comercial

Se le denomina así cuando la mezcla de hidrocarburos presenta una mayor proporción de propano y proporción baja del resto de componentes del GLP, destacándose que dicha mezcla puede tener un aproximado del 80% de propano en su composición (López, J., 2001).

1.1.4.2. GLP Butano Comercial

Se le denomina así cuando la mezcla de hidrocarburos presenta una mayor proporción de butano y en menor proporción el resto de componentes del GLP, considerándose que el porcentaje aproximado de butano presente en la mezcla será de un 80% (López, J., 2001).

La diferencia entre cada uno de los tipos de GLP comerciales, tiene que ver con el uso o aplicación que se le dé a cada uno, por ejemplo, un GLP con mayor concentración de propano es recomendable para instalaciones externas y es de uso mayormente industrial, en cambio el de mayor concentración de butano es de mayor uso doméstico y recomendable en instalaciones internas (Propanogas.com, 2018).

1.2. ALMACENAMIENTO DE GLP

Es de importancia tener claro los conceptos que se van a manejar para el correcto almacenamiento y manipulación de hidrocarburos, específicamente en este caso el manejo del GLP; a continuación se explican los términos más empleados.

1.2.1. DEFINICIÓN DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Es un recipiente que dispone de una forma definida ya sea regular o irregular, el mismo que está diseñado para contener un determinado producto para su posterior distribución o transferencia según sea el caso (Intertek Group plc, 2018).

1.2.2. CALIBRACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

La calibración o aforo de los tanques de almacenamiento permite identificar cual es realmente la cantidad total de producto que puede almacenar un tanque, además mediante la calibración se puede determinar capacidades parciales del producto que puede disponerse en el tanque a diferentes niveles (Intertek Group plc, 2018).

1.2.2.1. Métodos de calibración de tanques de almacenamiento.

Previo al almacenamiento de un producto es importante calibrar el tanque, y conocer los diferentes métodos que se aplican para dicho fin, considerando el tipo de producto que se almacenará y la forma del tanque, es así que se distinguen 3 métodos de calibración entre los más usados que son:

Método de Calibración Gravimétrico

Este método consiste en la calibración o aforo de un tanque o recipiente contenedor de un producto a partir de la determinación de la masa o peso del producto.

En forma resumida el proceso de aforo consiste en usar un instrumento como la báscula para determinar directamente la masa del recipiente vacío, luego con el mismo instrumento se mide la masa del recipiente lleno con un fluido que comúnmente es el agua destilada hasta llegar a un punto de referencia en el recipiente, finalmente se tiene la diferencia entre la masa del recipiente lleno menos el recipiente vacío y así se determina la capacidad máxima de producto que puede contener, además se puede variar la cantidad de fluido para obtener diferentes capacidades según la masa que se mida (MetAs y Metrólogos Asociados, 2007)

Por lo general es un método aplicado a recipientes contenedores de líquidos y en bajas cantidades que puedan pesarse fácilmente con la báscula (MetAs y Metrólogos Asociados, 2007)

Método de Calibración Geométrico

Este método considera que para la calibración de un tanque o recipiente, es necesario medir las dimensiones exteriores e interiores del recipiente ya sea de forma directa o indirecta, para así determinar la capacidad máxima del recipiente, además que los tanques deben disponer de una forma regular y no presentar ninguna deformación y con capacidades nominales de entre 50 m³ o más. Este tipo de calibración es empleada por lo general en tanques cilíndricos verticales, tanques esféricos y esferoides. Finalmente es importante indicar que este método al igual que todos los métodos de calibración considera correcciones de

temperatura, pues el calor del producto puede provocar cambios de dimensiones o deformaciones internas en el recipiente (Moreno, N., Díaz, A. y Pavón, M., 2005).

Método de Calibración Volumétrica

Este método de calibración permite determinar la capacidad volumétrica máxima en un tanque o recipiente, a la vez permite la determinación de capacidades parciales del recipiente a diferentes niveles o alturas que ocupe un determinado producto dentro del recipiente, además es un método muy efectivo ya que es aplicable para recipientes que pueden contener grandes volúmenes de producto y tener una forma geométrica regular o irregular, por lo que puede ser aplicado para todo tipo de tanques ya sean horizontales, verticales, cilíndricos, esféricos, etc. (Pérez, J., García, M. y Pérez, H., 2004).

La efectividad y confiabilidad de este método radica en que las medidas que se realizan se basan en métodos y normativas internacionales que están vigentes, además de considerar correcciones por deformaciones en los recipientes que pueden provocarse por expansión de volúmenes de anillos, expansión de espesores, temperatura del producto, entre otros factores (Pérez, J., García, M. y Pérez, H., 2004).

Un caso especial de la calibración volumétrica indica que en cuanto al almacenamiento de GLP en tanques horizontales, la capacidad de estos tanques quedará expresada a partir del porcentaje o altura del GLP en función de volúmenes parciales de este producto dentro del tanque, con lo cual se crea una tabla de calibración que proporcionará el volumen necesario según la información del equipo de medición como puede ser el rotogage o la sonda (La Rosa, G., 2011).

En forma resumida para identificar cuando es aplicable un método de calibración, la manera más sencilla corresponde a verificar el tipo de recipiente que se desea calibrar; en la Tabla 1.2 se presentan estas características:

Tabla 1.2. RESUMEN DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN SEGÚN EL TIPO DE TANQUE

| TIPO DE TANQUE | MÉTODO DE CALIBRACIÓN |
|-----------------------|--|
| Cilíndrico Vertical | Volumétrico/ Geométrico |
| Cilíndrico Horizontal | Volumétrico Geométrico (capacidades de tanque pequeñas) |
| Esférico | Volumétrico/ Geométrico |
| Esferoide | Volumétrico/ Geométrico |
| Carro cisterna | Volumétrico |
| Ferro cisterna | Volumétrico |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: La Rosa, G., 2011.

1.2.3. TANQUES ESTACIONARIOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE GLP

En lo que corresponde al almacenamiento del GLP se considera que exclusivamente este producto es almacenado en tanques denominados estacionarios. Este tipo de tanques son presurizados para evitar la pérdida de vapores, además que siempre disponen de una válvula de seguridad para alivio de presión la misma que permitirá la descarga de un poco de vapor, y así disminuir el riesgo de explosión por la acumulación de la presión o por el aumento de temperatura por agentes externos en el tanque de almacenamiento (Petroblogger.com, 2012).

El tanque estacionario es fabricado con acero y recibe este nombre ya que este tipo de tanques deben llenarse en un lugar fijo debido a su peso y dimensiones de diseño, mismas que son en base a especificaciones descritas en la norma técnica INEN 2 261 (Salazar, V., Martínez, G. y Abad, J., 2010).

1.2.3.1. Tipos de Tanques Estacionarios

Los tanques estacionarios para almacenamiento de GLP, pueden clasificarse de una forma sencilla considerando la forma del recipiente y cantidad de producto que se desea almacenar según el uso que se le dé, así se tiene:

Tanques estacionarios horizontales

Son recipientes de forma cilíndrica horizontal y con casquetes semiesféricos soldados al cuerpo del recipiente; ver la Figura 1.1.



Figura 1.1. TANQUE ESTACIONARIO HORIZONTAL PARA EL ALMACENAMIENTO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

Este tipo de tanque son los de mayor uso en diferentes actividades según la capacidad de almacenamiento, como se muestra a continuación:

- Para uso comercial e industrial, considerando que la capacidad de estos tanques estacionarios puede estar en el rango de 5000 y 250000 kg de GLP (Salazar, V., Martínez, G. y Abad, J., 2010).
- Para transporte del Producto, cuya capacidad puede variar entre: 5000 kg, 12000 kg, 40000 kg y 120 000 kg, las variaciones de la cantidad dependen del tipo de vehículo (auto-tanque) en que será montados los tanques con producto, que pueden ser graneleras (para baja capacidad), o los camiones cisternas (grandes capacidades), (Salazar, V., Martínez, G. y Abad, J., 2010).
- Para uso en plantas de almacenamiento, disponiendo de una capacidad entre 5000 hasta 250000 kg, mismos que serán de uso para el posterior envasado del GLP (Salazar, V., Martínez, G. y Abad, J., 2010).

Tanques estacionarios esféricos

Este tipo de recipientes disponen de forma esférica y están destinados al almacenamiento de grandes cantidades de GLP a elevadas presiones, considerándose que las cantidades del producto que se almacenará superen los 250000 kg, el uso de estos recipientes se considera únicamente en el caso de grandes capacidades debido a que su fabricación es muy costosa. Por lo general

estos tanques son usados en los terminales de recepción de combustibles para la posterior distribución del GLP hacia las plantas de almacenamiento (Guato, J. y Guayasamín, J., 2014). Ver Figura 1.2.



Figura 1.2. TANQUES ESTACIONARIOS ESFÉRICOS PARA ALMACENAMIENTO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

1.2.4. PARTES DE UN TANQUE ESTACIONARIO

En lo que corresponde al estudio actual, será útil únicamente la descripción de un tanque cilíndrico horizontal con casquetes semiesféricos, puesto que los datos que se tomarán en cuenta serán los disponibles en plantas de almacenamiento y envasado de GLP, mismas que solo disponen de este tipo de tanques; esto se muestra en la Figura 1.3.

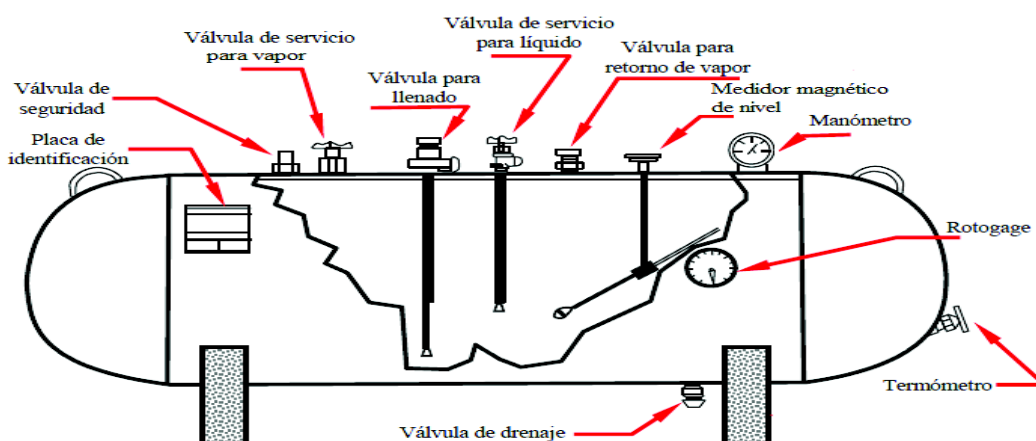


Figura 1.3. CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN TANQUE ESTACIONARIO HORIZONTAL PARA ALMACENAMIENTO DE GLP

FUENTE: Guato, J. y Guayasamín, J., 2014.

Los componentes del tanque se describen de una forma resumida a continuación.

1.2.4.1. Válvula para llenado

Es el dispositivo que permite la conexión a la línea de llenado, la misma que se constituye en un conjunto de válvulas, tubería y acoplamientos que contribuyen al suministro del GLP líquido al tanque (PEMEX, 2007).

Por lo general la válvula de llenado es del tipo doble check , que es útil para un llenado rápido de GLP en el tanque , a la vez que permite el ingreso del GLP en una sola dirección y cerrándose automáticamente, impidiendo así el retorno del producto (PYPESA, 2018).

1.2.4.2. Válvula de servicio para líquido

Es el dispositivo que permite la conexión a la línea de servicio, la cual a su vez consta de válvulas, tubería y reguladores, que son útiles para el despacho del GLP destinado al envasado (PEMEX, 2007).

Por lo general las válvulas de servicio son las conocidas como válvulas de máximo de llenado, las mismas que permiten la purga o salida controlada del producto ya que cuentan con un dispositivo de máximo de nivel para este fin (PYPESA, 2018).

1.2.4.3. Válvula de seguridad

Son dispositivos conocidos comúnmente como válvulas de alivio de presión, su función es la de accionarse automáticamente cuando el contenido de fluido en el tanque se encuentra sometido a presiones que superen la presión de diseño del mismo, que por lo general es de 250 psia. Esto ocurre cuando existe sobrellenado o cuando actúa una elevada temperatura en exterior sobre el tanque, además este tipo de válvulas se cierran de manera automática cuando se ha controlado el incremento de presión (www.insa.com.co, 2018).

1.2.4.4. Válvula para retorno de vapor

Es un dispositivo que contribuye a igualar la presión en el tanque estacionario, al permitir el ingreso vapor, cuando se realiza transferencia del producto líquido para el envasado (Venegas, D. y Ayabaca, C., 2017).

1.2.4.5. Válvula de servicio de gas

Es un dispositivo que permite el drenaje controlado de vapores contenidos en el tanque para evitar que la presión interna del mismo sobrepase los niveles permisibles de operación durante el proceso de llenado o cuando existe evaporación del producto debido a la elevación de temperatura externa que actúa sobre el recipiente (Venegas, D. y Ayabaca, C., 2017).

1.2.4.6. Válvula de drenaje

Es un tipo de válvula empleada en casos especiales, cuando se necesita desalojar el producto líquido del tanque debido algún desperfecto o en el caso de realizarse transferencia del producto en grandes cantidades (Guato, J. y Guayasamín, J., 2014).

1.2.4.7. Medidor Magnético de nivel

Es un instrumento de medida que permite identificar la cantidad de GLP en estado líquido considerando el nivel que ocupe el fluido dentro del tanque. Este instrumento está constituido por un imán conectado a un elemento flotante, el mismo que al rotar acciona una aguja magnética conectada a un dial externo que es un indicador de medida. Este dispositivo también es conocido en las plantas de almacenamiento y envasado de GLP con el nombre de sonda o magnetel (Venegas, D. y Ayabaca, C., 2017).

1.2.4.8. Rotogage

Es un instrumento destinado a la determinación de la cantidad de GLP líquido contenido en un tanque estacionario. Dispone de una válvula de venteo que se conecta a un tubo de nivel, que al girarlo hasta cierto punto proporcionará una descarga de vapor, lo que corresponde al cambio de fase del GLP, de esta manera se observa una marcación en un disco señalado con porcentajes de líquido que es la identificación de la cantidad de GLP líquido existente en el recipiente (EQUIGAS, 2017).

1.2.4.9. Termómetro

Instrumento acoplado a los tanques de almacenamiento de hidrocarburos, cuyo propósito es determinar la temperatura del fluido presente en el tanque, por lo general expresa la medida en grados celsius.

1.2.4.10. Manómetro

Instrumento acoplado a los tanques de almacenamiento de hidrocarburos, su objetivo es reportar la medida de presión de un fluido dentro del tanque, por lo general la medida se expresa en unidades de psi.

1.2.4.11. Placa de identificación del tanque

Es una placa informativa elaborada de acero inoxidable que se adhiere al tanque de almacenamiento, este elemento contiene la información de todos los parámetros de diseño, datos de fabricación y tipo de servicio para el que fue fabricado además de la capacidad del tanque (Guato, J. y Guayasamín, J., 2014).

1.3. PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

En lo que corresponde al desarrollo de este trabajo, es importante identificar que es una planta de almacenamiento de GLP y cuál es su configuración general.

Entonces se puede indicar brevemente que una planta de almacenamiento de GLP es un conjunto de instalaciones y equipos autorizados por la autoridad competente, destinados a la recepción del GLP proveniente de terminales y auto-tanques, para el posterior almacenamiento y envasado del producto en cilindros para la comercialización del mismo (Sánchez, I., 2015).

1.3.1. CONFIGURACIÓN GENERAL DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

Los elementos de una planta de almacenamiento y envasado de GLP son:

- Isla de carga y descarga, que corresponde al conjunto de válvulas, tuberías e instrumentos, destinados a la carga y descarga del GLP desde o hacia los tanques de almacenamiento. Ver figura 1.4.



Figura 1.4. ISLA DE CARGA Y DESCARGA EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

- Tanques estacionarios, para el almacenamiento del GLP (incluyendo las líneas de llenado y servicio). Ver figura 1.5.



Figura 1.5. TANQUES ESTACIONARIOS EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

- Sala o sistema de bombas-compresores para transporte de GLP hacia la nave de envasado o hacia vehículos graneleros para la comercialización del producto. Ver figura 1.6.



Figura 1.6. SISTEMA DE BOMBAS-COMPRESORES EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

- Nave o carrusel de envasado de GLP en cilindros de uso doméstico e industrial. Ver figura 1.7.



Figura 1.7. CARRUSEL DE ENVASADO EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

- Sistema contra incendios, que corresponde al conjunto de medidas y elementos para protección de las instalaciones en caso de presencia de fuego. El sistema se identifica mediante color rojo cuando se trata de tuberías de transporte de agua para extinción de fuego. Ver figura 1.8.



Figura 1.8. SISTEMA DE TUBERÍAS CONTRA INCENDIOS EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

Adicionalmente una Planta puede disponer o no de:

- Talleres de mantenimiento, destinados a la reparación de cilindros de GLP de uso doméstico e industrial, además en estos talleres se fabrican cilindros para aumentar la demanda del producto. Ver figura 1.9.



Figura 1.9. TALLER DE MANTENIMIENTO PARA CILINDROS EN PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

1.3.2. PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP EXISTENTES A NIVEL NACIONAL

Las plantas que operan en el país se detallan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. CONSOLIDADO DE PLANTAS EXISTENTES EN ECUADOR

| PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO | COMERCIALIZADORA | PROVINCIA DONDE SE UBICA LA PLANTA |
|--|------------------------------|---|
| CUENCA | CEM AUSTROGAS | AZUAY |
| MENDOGAS-RIOBAMBA | MENDOGAS | CHIMBORAZO |
| AMBATO | ENI ECUADOR S.A | TUNGURAHUA |
| REFINERÍA ESMERALDAS | EP PETROECUADOR | ESMERALDAS |
| CHORRILLO | EP PETROECUADOR | GUAYAS |
| GALO ENRIQUE PALACIOS ZURITA | GALO ENRIQUE PALACIOS ZURITA | GUAYAS |
| ISIDRO AYORA | ESAIN S.A | GUAYAS |
| BELLAVISTA | DURAGAS | EL ORO |
| LOJAGAS | CEM LOJAGAS | LOJA |
| MONTECRISTI | DURAGAS S.A | MANABÍ |
| IBARRA | ENI ECUADOR | IMBABURA |
| GAS GUAYAS | CONGAS C.A | SANTA ELENA |
| VENTANAS | AUSTROGAS | SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS |
| QUEVEDO | CONGAS | SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS |
| SANTO DOMINGO | DURAGAS S.A | SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS |
| SHUSHUFINDI | DURAGAS S.A/ CONGAS | SUCUMBIOS |
| ECOGAS SALCEDO | ECOGAS S.A | COTOPAXI |
| ENI PIFO | ENI ECUADOR S.A | PICHINCHA |
| DURAGAS PIFO | DURAGAS S.A | PICHINCHA |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

1.3.3. DESPACHO DE PRODUCTO HACIA PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP CONSIDERADAS

El GLP que se consume en el país es producido en las refinerías Shushufindi, Esmeraldas y La libertad; operadas por la empresa pública PETROECUADOR. Posteriormente, el producto es transportado a través del poliducto hacia los terminales de despacho y luego hacia plantas de almacenamiento y envasado de GLP.

Los terminales de despacho del GLP se identifican en la Tabla 1.4; es necesario indicar que las 3 plantas que se toman como referencia para el desarrollo de este trabajo, se ubican en las provincias de Pichincha y Cotopaxi.

Tabla 1.4. DESPACHO DE GLP EN PLANTAS DE COTOPAXI-PICHINCHA

| PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP | COMERCIALIZADORA | PROVINCIA DONDE SE UBICA LA PLANTA | TERMINAL DE DESPACHO DE GLP |
|--|------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| ECOGAS SALCEDO | ECOGAS S.A | COTOPAXI | EL CHORRILLO/ LA TRONCAL |
| DURAGAS PIFO | DURAGAS | PICHINCHA | OYAMBARO/EL CHORRILLO/ESMERALDAS |
| ENI PIFO | ENI ECUADOR S.A | PICHINCHA | OYAMBARO/EL CHORRILLO/ESMERALDAS |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE GLP ALMACENADO EN TANQUES ESTACIONARIOS SEGÚN LA NORMA API 14.8.

La Norma base para el desarrollo del trabajo es la AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) –MANUAL OF PETROLEUM MEASSUREMENT STANDART (MPMS) en su capítulo 14, específicamente la sección 8 y literal 7.7; detalla específicamente un procedimiento de cálculo para medición del volumen de GLP contenido en tanques estacionarios.

En el referido literal se describe el procedimiento teórico, y consiste en:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Volumen total} \\ \text{a condiciones} \\ \text{estándar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Volumen de} \\ \text{líquido} \\ \text{a condiciones} \\ \text{estándar} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Volumen de vapor sobre el líquido} \\ \text{en unidades equivalentes al líquido a} \\ \text{condiciones estándar} \end{array} \right]$$

Entonces:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Volumen de} \\ \text{líquido} \\ \text{a condiciones} \\ \text{estándar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Volumen líquido} \\ \text{a condiciones} \\ \text{de tanque} \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c} \text{Factor de corrección} \\ \text{volumétrico por} \\ \text{temperatura y} \\ \text{gravedad} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{Volumen de vapor} \\ \text{sobre el líquido en} \\ \text{unidades equivalentes} \\ \text{al líquido a condiciones} \\ \text{base} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Volumen de} \\ \text{vapor} \\ \text{sobre} \\ \text{el líquido} \end{array} \right] * \frac{P_o}{P_a} * \frac{T_o}{T_a} * \left[\begin{array}{c} \text{Factor para} \\ \text{volumen líquido} \\ \text{por volumen de} \\ \text{vapor} \end{array} \right]$$

Donde:

P_o y T_o = Presión y temperatura observadas en el tanque, considerando los valores de presión en unidades absolutas y temperatura en unidades K (Kelvin) o °R (Rankine).

P_a y T_a = Presión y temperatura absolutas, considerando los valores de presión en unidades absolutas y temperatura en unidades K (Kelvin) o °R (Rankine).

Volumen total = La suma entre el volumen del producto en estado líquido en el recipiente, más el vapor sobre el líquido convertido a su equivalente volumétrico en líquido. Este volumen total está medido a condiciones estándar.

Volumen de líquido a condiciones estándar = Volumen líquido corregido a temperatura estándar obtenido al multiplicarse el volumen líquido dentro del recipiente por el factor volumétrico de corrección.

Volumen líquido a condiciones del tanque = Volumen del líquido dentro del recipiente.

Volumen de vapor sobre el líquido = Volumen del vapor contenido en el recipiente.

Factor de corrección volumétrico por temperatura y gravedad = Factor usado para corregir el volumen del líquido a temperatura estándar. Para obtener este factor se deben usar las tablas 33 y 34, pertenecientes a la norma ASTM 1250-50.

Factor para volumen de líquido por volumen de vapor = Es un factor de conversión de un volumen de vapor en un volumen de líquido equivalente. En este trabajo se empleará el factor descrito en la Norma GPA 8195-95

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE GLP EN TANQUES ESTACIONARIOS BASADO EN LA NORMA API 14.8

2.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA NORMA PARA OBTENCIÓN DE VOLÚMENES EN ESTADO LÍQUIDO Y DE VAPOR

Es de importancia señalar que la norma API en su capítulo 14 y sección 8, describe únicamente un método de cálculo volumétrico de forma teórica, es decir no contiene una descripción del proceso completo respecto a ecuaciones, por lo que es adecuado establecer la estructuración y aplicación correcta del método considerando todos los elementos necesarios para este fin.

Es pertinente aclarar que ciertos procedimientos aplicables en el desarrollo de este método se toman como referencia de un trabajo reciente basado también en la Norma 14.8 y realizado por la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos) de Bolivia, indicando que dicho trabajo hasta el momento no ha sido aplicado en nuestro país, ni considerando los datos reales necesarios para el cálculo volumétrico del GLP; por lo tanto se procederá a explicar la estructuración del método y su aplicación.

La estructuración del método inicia con la transformación a ecuaciones de todo el contenido descrito en el literal 7.7 de la Norma API 14.8, así:

$$VT_{ST} = VL_{ST} + VG_{ST,L} \quad (2.1)$$

$$VL_{ST} = VL * FCV \quad (2.2)$$

$$VG_{ST,L} = V_o * \frac{P_o}{P_a} * \frac{T_a}{T_o} * F_{VL/VG} \quad (2.3)$$

Donde:

VT_{ST} = Volumen total de GLP (incluyendo líquido y vapor), medido a condiciones estándar (presión y temperatura estándar), expresado en unidades de l (litros).

V_{LST} = Volumen del GLP en estado líquido, medido a condición de temperatura estándar, expresado en unidades de l (Litros).

$V_{GST,L}$ = Volumen del GLP en estado de vapor, en su equivalente en estado líquido medido a condiciones estándar (presión y temperatura estándar), expresado en unidades de l (litros).

V_L = Volumen del GLP en estado líquido, medido a condiciones del tanque, expresado en unidades de l (litros).

FCV = Factor de corrección volumétrica a condición de temperatura estándar, obtenido a partir de la temperatura observada en el tanque y gravedad específica del gas a condición de temperatura estándar. El factor es adimensional.

V_o = Volumen del gas en estado de vapor, medido a condiciones del tanque, expresado en unidades de l (litros).

P_o = Presión observada en el tanque más presión atmosférica local conocida comúnmente como presión absoluta. Valor expresado en unidades que pueden ser atmósferas (atm) absolutas o psi absolutos.

P_a = Presión estándar, expresada en unidades psi o atm.

T_o = Temperatura observada en el tanque, deberá ser expresada en unidades K (Kelvin) o °R (Rankine).

T_a = Temperatura estándar, expresada en unidades K (Kelvin) o °R (Rankine).

$F_{VL/VG}$ = Factor de transformación del volumen de GLP en estado de vapor a su equivalente en líquido, es un valor adimensional.

2.1.2. PROCEDENCIA DE LAS ECUACIONES APLICADAS EN EL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE LA NORMA 14.8

Es importante explicar la obtención de las ecuaciones que la Norma API 14.8 describe, para justificar su aplicación en la obtención del volumen del GLP en los 2 estados que se encuentra en el tanque estacionario (líquido y vapor), lo cual se muestra a continuación:

2.1.2.1. Ecuación para la obtención del Volumen de GLP en estado líquido a condiciones estándar

La ecuación a usarse en este caso es la 2.2, que resulta del producto entre un volumen del GLP líquido medido a condiciones del tanque que se multiplica por un factor de corrección volumétrica (FCV), lo cual permite expresar el valor del volumen a la condición de temperatura estándar, además considerando que el factor de corrección volumétrica es adimensional, el volumen final que se obtiene permanece en las unidades iniciales las cuales son litros.

2.1.2.2. Ecuación para la obtención del volumen de GLP en estado de vapor a condiciones estándar

La obtención de la ecuación en este caso, parte de la denominada expresión modificada de los gases ideales misma que se aplica en los casos que se tiene variaciones de presión, temperatura y volumen, considerando para ello que la cantidad de gas (moles) permanece constante, entonces la ecuación relaciona 2 casos, uno inicial donde las propiedades se muestran como han sido medidas con los respectivos instrumentos y otro caso final donde se llevan dichas propiedades a otras condiciones (Chang, R., 2002).

La ecuación modificada de los gases ideales también conocida como ley combinada de los gases, para el caso actual es:

$$\frac{P_o V_o}{T_o} = \frac{P_a V_a}{T_a} \quad (2.4)$$

En la expresión anterior los elementos a la izquierda de la igualdad corresponden al caso inicial representando las propiedades medidas a condiciones del tanque estacionario, mientras que a la derecha de la igualdad se tiene el caso final que representa las propiedades a condiciones estándar.

De la ecuación 2.4 se requiere despejar el volumen para los cálculos pertinentes, entonces se despeja el volumen del gas a condiciones estándar (V_a), luego este volumen se puede reescribir con el término (V_{GST}), para continuar usando las expresiones que se han venido manejando, por lo que la ecuación es:

$$VG_{ST} = V_o * \frac{P_o}{P_a} * \frac{T_a}{T_o} \quad (2.5)$$

Ahora hay que destacar que el volumen que se tiene de gas a condiciones estándar puede ser transformado en un volumen equivalente en estado líquido, según se describe en la norma API 14.8, sin embargo para que esto se cumpla es necesario incluir un nuevo factor de relación entre el volumen del fluido en estado líquido y en estado de vapor ($F_{VL/VG}$), el cual es adimensional por lo que el resultado final se obtiene en unidades de litros, esto se muestra con la expresión:

$$VG_{ST,L} = VG_{ST} * F_{VL/VG} \quad (2.6)$$

La expresión anterior se puede escribir de forma más extensa como se muestra en la Norma API 14.8 y así se obtiene la ecuación 2.3.

2.1.2.3. Ecuación para obtención del volumen total de GLP

La obtención del volumen total del GLP es mediante la suma de los volúmenes en el estado de líquido y de vapor equivalente en líquido, calculados previamente a condiciones estándar, como se muestra en la ecuación 2.1.

2.1.3. CONSIDERACIONES PREVIAS A LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO

Antes de continuar con la aplicación del método es de importancia tener en cuenta las siguientes aclaraciones:

2.1.3.1. Presión y Temperatura

Los valores de presión y temperatura a condiciones estándar que se manejan en este trabajo son:

$$P_a = 14,696 \text{ psi} = 1 \text{ atm} \quad (\text{Cengel, Y. y Boles, M., 2009}).$$

$$T_a = 60^\circ F = 273,15 \text{ K} \quad (\text{Cengel, Y. y Boles, M., 2009}).$$

La obtención de la presión absoluta se realiza con la expresión:

$$P_o = P_{manométrica} + P_{atmosférica} \quad (2.7)$$

Existen 2 temperaturas diferentes observadas, que se las distingue de la siguiente manera:

T_d =Temperatura observada en el termo-densímetro en °F (Fahrenheit), se la transforma a sus unidades equivalentes, según el uso.

T_o =Temperatura observada en el tanque, se mide inicialmente en °C (Celsius), posteriormente se la expresa en unidades K (Kelvin) o °R (Rankine).

Considerando que el dato de temperatura que se mide en el tanque está en la unidad °C (Celsius), las ecuaciones correspondientes para cambio de unidades son:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15 \quad (2.8)$$

$$T(R) = T(^{\circ}F) + 459,67 = 1,8 T(K) \quad (2.9)$$

$$T(^{\circ}F) = 1,8 T(^{\circ}C) + 32 \quad (2.10)$$

2.1.3.2. Volumen de GLP Líquido

Condiciones en el tanque estacionario

Para la obtención del volumen GLP Líquido medido a condiciones del tanque estacionario, se determina primero la medida del porcentaje de gas en estado líquido presente en el tanque, usando para dicho fin el instrumento instalado en el tanque que es el rotogage, o también puede usarse el instrumento denominado sonda que proporciona el dato de altura que ocupa el GLP líquido dentro del tanque.

En cualquiera de los casos ya sea que se disponga de rotogage o sonda, con el valor que se obtiene en cada caso se debe ingresar en la tabla de calibración perteneciente a cada tanque estacionario y de esta manera se obtiene finalmente el valor del volumen de GLP líquido a condiciones dentro del tanque y en las unidades que proporciona dicha tabla.

Factor de Corrección volumétrico del Líquido

El dato del factor de corrección volumétrica para el volumen líquido se obtiene de la tabla 34 presente en la norma ASTM 1250-80, los valores de la tabla se encuentran en el ANEXO 5, sin embargo, previo a la obtención de dicho factor, se

debe emplear la tabla 33 de la norma ASTM 1250-80 (valores se presentan en el ANEXO 6).

La tabla 33 cuyo nombre es “Specific Gravity Reduction to 60°F for Liquefied Petroleum Gases and Natural Gasoline”, se aplica para obtener el valor de la gravedad específica del GLP a condiciones de temperatura estándar (60°F). Para lograr dicho fin se debe disponer previamente del dato de gravedad específica del GLP medida en estado líquido usando el instrumento denominado termo-densímetro, además que se necesita la temperatura del GLP que proporciona dicho instrumento, entonces con dichos valores se ingresa en la tabla 33 y se obtiene finalmente la gravedad específica del GLP a la temperatura estándar.

Posteriormente se usa la tabla 34, “Reduction of Volume to 60/ 60°F for Liquefied Petroleum Gases”, para obtener el dato del factor de corrección volumétrico, entonces se ingresa en la tabla con el valor de la gravedad específica a temperatura estándar y el valor de la temperatura del GLP a condiciones del tanque, y así finalmente se obtiene el dato del factor que se necesita.

En el caso que los valores presentes en tablas 33 y 34 no se ajusten directamente a los datos de ingreso, se procede a realizar el proceso de interpolación para encontrar los valores correctos.

La simbología que se usa para diferenciar a las gravedades específicas que se obtienen, es:

γ_d = Gravedad específica observada en el termo-densímetro a la temperatura observada en el instrumento de medida.

$\gamma_{60°F}$ = Gravedad específica transformada a temperatura estándar (60°F), con el uso de la tabla 33 de la norma ASTM 1250-80.

2.1.3.3. Volumen de GLP en estado de vapor

Condiciones en el tanque estacionario

El volumen del GLP en estado de vapor medido a condiciones del tanque se obtiene de la diferencia entre la máxima capacidad volumétrica del tanque

estacionario y el volumen del GLP en estado líquido a condiciones del tanque. Esta diferencia se puede expresar de forma resumida mediante la ecuación:

$$V_o = V_{TK} - VL \quad (2.11)$$

Donde se aclara que:

V_{TK} = Máxima capacidad volumétrica del tanque estacionario. Es el volumen máximo de producto que puede almacenar en el tanque estacionario; valor se obtenido directamente de la tabla de calibración que corresponde a cada tanque estacionario. Está expresado en unidades de l (Litros).

Condiciones estándar

La ecuación 2.5 representa la obtención del GLP en estado de vapor a condiciones estándar, esta ecuación es útil en los casos que se requiera incluir el volumen en estado de vapor, en la ley de gases reales.

El volumen del GLP en estado de vapor a condiciones estándar con su equivalente en líquido, incluye un factor que relaciona el estado de vapor y el estado líquido del GLP; es decir, este factor transforma el volumen estándar de vapor en un volumen líquido, entonces, en el caso de requerirse este equivalente en líquido, se usa la ecuación 2.3.

Factor de transformación del volumen de GLP en estado de vapor en su equivalente en líquido

Es necesario aclarar que en el contenido de la Norma API 14.8 no se incluye el método de obtención de factor de transformación del GLP vapor en su equivalente en líquido; sin embargo, se conoce que la norma internacional GPA-8195-95 presenta un método de obtención de un factor de conversión de volumen de vapor neto a volumen de líquido equivalente a condiciones estándar, cuya aplicación es fácil y válida pues ha sido empleado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) de Bolivia para propósitos similares al de este trabajo.

Específicamente el método se lo puede denominar como cálculo del factor de corrección de vapor neto a partir de las variables B y F, el cual describe que para su adecuada aplicación se debe disponer de los siguientes datos: densidad relativa, temperatura, presión y volumen de líquido, además se aclara que se

necesita de gráficas específicas para este método; las gráficas se usan en la obtención de factores de corrección de compresibilidad del gas (B y F), (GPA 8195, 1995. - ANH, 2017).

Es importante destacar que se escoge este método de obtención del factor debido a que todos los datos para su aplicación están disponibles, también considerando la facilidad y confiabilidad del método. Se aclara que el dato de la densidad relativa que se usa en este proceso debe estar transformado a 60°F, además se usa la temperatura observada en el tanque estacionario.

La ecuación que emplea el método de Cálculo de Factor de Corrección de Vapor Neto es:

$$f_g = \frac{P * F}{1 - (B * P)} \quad (2.12)$$

Donde:

f_g = Factor de corrección de volumen para fase gaseosa, es un valor adimensional.

P = Presión absoluta. Presión manométrica sumada a la presión atmosférica local, expresada en psi absolutos.

B = Variable algebraica para cálculo del factor de compresibilidad del vapor. Se obtiene del gráfico 6.1 que se describe en la norma GPA 8195-95. El gráfico 6.1 se adjunta en el ANEXO 1.

F = Variable algebraica para cálculo del factor de compresibilidad del vapor. Se obtiene del gráfico 6.2 que se describe en la norma GPA 8195-95. El gráfico 6.2 se adjunta en el ANEXO 2.

Para expresar la ecuación anterior en similares términos con los que se está trabajando para la estructuración del método completo, se procede a describirla como:

$$F_{VL/VG} = \frac{P_o * F}{1 - (B * P_o)} \quad (2.13)$$

Finalmente se explica el uso de los gráficos 6.1 y 6.2 empleados en este método a continuación:

Para el uso de la gráfica 6.1 que determina el valor de B, se debe ingresar con el valor de la temperatura observada en el tanque en unidades de °F en el eje de las abscisas del gráfico, posteriormente se debe hacer una intersección en la correspondiente curva que representa a la gravedad específica a 60°F también presente en la gráfica, por último luego de la intersección se hace un desplazamiento a la izquierda del gráfico en el eje de las ordenadas y así se obtiene el valor de: $B*1000$.

Para el uso de la gráfica 6.2 que determina el valor de F, se debe ingresar con el valor de la temperatura observada en el tanque en unidades de °F en el eje de las abscisas del gráfico, posteriormente se debe hacer una intersección en la correspondiente curva que representa a la gravedad específica a 60°F también presente en la gráfica, por último luego de la intersección se hace un desplazamiento a la izquierda del gráfico en el eje de las ordenadas y así se obtiene el valor de: $F*10000$.

Es de importancia aclarar que revisando la norma GPA 8195-95 , se verifica que el método de obtención del factor de conversión de vapor neto a equivalente en líquido, es aplicable para convertir un volumen de gas dentro de un recipiente (volumen neto), a líquido en condiciones estándar, es decir el factor de conversión de vapor transforma directamente el volumen de gas contenido en el recipiente a un volumen estándar de líquido, esto debido a que el método de obtención de dicho factor emplea la gravedad específica a 60°F, por lo que ya está incluyéndose las condiciones estándar en el método.

Entonces, en el caso actual de análisis el factor de conversión, se multiplica por el volumen de GLP en estado de vapor que se observa en el tanque y se obtiene su equivalente de volumen líquido a condiciones estándar, es decir la nueva ecuación para obtención de volumen de GLP equivalente en líquido a usarse en adelante es:

$$VG_{ST,L} = V_o * F_{VL}/VG \quad (2.14)$$

2.1.4. EJEMPLO DE CÁLCULO DE VOLUMEN DE GLP

Se explica a continuación en detalle mediante ejemplo de cálculo, en primer lugar cuales son los datos que se obtienen en una planta en específico con las respectivas unidades, para posteriormente usar el método de cálculo volumétrico explicado anteriormente.

Paso 1: Anotar los valores observados en el tanque estacionario y en el termo-densímetro, con las respectivas unidades que cada instrumento de medida proporciona:

Tanque donde se toman las medidas = TE-3

$P_{manométrica}$ = Presión observada en el tanque= 65 psi

T_o = Temperatura observada en el tanque= 10 °C

T_d = Temperatura observada en el termo-densímetro = 36°F

γ_d = Gravedad específica observada en el termo-densímetro= 0,545

$\%V$ = Porcentaje del volumen del GLP líquido almacenado en el tanque= 26%

Paso 2: Determinar el valor del volumen de GLP en estado líquido medido a las condiciones del tanque, por medio de la tabla de calibración del tanque estacionario ingresando en la tabla con el valor del porcentaje de volumen medido con el rotogage o con el valor de altura del fluido en el tanque medido con la sonda, según sea el caso, además obtener el valor de la máxima capacidad volumétrica del tanque de la misma tabla.

Debido a que en este cálculo se dispone del valor del porcentaje en volumen medido con el rotogage se ingresa con este valor en la tabla de calibración, entonces se tiene:

Con: $\%V = 26\%$, en la tabla de calibración del Tanque TE-3 se obtiene el valor de:

$$VL = 29696,4 \text{ l}$$

Además que con: $\%V = 100 \%$, en la tabla de calibración del Tanque TE-3 se obtiene el valor de:

$V_{TK} = 114216,9 \text{ l}$ (Máxima capacidad volumétrica del tanque estacionario).

Paso 3: Obtener la presión absoluta a partir de la presión observada en el tanque, para lo cual se necesita adicionar la presión atmosférica local en la planta a la presión observada, se debe aclarar que la presión absoluta se obtiene en atmósferas absolutas; por lo tanto, se deben realizar las respectivas conversiones de unidades en el caso que se requiera. Todo lo descrito se muestra a continuación:

Primero se considera el valor de la presión inicialmente observada en el tanque estacionario que corresponde a:

$$P_{manométrica} = 65 \text{ psi}$$

Conociéndose que: $14,696 \text{ psi} = 1 \text{ atm}$ (Cengel, Y. y Boles, M., 2009)

Se aplica ese valor en la conversión de la presión manométrica para expresarla en atmósferas:

$$P_{manométrica} = 65 \text{ psi} * \frac{1 \text{ atm}}{14,696 \text{ psi}} = 4,423 \text{ atm}$$

Considerando que la presión atmosférica es:

$$P_{atmosférica} = 1 \text{ atm} \text{ (dato usado actualmente por todas las plantas)}$$

Se aplica la ecuación 2.7 para expresar la presión observada en el tanque en presión absoluta y en unidades de atm absolutas:

$$P_o = 4,423 \text{ atm} + 1 \text{ atm}$$

$$P_o = 5,423 \text{ atm}$$

Paso 4: Obtener la temperatura observada en el tanque expresada en unidades Kelvin (K) para aplicación directa en las ecuaciones del método y en grados Fahrenheit (°F) para el uso de la tabla 34; se debe incluir las ecuaciones para conversión de unidades.

El valor de temperatura que se dispone inicialmente es:

$$T_o = \text{Temperatura observada en el tanque} = 10 \text{ °C}$$

Para llevar la temperatura anterior a unidades Kelvin se aplica la ecuación 2.8:

$$T(K) = 10 + 273,15$$

$$T_o = T(K) = 283,15 K$$

Para llevar la temperatura a unidades Fahrenheit (°F) se aplica la ecuación 2.10:

$$T(^{\circ}F) = 1,8 (10) + 32$$

$$T_o = T(^{\circ}F) = 50 ^{\circ}F$$

Paso 5: Usar la tabla 33 de la norma ASTM 1250-80 (ANEXO 5), para obtener el valor de la gravedad específica a temperatura estándar (60°F), para lo cual se debe ingresar en la tabla con los valores de la gravedad específica y la temperatura observados en el termo-densímetro contenido en un recipiente presurizado. El instructivo del uso de la tabla 33 como indica la norma ASTM 1250-80 se encuentra en el ANEXO 3 de este trabajo.

El valor de la gravedad específica a temperatura estándar se obtiene de la siguiente manera:

Con el ingreso de los valores $\gamma_d = 0,545$ y $T_d = 36^{\circ}F$ se puede notar que no se puede encontrar directamente el valor de la gravedad específica a temperatura estándar en la tabla 33, por lo que se debe realizar el proceso de interpolación tomando valores extremos de la gravedad específica pero a la misma temperatura de medida en el termo-densímetro. Esto se describe en la tabla 2.1, posteriormente se realiza el proceso completo de interpolación, así:

Tabla 2.1. INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA A 60°F

| Valores de gravedad específica observadas con termo-densímetro | Valores de gravedad específica a 60 °F |
|--|--|
| 0,540 | 0,522 |
| 0,545 | $\gamma_{60^{\circ}F}$ |
| 0,550 | 0,533 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

$$\frac{0,550 - 0,540}{0,545 - 0,540} = \frac{0,533 - 0,522}{\gamma_{60^{\circ}F} - 0,522}$$

$$\gamma_{60^{\circ}F} = 0,522 + \frac{(0,533 - 0,522) * (0,545 - 0,540)}{(0,550 - 0,540)}$$

$$\gamma_{60^{\circ}F} = 0,528$$

Paso 6: Usar la tabla 34 de la Norma ASTM 1250-80 (ANEXO 6), para determinar el factor de corrección volumétrica a temperatura estándar (60°F), para lo cual se debe ingresar en la tabla con el valor de la gravedad específica corregida a temperatura estándar y con la temperatura observada en el tanque. El instructivo del uso de la tabla 34 como indica la norma ASTM 1250-80 se encuentra en el ANEXO 4 de este trabajo.

El valor del factor de corrección volumétrica se obtiene de la siguiente manera:

Usando los valores de $\gamma_{60^{\circ}F} = 0,528$ y $T_o = 50$ °F se observa que se puede obtener directamente el valor del factor de corrección volumétrica a temperatura estándar en la tabla 34, el valor es:

$$FCV = 1,014 \left[\frac{u^3}{u^3} \right]$$

De no ser posible encontrar el valor de forma directa, se debe recurrir a un nuevo proceso de interpolación.

Paso 7: Calcular el volumen del GLP en estado líquido, medido a condición de temperatura estándar aplicando la ecuación 2.2 del método y utilizando los datos ya obtenidos como se muestra a continuación:

$$VL_{ST} = (2696,4 l) * 1,014$$

$$VL_{ST} = 30112,150 l$$

Paso 8: Calcular el volumen del GLP en estado de vapor, medido a condiciones del tanque (vapor neto en el tanque), aplicando la ecuación 2.11:

$$V_o = 114216,9 l - 29696,4 l$$

$$V_o = 84520,5 l$$

Paso 9: Aplicar el método de cálculo de factor de corrección de vapor neto que usa las variables B y F.

Previo a la aplicación de la ecuación, se deben obtener los valores de B y F empleando las figuras 6.1 y 6.2 (ANEXOS 1 y 2 respectivamente). Usando las figuras mencionadas, con los datos de $\gamma_{60^{\circ}F} = 0,528$ y $T_o = 50^{\circ}F$, los valores que se obtienen son:

$$B * 1000 = 1,4 \text{ entonces } B = 0,0014$$

$$F * 10000 = 2,55 \text{ entonces } F = 0,000255$$

El valor de la presión absoluta en unidades de psia, aplicando la fórmula 2.7 es:

$$P_o = 65 \text{ psi} + 14,696 \text{ psi}$$

$$P_o = 79,696 \text{ psia}$$

El valor de la presión absoluta se usa junto con los valores de los factores B y F obtenidos anteriormente, para incluirlos en la fórmula 2.13 y obtener el factor conversión de volumen de GLP en estado de vapor al equivalente en volumen líquido:

$$F_{VL/VG} = \frac{79,696 \text{ psia} * 0,000255}{1 - (0,0014 * 79,696 \text{ psia})}$$

$$F_{VL/VG} = 0,022874712$$

Paso 10: Calcular el volumen de GLP vapor medido a condiciones estándar (presión y temperatura estándar) usando la ecuación 2.5:

$$VG_{ST} = (29696,4 \text{ L}) * \frac{5,423 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} * \frac{273,15 \text{ K}}{283,15 \text{ K}}$$

$$VG_{ST} = 442164,710 \text{ l}$$

Paso 11: Usar el factor de corrección de vapor neto para calcular el volumen del GLP vapor en su equivalente en líquido, a condiciones del tanque estacionario, aplicar la ecuación 2.14:

$$VG_{ST,L} = (29696,4 \text{ l}) * 0,022874712$$

$$V_{G_{ST,L}} = 1933,382 \text{ l}$$

Paso 12: Obtener el volumen total de GLP en condiciones estándar, sumando los volúmenes calculados del GLP en estado líquido y GLP vapor en su equivalente en líquido; se aplica la ecuación 2.1:

$$V_{T_{ST}} = 30112,150 \text{ l} + 1933,382 \text{ l}$$

$$V_{T_{ST}} = 32045,532 \text{ l}$$

2.2. APLICACIÓN DEL CÁLCULO VOLUMÉTRICO PARA LA OBTENCIÓN DE MASA DE GLP

2.2.1. APLICACIÓN 1 USANDO PROPIEDADES DE LÍQUIDOS Y GASES PARA LA OBTENCIÓN DE MASA

En esta sección se realiza una estructuración de un proceso de cálculo de masa de GLP, el cual incluye el método volumétrico explicado al inicio del capítulo.

Entonces para lograr adecuadamente el propósito se debe emplear propiedades de líquidos y gases en el proceso de obtención de la masa de GLP a condiciones estándar, aclarando que para los cálculos pertinentes es necesario incluir el volumen del GLP en cada fase a condiciones estándar lo cual es previamente calculado con el método de la norma API 14.8.

Así, se describe la obtención de la masa de GLP en cada una de las fases aplicando las expresiones:

$$m_{T_{ST}} = m_{L_{ST}} + m_{V_{ST}} \quad (2.15)$$

$$m_{L_{ST}} = V_{L_{ST}} * \gamma_{60^{\circ}F} * \rho_{Agua\ 60^{\circ}F} \quad (2.16)$$

$$m_{V_{ST}} = V_{G_{ST}} * PM * \frac{1}{Z} * \left(\frac{1 \text{ mol}}{22,414 \text{ l}} \right) \quad (2.17)$$

Donde:

$m_{T_{ST}}$ = Masa total del GLP (Incluyendo estado líquido y de vapor) medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

$m_{L_{ST}}$ = Masa del GLP en estado líquido medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

$m V_{ST}$ = Masa del GLP en estado de vapor medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

V_{LST} = Volumen de GLP en estado líquido, medido a condición de temperatura estándar y calculada con el método de la norma API 14.8, expresado en unidades de l (Litros).

$\gamma_{60^{\circ}F}$ = Gravedad específica transformada a temperatura estándar, con el uso de la tabla 33 de la norma ASTM 1250-80.

$\rho_{Agua\ 60^{\circ}F}$ = Densidad del Agua medida a temperatura estándar. Corresponde a 999,016 kg/m³ o su equivalente 0,999016 kg/l (API 11.1, 2004).

V_{GST} = Volumen del GLP en estado de vapor, medido a condiciones estándar. Calculada con el método de la norma API 14.8, expresado en unidades de l (litros).

PM = Peso molecular del GLP, expresado en unidades de kg/mol.

z = Factor de desviación del GLP, es un valor adimensional.

$\left(\frac{1\ mol}{22,414\ l}\right)$ = Propiedades de moles y volumen de un gas a condiciones estándar.

2.2.1.1. Procedencia de las ecuaciones a usarse en la Aplicación 1 para la obtención de masa

En este punto se justifica de manera detallada cuáles son las propiedades y procedimientos desarrollados para obtener finalmente cada una de las fórmulas que se aplican en el cálculo de masa de GLP contenido en los tanques estacionarios, misma que debe determinarse en sus 2 estados (líquido y vapor), es así que se realiza la siguiente explicación:

Ecuación para obtención de la masa de GLP en estado líquido a condiciones estándar

Como se puede observar la expresión para el cálculo de masa resulta del producto entre el volumen del GLP en estado líquido previamente calculado con el método de la norma API 14.8, multiplicado por la gravedad específica del GLP y por la densidad del agua. Todos los datos están expresados a condiciones de temperatura estándar (60°F), por lo cual la masa que se necesita está expresada en las condiciones estándar.

Ahora es importante aclarar la procedencia de la gravedad específica y la densidad del agua para incluirse en la fórmula de obtención de masa, para lo cual se considera la definición de gravedad específica de un líquido, la cual es equivalente al cociente entre densidades del fluido considerado y del agua, ambos deben estar medidos a la misma temperatura (API 11.1., 2004).

Debido a que se necesita obtener los valores a condiciones estándar, entonces las densidades de cada líquido deben estar medidas a temperatura estándar correspondiente a 60°F (API 11.1., 2004).

Es necesario incluir la definición de densidad de un líquido, que corresponde al cociente entre la masa y el volumen del líquido a considerarse. El producto de estudio es el GLP en estado líquido, por lo que la definición se aplicará a este producto considerando que todos los datos se encuentren medidos a la temperatura que se requiere y que es de 60°F (Chang, R., G2002).

Todo lo explicado se resume en dos ecuaciones:

$$\gamma_{60^{\circ}F} = \frac{\rho_{GLP\ 60^{\circ}F}}{\rho_{Agua\ 60^{\circ}F}} \quad (2.18)$$

$$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F} = \frac{m_{GLP\ 60^{\circ}F}}{V_{GLP\ 60^{\circ}F}} \quad (2.19)$$

Donde:

$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F}$ = Densidad del GLP medido a la temperatura de 60°F, expresado en unidades de kg/l.

$m_{GLP\ 60^{\circ}F}$ = Masa del GLP medido a temperatura de 60°F, expresado en unidades de kg.

$V_{GLP\ 60^{\circ}F}$ = Volumen del GLP medido a temperatura de 60°F, expresado en unidades de l.

Al incluir la definición de densidad para el GLP en la expresión de gravedad específica, es decir combinando las ecuaciones 2.18 y 2.19, se tiene:

$$\gamma_{60^{\circ}F} = \frac{\frac{m_{GLP\ 60^{\circ}F}}{V_{GLP\ 60^{\circ}F}}}{\rho_{Agua\ 60^{\circ}F}}$$

De la expresión resultante se procede a despejar la masa del GLP medido a 60°F y así finalmente se obtiene la ecuación para el cálculo de masa que se requiere:

$$m_{GLP\ 60^{\circ}F} = V_{GLP\ 60^{\circ}F} * \gamma_{60^{\circ}F} * \rho_{Agua\ 60^{\circ}F}$$

La ecuación anterior se puede expresar en los mismos términos que se han manejado hasta este punto, pero se realizan las siguientes aclaraciones:

$m_{GLP\ 60^{\circ}F} = m_{LST}$ = Masa del GLP medido a temperatura de 60°F, expresado en unidades de kg.

$V_{GLP\ 60^{\circ}F} = V_{LST}$ = Volumen del GLP medido a temperatura de 60°F, expresado en unidades de l.

Combinando las expresiones 2.18 y 2.19 en los términos aclarados, se obtiene la ecuación 2.16, para la determinación de la masa del GLP líquido a condiciones estándar.

Ecuación para obtención de la masa de GLP en estado de vapor a condiciones estándar

El proceso de obtención de masa en el caso del GLP en estado de vapor parte de la ley de gases reales, y la fórmula de obtención de moles de un gas, como se muestra a continuación:

$$P * V = z * n * R * T \quad (2.20)$$

$$n = \frac{m}{PM} \quad (2.21)$$

Donde:

P = Presión del gas medido en unidades de atm.

V = Volumen del gas medido en unidades de l.

z = Factor de desviación de un gas.

n = Moles de gas expresados en unidades de mol.

R = Constante universal de los gases. Sus unidades dependerán de las unidades de las propiedades del gas.

T = Temperatura del gas expresada en unidades de K.

m = Masa del gas expresada en unidades de kg.

PM = Peso molecular del gas expresado en unidades kg/mol.

Al incluir la fórmula de obtención de moles de gas en la ley de gases ideales se obtiene la siguiente expresión:

$$P * V = z * \frac{m}{PM} * R * T$$

Se procede a despejar la masa del gas de la expresión anterior, así:

$$m = \frac{P * V * PM}{z * R * T}$$

De la ecuación anterior se puede observar que “R”, representa a la constante universal de los gases, la cual tiene un valor que es obtenido a partir de propiedades estándar, además que el valor numérico dependerá de las unidades del resto de propiedades del gas que se incluyen en la ley de gases ideales (Craft, B. y Hawkins, H., 1968).

Con la finalidad de observar la obtención del valor de “R”, se procede a describir la ecuación:

$$R = \frac{P_a * V_i}{n_i * T_a} \quad (2. 22)$$

Los valores con el subíndice “a” representan la presión y temperatura a condiciones estándar, y los valores con el subíndice “i” representan las propiedades de mol y volumen de un gas ideal a condiciones estándar o normales; valores que se reemplazarán posteriormente.

Luego se reemplaza la ecuación 2.22 que representa a “R” en la fórmula que describe la obtención de masa, así:

$$m = \frac{n_i * T_a}{P_a * V_i} * \frac{P * V * PM}{z * T}$$

Se re-ordenan los términos de la ecuación resultante de masa:

$$m = \left(V * \frac{P}{P_a} * \frac{T_a}{T} \right) * PM * \frac{1}{z} * \frac{n_i}{V_i}$$

Ahora con el fin de expresar la ecuación anterior en los mismos términos que se han venido trabajando se considera las siguientes igualdades:

$m = m_{V_{ST}}$ = Masa del GLP en estado de vapor medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg.

$V = V_o$ = Volumen del GLP en estado de vapor, medido a condiciones del tanque, expresado en unidades de l.

$P = P_o$ = Presión observada en el tanque más presión atmosférica local, valor expresado en unidades absolutas que pueden ser atmósferas (atm) absolutas.

$T = T_o$ = Temperatura del GLP observada en el tanque, expresada en unidades K.

Con las aclaraciones de las igualdades anteriores, la ecuación de masa es:

$$m_{V_{ST}} = \left(V_o * \frac{P_o}{P_a} * \frac{T_a}{T_o} \right) * PM * \frac{1}{z} * \frac{n_i}{V_i}$$

Además se puede notar en la expresión anterior, que los términos agrupados en el paréntesis representan la obtención del volumen de GLP en fase de vapor a condiciones estándar descrita con la ecuación 2.5, entonces la expresión simplificada queda expresada así:

$$m_{V_{ST}} = V_{G_{ST}} * PM * \frac{1}{z} * \frac{n_i}{V_i}$$

En la expresión simplificada anterior, es necesario considerar los valores de n_i (moles) y V_i (volumen), explicando que dichos valores corresponden a propiedades de un gas a condiciones normales, se aclara que a condiciones normales o estándar 1 mol de gas ocupa un volumen equivalente a 22,414 l (Chang, R., 2002).

Con el reemplazo de los valores de n_i y V_i en la fórmula simplificada, finalmente se tiene la ecuación 2.17 que se usa para la obtención de masa de GLP en estado de vapor y a condiciones estándar.

Ecuación para obtención de la masa total de GLP

La masa total del GLP almacenado en tanques estacionarios resultará de la suma de las masas en cada estado, como se muestra en la ecuación 2.15.

2.2.1.2. Consideraciones previas al cálculo de masa del GLP con la Aplicación 1

Masa de GLP en fase de vapor

Es necesario aclarar que el peso molecular del GLP que es usado para el cálculo de la masa, es un valor que depende de la composición de este producto, que como ya se conoce es una mezcla de hidrocarburos en los que se destacan en mayor proporción el propano y el butano (n-butano), además de otros componentes.

Se debe considerar que, se dificulta la obtención del peso molecular del GLP debido a que, para determinar este dato se requiere de un análisis de composición del GLP, para identificar los moles de cada componente del GLP y así determinar la fracción molar de cada uno de los componentes, la dificultad se encuentra en la disponibilidad de los instrumentos para una toma de la muestra y el análisis.

En el caso de facilitarse el análisis de composición se obtendrían valores exactos de fracciones molares de cada componente del GLP lo cual serviría posteriormente para obtener el peso molecular de la mezcla de hidrocarburos, sin embargo en el caso actual no se dispone del análisis de laboratorio. Por lo tanto se recurre a procesos experimentales, como:

- 1) La determinación del peso molecular usando únicamente los compuestos que se encuentran en mayor proporción en la mezcla de hidrocarburos que constituyen al GLP, estos hidrocarburos son el Propano y el Butano (n-Butano). El proceso toma en cuenta la gravedad específica en forma líquida medida a 60°F y el peso molecular de los hidrocarburos mencionados, cuyos valores son:

$\gamma_{Propano}$ = Gravedad específica del Propano líquido medida a 60°F = 0,50699 (ASTM D-2598., 1996).

$\gamma_{n-Butano}$ = Gravedad específica del n-Butano líquido medida a 60°F = 0,58401 (ASTM D-2598., 1996).

$PM_{Propano}$ = Peso Molecular del Propano = 44,097 g/mol (Beggs, H., 1984).

$PM_{n-Butano}$ = Peso Molecular del n-Butano = 58,124 g/mol (Beggs, H., 1984).

Con los valores de gravedad específica y peso molecular de los hidrocarburos propano y butano se procede a realizar el proceso de interpolación, variando los valores de gravedad específica para obtener los correspondientes valores de peso molecular; esto puede ser representado en una tabla de datos para identificar de forma directa el valor del peso molecular correspondiente a la gravedad específica corregida a 60°F.

A continuación, se tiene un ejemplo del proceso de interpolación para obtener los valores representados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. INTERPOLACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL PESO MOLECULAR

| γ 60°F | PM (g/mol) |
|---------------|------------|
| 0,50699 | 44,097 |
| 0,528 | PM |
| 0,58401 | 58,124 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

$$\frac{(0,58401 - 0,50699)}{(0,528 - 0,50699)} = \frac{(58,124 - 44,097)}{(PM - 44,097)}$$

$$PM = 44,097 + \frac{(58,124 - 44,097) * (0,528 - 0,50699)}{(0,58401 - 0,50699)}$$

$$PM = 47,832 \text{ g/mol}$$

- 2) Otro proceso para la obtención del peso molecular del GLP, implica el conocimiento de todos los hidrocarburos componentes del GLP además de la disposición del % en volumen de cada componente para la obtención de moles de cada uno y posteriormente de la fracción molar, esto a la vez sirve para realizar el producto entre la fracción molar y el peso molecular de cada hidrocarburo, finalmente se realiza la sumatoria de todos los productos y se obtiene el peso molecular aparente que corresponde en este caso al peso molecular del GLP (Beggs, H., 1984).

La expresión para aplicarse en este proceso es:

$$PM_a = \sum_{i=1}^n PM_i * y_i \quad (2.23)$$

Donde se tiene que:

PM_a = Peso molecular aparente, correspondiente a la mezcla de hidrocarburos, expresado en g/mol.

PM_i = Peso molecular de cada hidrocarburo componente de la mezcla, expresado en g/mol.

y_i = Fracción molar de cada hidrocarburo componente de la mezcla, es un valor adimensional.

Se aplica el procedimiento empleando datos de porcentaje en volumen para los componentes del GLP del complejo industrial de Shushufindi, que es uno de los productos enviados a los terminales de despacho y repartido a las plantas para el envasado y distribución; se considera que los valores del porcentaje en volumen aquí usados son similares a los provenientes de otras refinerías (Rodas, S., 2013).

En la tabla 2.2 constan los valores para el cálculo:

Tabla 2.3. COMPOSICIÓN EN VOLUMEN DEL GLP PRODUCIDO EN SUSHUFINDI

| COMPONENTES | % VOLUMEN |
|-------------|-----------|
| Etano | 1,94 |
| Propano | 59,28 |
| i-Butano | 11,85 |
| n-Butano | 26,60 |
| i-Pentano | 0,30 |
| n-Pentano | 0,03 |

FUENTE: Laboratorio del complejo Industrial de Shushufindi (Rodas, S., 2013).

MODIFICADO POR: Arias, R., 2018.

Tabla 2.4. PESO MOLECULAR DE LOS COMPONENTES DEL GLP

| COMPONENTES | PESO MOLECULAR DE CADA COMPONENTE (g/mol) |
|-------------|---|
| Etano | 30,070 |
| Propano | 44,097 |
| i-Butano | 58,124 |
| n-Butano | 58,124 |
| i-Pentano | 72,151 |
| n-Pentano | 72,151 |

FUENTE: Tabla 2-2. Physical Constants of Hydrocarbons (Beggs, H., 1984).

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

Con los datos de las tablas se procede a la obtención de moles y posteriormente de fracción molar, con las ecuaciones:

$$n_i = \frac{P * V_i}{z_i * R * T} \quad (2. 24)$$

$$y_i = \frac{n_i}{n_t} \quad (2. 25)$$

Donde:

n_i = Moles de cada componente del GLP, expresado en unidades de mol.

P = Presión absoluta del GLP, expresado en unidades de psi.

V_i = Volumen de cada componente del GLP, obtenido a partir del % en volumen, expresado en ft³ (pies cúbicos).

z_i = Factor de desviación de cada componente del GLP, es un valor adimensional.

R = Constante universal de los gases, según las unidades de las variables actuales es 10,73 (psia * ft³/mol * °R), (Beggs, H., 1984).

T = Temperatura del GLP expresada en unidades de °R.

y_i = Fracción molar de cada hidrocarburo componente de la mezcla, es un valor adimensional.

n_t = Total de moles del GLP. Se obtiene de la suma de las moles de cada componente, expresado en unidades de mol.

Aplicando el procedimiento, el porcentaje en volumen es equivalente a un volumen de gas considerando que se tiene 100 ft³ de gas, luego se reemplazan los valores correspondientes en la ecuación 2.24, así se obtienen los moles y posteriormente la fracción molar con la ecuación 2.25; estos valores se emplean para calcular los demás datos y finalmente aplicar la ecuación de obtención de peso molecular aparente (Beggs, H., 1984).

En la tabla 2.5 se muestran los resultados al emplear los mismos valores de temperatura y presión absoluta según el ejemplo de cálculo de la sección 2.1.4 de este trabajo:

$$P_o = 79,696 \text{ psia}$$

$$T_o = 50 \text{ }^\circ\text{F} = 510 \text{ }^\circ\text{R}$$

Tabla 2.5. CÁLCULOS DE PESO MOLECULAR APARENTE

| COMPONENTES | VOLUMEN CON RESPECTO A 100 ft ³ | MOLES DE CADA COMPONENTE (n _i) | FRACCIÓN MOLAR DE CADA COMPONENTE (y _i) | PESO MOLECULAR DE CADA COMPONENTE (PM _i) (g/mol) | PM _i * y _i |
|-------------|---|---|---|---|----------------------------------|
| Etano | 1,94 | 0,02849 | 0,01910 | 30,070 | 0,57447 |
| Propano | 59,28 | 0,87915 | 0,58947 | 44,097 | 25,9942 |
| i-Butano | 11,85 | 0,17798 | 0,11934 | 58,124 | 6,93670 |
| n-Butano | 26,60 | 0,40073 | 0,26869 | 58,124 | 15,6177 |
| i-Pentano | 0,30 | 0,00457 | 0,00306 | 72,151 | 0,22146 |
| n-Pentano | 0,03 | 0,00045 | 0,00030 | 72,151 | 0,02213 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

Se aplica la expresión 2.23 y se obtiene el peso molecular aparente del GLP, así:

$$PM_a = 49,367 \text{ g/mol}$$

Factor de desviación “z” para fase de vapor

En la ecuación de obtención masa de GLP en estado de vapor se debe tener en consideración que el valor de “z” se obtiene a partir de cada uno de los valores de

“z” estándar correspondientes a cada uno de los componentes del GLP. Se emplean estos valores debido a que, el valor de la masa del GLP como vapor contenido en el tanque, debe ser expresado en condiciones estándar o normales.

Específicamente, el proceso de obtención de “z”, es similar al de la obtención del peso molecular aparente de una mezcla de gases; es decir, se necesita las fracciones molares de cada hidrocarburo componente del GLP y con los valores estándar de “z” de cada hidrocarburo, se realiza el producto entre estos elementos, finalmente se realiza la sumatoria de cada producto y se obtiene la “z” del GLP (Beggs, H., 1984).

Se aplica la expresión:

$$z = \sum_{i=1}^n z_i * y_i \quad (2. 26)$$

Donde:

z = Factor de desviación del GLP. Es un valor adimensional.

z_i =Factor de desviación de cada componente del GLP. Es un valor adimensional.

En la tabla 2.6, están los valores para “z” que se emplean en este trabajo:

Tabla 2.6. FACTOR “z” A CONDICIONES ESTÁNDAR PARA CADA COMPONENTE DEL GLP

| HIDROCARBUROS COMPONENTES DEL GLP | FACTOR DE COMPRESIBILIDAD DE UN GAS REAL “z”(14,696 psia , 60°F) |
|-----------------------------------|---|
| Etano | 0,9916 |
| Propano | 0,9820 |
| i-Butano | 0,9696 |
| n-Butano | 0,9667 |
| i-Pentano | 0,9544 |
| n-Pentano | 0,9549 |

FUENTE: Tabla 2-2. Physical Constants of Hydrocarbons (Beggs, H., 1984).

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

En la tabla 2.7 consta los valores que se obtienen del cálculo usando los valores de fracción molar calculados anteriormente para la obtención del peso molecular.

Tabla 2.7. CÁLCULO DE VALORES DE "z" PARA CADA COMPONENTE DEL GLP CON FRACCIONES MOLARES

| COMPONENTES | FRACCIÓN MOLAR DE CADA COMPONENTE (yi) | FACTOR DE COMPRESIBILIDAD DE UN GAS REAL (zi) | zi* yi |
|-------------|--|---|--------|
| Etano | 0,01910 | 0,9916 | 0,0189 |
| Propano | 0,58947 | 0,9820 | 0,0578 |
| i-Butano | 0,11934 | 0,9696 | 0,1157 |
| n-Butano | 0,26869 | 0,9667 | 0,2597 |
| i-Pentano | 0,00306 | 0,9544 | 0,0029 |
| n-Pentano | 0,00030 | 0,9549 | 0,0002 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

Aplicando la ecuación 2.26 para la obtención de "z" del GLP, se tiene :

$$z = 0,976$$

La forma más común para obtener "z" usa las condiciones de presión y temperatura medidas en el tanque pero en condiciones absolutas, cuyos valores son muy bajos para el GLP en vapor. En este caso el valor de "z" se obtiene acudiendo a una gráfica extendida de Standing y Katz con la previa obtención de la presión y temperatura reducidas, que a su vez deben obtenerse de la relación entre las propiedades de presión y temperatura del gas para su respectivas propiedades críticas; así finalmente, con estos valores se ingresa en la gráfica mencionada y se obtiene el valor de z (Craft, B. y Hawkins, H., 1968).

2.2.1.3. Cálculo de masa del GLP con la Aplicación 1

A continuación se realiza un ejemplo de cálculo de la masa de GLP en sus 2 estados (líquido y vapor), para lo cual se toma como referencia los datos empleados en el método de cálculo volumétrico detallado, además de incluir los datos necesarios en el proceso.

Se describe el proceso de cálculo de masa por pasos, utilizando los mismos datos para el cálculo de volumen del numeral 2.1.4.

PASO 1: Aplicar la expresión de obtención de masa de GLP a condiciones estándar y en estado líquido directamente. Use los datos empleados en la numeral 2.1.4, además considere el dato adicional siguiente:

$\rho_{\text{Agua } 60^{\circ}\text{F}} = \text{Densidad del agua a } 60^{\circ}\text{F} = 0,999016 \text{ kg/l}$

Entonces se aplica la ecuación 2.16:

$$m L_{ST} = (30112,150 \text{ l}) * (0,528) * \left(0,999016 \frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)$$

$$m L_{ST} = 15868,529 \text{ kg}$$

PASO 2: Aplicar la ecuación de obtención de masa de GLP a condiciones estándar y en estado de vapor.

Considerar los datos de peso molecular y z del GLP calculados en secciones anteriores:

$z = \text{Factor de desviación del GLP} = 0,976$

$PM = PM_a = \text{Peso molecular aparente del GLP} = 49,37 \text{ g/mol.}$

Usar el dato obtenido en el numeral 2.1.4 que es: $V_{G_{ST}} = 442164,710 \text{ l}$

Se debe expresar el valor del peso molecular aparente en unidades de kg/mol, y se tiene:

$$PM_a = 49,37 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$PM_a = 0,04937 \text{ kg/mol}$$

Luego se aplica la ecuación 2.17 para la obtención de masa y se tiene:

$$m V_{ST} = (442164,710 \text{ l}) * (0,04937 \text{ kg/mol}) * \frac{1}{0,976} * \left(\frac{1 \text{ mol}}{22,414 \text{ l}}\right)$$

$$m V_{ST} = 997,307 \text{ kg}$$

PASO 3: Obtener la masa total de GLP a condiciones estándar, sumando las masas de ambas fases del GLP (líquido y gas), usar la ecuación 2.15:

$$m T_{ST} = 15868,529 \text{ kg} + 997,307 \text{ kg}$$

$$m T_{ST} = 16865,833 \text{ kg}$$

2.2.2. APLICACIÓN 2 USANDO PROPIEDADES DE LÍQUIDOS Y EQUIVALENTE DE GAS EN LÍQUIDO

Se realiza una estructuración de un proceso de cálculo de masa de GLP, el cual incluye el método volumétrico explicado al inicio de este capítulo, pero usando el volumen de GLP vapor transformado en su equivalente en líquido; por lo tanto, las expresiones a aplicarse son:

$$mT_{ST} = m L_{ST} + m V_{ST} \quad (2.27)$$

$$mL_{ST} = VL_{ST} * \rho_{GLP\ 60^{\circ}F} \quad (2.28)$$

$$mG_{ST} = VG_{ST,L} * \rho_{GLP\ 60^{\circ}F} \quad (2.29)$$

Donde:

mT_{ST} = Masa total del GLP (Incluyendo estado líquido y de vapor) medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

mL_{ST} = Masa del GLP en estado líquido medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

mG_{ST} = Masa del GLP en estado de vapor medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg (kilogramos).

VL_{ST} = Volumen de GLP en estado líquido, medido a condición de temperatura estándar y calculada con el método de la Norma API 14.8, expresado en unidades de l (litros).

$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F}$ = Densidad del GLP medido a condiciones estándar, expresado en unidades de kg/l.

$VG_{ST,L}$ = Volumen de GLP en estado de vapor transformado en su equivalente en líquido medido a condición de temperatura estándar y calculado con el método de la norma API 14.8.

2.2.2.1. Procedencia de las ecuaciones a usarse en la Aplicación 2 para la obtención de masa.

Se justifica de manera detallada cuáles son las propiedades y procedimientos desarrollados para obtener finalmente cada una de las ecuaciones que se aplican

en el cálculo de masa de GLP contenido en los tanques estacionarios usando solo propiedades de líquidos.

Ecuación para obtención de la masa de GLP en estado líquido a condiciones estándar

En este caso la ecuación resulta de la combinación entre la densidad y gravedad específica de un líquido todo medido a 60°F, de donde se despeja la masa del líquido en este caso GLP a 60°F y así finalmente se obtiene la ecuación 2.28.

Es importante aclarar que el volumen de GLP líquido a condiciones estándar que interviene es el que se describe con la expresión 2.2.

Además el cálculo de la densidad que se incluye, se obtiene despejando la densidad del GLP de la ecuación 2.18, por lo que se tiene:

$$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F} = \gamma_{60^{\circ}F} * \rho_{Agua\ 60^{\circ}F} \quad (2.30)$$

Ecuación para obtención de la masa de GLP vapor con su equivalente en líquido a condiciones estándar

En este caso se utiliza el volumen de GLP vapor convertido en su equivalente en líquido todo lo cual se describe con la ecuación 2.14, además es de importancia aclarar que al utilizar un volumen equivalente en líquido se puede usar nuevamente el valor de la densidad del GLP en estado líquido y se aplica el mismo procedimiento para calcular la masa de GLP líquido, finalmente se obtendrá la ecuación 2.29 que es la que usa.

Ecuación para obtención de la masa total de GLP

La masa total del GLP almacenado en tanques estacionarios resulta de la suma de las masas previamente calculadas, como se muestra en la ecuación 2.27.

2.2.2.2. Cálculo de masa del GLP con la Aplicación 2

Se realiza un ejemplo de cálculo de la masa de GLP usando el volumen de GLP líquido como tal y el GLP vapor en su equivalente en líquido.

Además se utilizan los datos empleados en el cálculo de volumen del numeral 2.1.4 de este capítulo.

PASO 1: Obtener la densidad del GLP líquido medido a la temperatura de 60°F con la ecuación 2.30.

$$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F} = (0,528) * \left(0,999016 \frac{kg}{l}\right)$$

$$\rho_{GLP\ 60^{\circ}F} = 0,527 \frac{kg}{l}$$

PASO 2: Aplicar la ecuación 2.28 para la obtención de masa de GLP a condiciones estándar y en estado líquido directamente.

$$m_{L_{ST}} = (30112,150\ l) * \left(0,527 \frac{kg}{l}\right)$$

$$m_{L_{ST}} = 15868,529\ kg$$

PASO 3: Obtener la masa de GLP a condiciones estándar y en estado de vapor, usando el valor del volumen de GLP vapor en su equivalente en líquido. Aplicar la ecuación 2.29.

$$m_{V_{ST}} = (1933,382\ l) * \left(0,527 \frac{kg}{l}\right)$$

$$m_{V_{ST}} = 1018,855\ kg$$

PASO 4: Calcular la masa total de GLP a condiciones estándar con la suma de las masas de GLP previamente calculadas usando la ecuación 2.27:

$$m_{T_{ST}} = 15868,529\ kg + 1018,855\ kg$$

$$m_{T_{ST}} = 16887,384\ kg$$

2.3. ANÁLISIS DETALLADO DE MÉTODOS DE CÁLCULO VOLUMÉTRICOS Y DE MASA EMPLEADOS EN LAS PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE GLP CONSIDERADAS

Se realiza el análisis detallado de cada uno de los métodos aplicados en las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas para este estudio, aplicando correctamente las propiedades para líquidos y gases, así se determina

elementos claves para posteriormente verificar la veracidad de los métodos aplicados en las plantas consideradas.

La verificación se realiza estructurando cada método aplicado actualmente por las plantas y comparándolo con las fórmulas proporcionadas por cada una.

El desarrollo de esta sección es útil para posteriormente justificar la aplicación del método de obtención de masa que incluye el cálculo del volumen del GLP que se encuentra completamente descrito en el actual capítulo del presente trabajo.

Los métodos considerados para el desarrollo de este documento corresponden a las plantas que se ubican entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi:

- ECOGAS SALCEDO: Ubicada en la provincia de Cotopaxi, cantón Salcedo y perteneciente a la comercializadora ECOGAS S.A.
- DURAGAS PIFO: Ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia Pifo y perteneciente a la comercializadora DURAGAS S.A.
- ENI PIFO: Ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Quito, Parroquia Pifo y perteneciente a la comercializadora ENI ECUADOR S.A.

2.3.1. ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA ECOGAS SALCEDO

Para iniciar el respectivo análisis y descripción del método empleado por la planta Ecogas Salcedo, se debe especificar en primer lugar cual fue la información proporcionada por la planta, para la posterior justificación de la obtención de cada una de las fórmulas aplicadas.

Así se puede indicar que la información disponible hasta el momento es:

- Tablas de calibración de cada uno de los tanques estacionarios disponibles en la planta para el almacenamiento de GLP, especificándose que en total se dispone de 5 tanques, que son: TA-1, TA-2, TE-1, TE-2 y TE-3.
- Tabla de gravedad específica vs peso molecular que se usa por la planta en la obtención del peso molecular del GLP.
- Descripción general del método de cálculo de masa de GLP.
- Hoja de cálculo de la masa de GLP.

Ahora es necesario aclarar los siguientes puntos respecto de la información proporcionada:

- En cuanto a la descripción del método aplicado en la planta, se trata del cálculo de la cantidad de GLP almacenado en tanques estacionarios, es decir la obtención de la masa de GLP en unidades de kg.
Este método es útil para poder identificar el proceso de obtención del volumen de GLP, y posteriormente calcular la masa del GLP con los datos que la planta proporciona y aplicando correctamente las propiedades para líquido y gas.
- Se aclara que el método proporcionado por la planta, no justifica cual es la base o norma técnica en la que se basa, además no existe una justificación en cuanto a la obtención de las fórmulas y constantes aplicadas en el método de cálculo volumétrico y por ende tampoco se justifica la obtención de la masa, por lo que se necesita desarrollar cada una de las fórmulas que emplea el método.

Con los antecedentes mencionados, se procede en primer lugar a describir el método de cálculo proporcionado por la planta, acudiendo a toda la información que se dispone, posteriormente se realiza un análisis completo del procedimiento de cálculo empleado con la estructuración del método, describiendo detalladamente las fórmulas aplicadas por la planta y con las debidas justificaciones.

2.3.1.1. Descripción del Método proporcionado por Ecogas Salcedo

Obtención de la Masa del GLP en fase líquida

La planta describe en su método la siguiente expresión para la obtención de masa de GLP para la fase líquida:

$$GLP \text{ LÍQUIDO} = CMT * \%LIQ * GE * FCT \quad (2.31)$$

Donde:

GLP LÍQUIDO = Masa del GLP en fase líquida, medida en unidades de kg (kilogramos).

CMT = Capacidad máxima del tanque estacionario, es el volumen que puede almacenar el tanque estacionario obtenido según la tabla de calibración correspondiente para cada tanque estacionario, medido en unidades de l (litros).

%LIQ = Porcentaje de líquido presente en el tanque estacionario, es un valor que se obtiene directamente del tanque ya sea con el rotogage o magnetel que son instrumentos de medida que se encuentran instalados en el tanque dependiendo del diseño de cada uno.

GE = Gravedad específica del GLP valor obtenido mediante el instrumento llamado termo densímetro, es un valor adimensional (la planta Ecogas Salcedo indica que GE está medido en unidades de kg/l).

FCT = Factor de corrección de temperatura, este valor que se obtiene de la tabla de corrección volumétrica, ingresando con el dato de temperatura medida en el tanque mediante un termómetro instalado en el mismo y con el dato de gravedad específica del GLP. Es un valor adimensional

Obtención de la masa del GLP en fase de vapor

Para la obtención de la masa en fase de vapor en el método de la Planta se tiene la expresión:

$$GLP\ VAPOR = \%VAP * PM * FP * FTRA * CTE \quad (2.32)$$

Donde:

%VAP = Porcentaje de vapor presente en el tanque estacionario (la planta Ecogas Salcedo indica que este valor se obtiene al restar CTM - % LIQ).

PM = Peso molecular del GLP, obtenido de la tabla de gravedad específica vs peso molecular ingresando con el dato de gravedad específica del GLP. Es un valor medido en unidades g/mol (gramos sobre mol).

FP = Factor de presión, el cual viene expresado por:

$$FP = \frac{(P + 1,033)}{1,033} \quad (2.33)$$

La planta indica que P es la presión de GLP en el tanque que está expresado en unidades BAR (Bares), y es un valor que se obtiene con un manómetro instalado en cada tanque estacionario. El FP es un valor adimensional.

FTRA = Factor de temperatura R/A, el cual es un valor que se obtiene de la tabla de corrección volumétrica ingresando con los datos de temperatura medida en el tanque y con el dato de gravedad específica del GLP. Es un valor adimensional.

CTE = Constante cuyo valor equivale a 0,0001. Es un valor adimensional (La planta Ecogas Salcedo no justifica la procedencia de dicho valor).

Obtención de la Masa total de GLP

Para obtener el total de la masa de GLP, solamente se suman las fases líquida y de vapor de GLP que ya se han obtenido con las expresiones anteriores, de la siguiente manera:

$$GLP\ TOTAL = GLP\ LIQUIDO + GLP\ VAPOR \quad (2.34)$$

Donde se tiene que:

GLP TOTAL = Masa total de GLP, medida en unidades de kg (kilogramos).

2.3.1.2. Estructuración del Método aplicado en Ecogas Salcedo

Volumen de GLP en fase líquida

Es importante identificar la ecuación de obtención de volumen ocupado por la planta para el posterior uso en la obtención de masa.

Entonces para iniciar el cálculo de volumen de GLP líquido se considera que habrá un porcentaje de GLP en fase líquida (% LIQ), el cual es un valor obtenido directamente por medio del instrumento medidor instalado en cada tanque (rotogage o magnetel).

Posteriormente con el ingreso del dato de porcentaje de líquido en las tablas de calibración del tanque se obtiene un volumen inicial del GLP en fase líquida, sin embargo dicho valor de volumen también puede obtenerse del producto entre el porcentaje líquido por el volumen total del tanque presente en la tabla de calibración del tanque considerado, como se muestra a continuación:

$$VL = CMT * (\%LIQ)$$

Donde:

VL = Volumen de GLP en fase líquida medido inicialmente en el tanque, medido en unidades de l.

CMT = Capacidad máxima del tanque o volumen total, obtenido de la tabla de calibración del tanque y expresado en unidades de l.

$\%LIQ$ = Porcentaje de GLP líquido, medido directamente en el tanque por medio del rotogage.

Posteriormente este volumen de GLP en fase líquida medido inicialmente en el tanque debe corregirse a condiciones estándar, entonces se multiplica por un factor de corrección por temperatura descrito por la planta, de esta manera la fórmula de obtención del volumen de GLP líquido queda expresada por:

$$V1_{GLP} = VL * FCT$$

Donde:

$V1_{GLP}$ = Volumen de GLP en fase líquida, medido a condiciones estándar y expresado en unidades de l.

FCT = Factor de corrección por temperatura, el cual es un valor adimensional obtenido de la tabla de corrección volumétrica del tanque estacionario, ingresando con la GE del GLP medida con el termo densímetro y a la temperatura del GLP medida en el tanque.

Entonces la expresión completa de obtención del volumen de GLP líquido a condiciones estándar aplicada por la planta es:

$$V1_{GLP} = CMT * (\%LIQ) * FCT \quad (2. 35)$$

Masa de GLP en fase líquida

Se procede a estructurar la fórmula para la obtención de masa en fase líquida del GLP, incluyendo el cálculo de volumen obtenido previamente y considerando que todos los valores que se utilizan deben llevarse a condiciones estándar, entonces

se debe partir de la ecuación 2.19 de densidad para un fluido aplicada en este caso para el GLP líquido, posteriormente se despeja la masa y se expresa como:

$$m1_{GLP} = \rho_{GLP} * V1_{GLP}$$

Donde:

$m1_{GLP}$ = Masa del GLP en fase líquida, medido a condiciones estándar y expresado en unidades de kg.

ρ_{GLP} = Densidad del GLP medido a condiciones estándar y expresado en unidades de kg/l.

Ahora con el propósito de obtener una fórmula completa de cálculo de masa del GLP en fase líquida, entonces se reemplaza la ecuación 2.35 en la expresión de masa de GLP en fase líquida, y se obtiene:

$$GLP \text{ LÍQUIDO} = \rho_{GLP} * CMT * (\%LIQ) * FCT \quad (2.36)$$

Donde se aclarar que para tener los mismos términos de la planta se tiene la siguiente igualdad:

$$m1_{GLP} = GLP \text{ LÍQUIDO} = \text{Masa del GLP en fase líquida.}$$

Volumen de GLP en fase de vapor

Se considera el proceso de obtención del volumen de GLP en fase de vapor, tomándose en cuenta que el volumen que obtiene la planta es el que se mide inicialmente a condiciones del tanque.

Entonces el proceso de cálculo considera la diferencia entre el volumen total del tanque estacionario y el volumen del GLP en estado líquido medido inicialmente en el tanque, lo cual se describe como:

$$Vvap_{GLP} = CMT - VL \quad (2.37)$$

Donde:

$V vap_{GLP}$ = Volumen de GLP en estado de vapor medido inicialmente en el tanque estacionario, expresado en unidades de l.

Masa del GLP en fase de vapor

Se procede a estructurar la expresión para la obtención de la masa de GLP en fase de vapor, partiendo de la ley de los gases reales con la ecuación 2.20 y se incluye la ecuación de moles de un gas representada por la ecuación 2.21, posteriormente se despeja la masa en los términos que se maneja en la planta y se obtiene:

$$m_{2_{GLP}} = P * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * (R * T)^{-1}$$

Donde:

$m_{2_{GLP}}$ = Masa del GLP en fase de vapor, medida inicialmente en unidades de TM (toneladas métricas), posteriormente se hace el cambio de unidades a kg.

PM_{GLP} = Peso molecular del GLP, medido en unidades de g/mol. Este valor es explicado en el procedimiento de la planta que se obtiene mediante la tabla de gravedad específica vs peso molecular a partir del valor de gravedad específica medida con el termo densímetro.

El producto $(R * T)^{-1}$, puede representarse de otra manera, para lo cual se utiliza la ecuación 2.22 de obtención de la constante universal de los gases "R", que se puede reemplazar en el producto de $(R * T)^{-1}$ y obtener su igualdad de la siguiente manera:

$$(R * T)^{-1} = \left(\frac{P_{SC} * V_g}{n_g * T_{SC}} \right)^{-1} * T^{-1}$$

$$(R * T)^{-1} = \frac{n_g * T_{SC}}{P_{SC} * V_g} * \frac{1}{T}$$

Donde:

P_{SC} = Presión a condiciones estándar que tiene el valor de 1 atm, que son las unidades utilizadas en este caso.

T_{SC} = Temperatura a condiciones estándar que tiene el valor de 273,15 K, que son las unidades utilizadas en este caso.

n_g = Moles de un gas a condiciones estándar o ideales, considerándose que 1 mol del gas ocupa un volumen de 22,414 l a las condiciones señaladas (Chang, R., 2002).

V_g = Volumen de un gas a condiciones estándar que equivale a 22,414 l.

Se puede aclarar que la temperatura del GLP en el tanque se mide en °C con el termómetro, pero se necesita el valor en unidades de K, por lo que se incluye en la fórmula de $(R * T)^{-1}$ la respectiva conversión de unidades, además se incluyen los valores de las condiciones estándar, entonces se tiene:

$$(R * T)^{-1} = \frac{(1mol) * (273,15 K)}{(1atm) * (22,414 l)} * \frac{1}{(273,15 + ^\circ C) K}$$

De la expresión anterior, simplificando los valores correspondientes, entonces se tiene la siguiente expresión que se la denomina factor RA:

$$(R * T)^{-1} = RA = \left[\frac{273,15}{22,414 * (273,15 + ^\circ C)} \right] \left[\frac{mol}{atm * l} \right] \quad (2.38)$$

Teniendo claro la expresión 2.38, se incluye simplemente el término RA en la ecuación de obtención de masa de GLP en fase de vapor ($m_{2_{GLP}}$), adicionalmente se incluye la ecuación 2.37, considerando la igualdad:

$V = V_{vap_{GLP}}$ = Volumen de GLP en estado de vapor medido inicialmente en el tanque estacionario, expresado en unidades de L.

De esta manera se obtiene :

$$m_{2_{GLP}} = P * (CTM - V1_{GLP}) * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * RA$$

Realizando un análisis las unidades en la expresión anterior se tiene:

$$m_{2_{GLP}}[g] = P[atm] * (CTM - V1_{GLP})[L] * PM_{GLP} \left[\frac{g}{mol} \right] * RA * \frac{1}{Z} [adim] * \left[\frac{mol}{atm * L} \right]$$

Se puede observar que el resultado de la masa en la ecuación anterior está expresado en gramos, pero es necesario para el caso actual que la masa se exprese en unidades de kg, entonces se procede a realizar las respectivas conversiones de unidades conociendo que:

1 kg = 1000 g (Cengel, Y. y Boles, M., 2009).

Así se procede a incluir las respectivas conversiones de unidades y se tiene:

$$m2_{GLP} = P * (CTM - V1_{GLP}) * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * RA \left[g * \frac{1kg}{1000g} \right]$$

$$m2_{GLP} = P * (CTM - V1_{GLP}) * PM_{GLP} * RA * \frac{1}{10^3} [kg]$$

$$m2_{GLP} = P * (CTM - V1_{GLP}) * PM_{GLP} * RA * 0,001 [kg]$$

En este punto se puede aclarar que el valor de 0,001 corresponde a la expresión “CTE” que se señala en el método de la planta, y que ahora se identifica que es un factor de conversión de unidades de gramos en kg, por lo que se tiene:

$$m2_{GLP} = P * (CTM - V1_{GLP}) * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * RA * CTE [kg]$$

Posteriormente se debe identificar otro dato importante en cuanto a la presión del GLP pues se debe usar el valor de presión absoluta por lo que se inicia con la ecuación 2.7, pero expresada en otros términos, así:

$$P_{absoluta} = P_{man} + P_{atm\ local}$$

Donde:

P_{man} = Presión del GLP medida en el tanque estacionario con el manómetro, obtenida inicialmente en unidades de psi , pero para la explicación en este método se necesita ingresar en este caso en unidades de kgf/cm² (kilogramos fuerza por centímetro cuadrado). Considerando que 14,696 psi = 1,03323 kgf/cm² (Cengel, Y. y Boles, M., 2009).

$P_{atm\ local}$ = Es el valor de la presión en un determinado lugar, es un valor variable dependiendo del sitio donde se la mida con un barómetro, en este caso se toma un valor estándar que es 1,03323 kgf/cm².

De la ecuación anterior se puede indicar que la presión absoluta debe estar expresada en unidades de atm absolutas, por lo que en primer lugar los datos de presión son ingresados en las unidades de kgf/cm², para luego convertirlos a unidades de atm, entonces la expresión para la obtención de presión absoluta

incluyendo unidades y reemplazando el valor de la presión atmosférica local, queda como:

$$P_{absoluta} = (P_{man} + 1,03323) \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

Entonces realizando la conversión de unidades de la expresión de presión absoluta a unidades de atm, se tiene:

$$P_{absoluta} = (P_{man} + 1,03323) * \left[\frac{kgf}{cm^2} \right] * \frac{1atm}{1,03323 \frac{kgf}{cm^2}}$$

Realizando la respectiva simplificación se obtiene una ecuación de presión absoluta que en adelante para relacionar con el procedimiento proporcionado por la planta, se la puede renombrar como P o FP (según la planta), entonces teniendo claro que las unidades son atm, la ecuación es:

$$P = FP = \left(\frac{P_{man} + 1,03323}{1,03323} \right) [atm] \quad (2. 39)$$

Se puede indicar que la expresión de obtención de masa aquí estructurada ($m2_{GLP}$) se la expresa en los términos de la planta Ecogas Salcedo, por lo que se incluye las siguientes igualdades:

$PM_{GLP} = PM =$ Peso molecular del GLP en unidades de g/mol.

$m2_{GLP} = GLP VAPOR =$ Masa del GLP en fase de vapor.

Entonces la ecuación final y completa de obtención de masa de vapor, queda de la siguiente manera:

$$GLP VAPOR = FP * (CTM - V1_{GLP}) * PM * \frac{1}{Z} * RA * CTE \quad (2. 40)$$

2.3.2. ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA DURAGAS PIFO

Antes de comenzar con el análisis y descripción del método empleado por la planta Duragas Pifo, se debe aclarar en primer lugar cual fue la información proporcionada por la planta, que es:

- Tablas de calibración de cada uno de los tanques estacionarios disponibles en la planta para el almacenamiento de GLP, especificándose que en total se dispone de 3 tanques, que se identifican así: D-19, D-20, D-23.
- Tabla de gravedad específica vs peso molecular, para la obtención de datos para la fase de vapor.
- Tabla de corrección de gravedad específica del gas a 15°C para la obtención de la fase de vapor. Identificada como Tabla 53 y basada en norma ASTM.
- Tabla de obtención de factor de corrección volumétrica a 15°C. Identificada como Tabla 54 y basada en norma ASTM.
- Tabla de densidad de gas corregida a 15°C vs constantes de conversión en unidades kg/l y l/TM. Identificada como tabla 56 y basada en norma ASTM.
- Descripción del procedimiento para la obtención de los datos medidos en los tanques estacionarios con los respectivos instrumentos de medida utilizados, es decir, es una descripción de lo que se conoce como toma física de stock del GLP al granel en tanques estacionarios.
- Hoja de cálculo de la masa de GLP.

Ahora es necesario aclarar los siguientes puntos respecto de la información proporcionada:

- Se aclara que el método proporcionado por la planta, justifica que la base técnica en la que se basa para su aplicación es una norma ASTM, pero no se especifica la designación o el número de la norma, sin embargo, se describe que dicha norma presenta en su contenido, tablas de corrección de gravedad específica y volumétrica a 15 °C.
- En cuanto a la tabla de obtención de peso molecular para el GLP en fase de vapor, la planta no indica un justificativo de su procedencia.
- Finalmente se aclara que no existe una justificación completa en cuanto a la obtención de las ecuaciones aplicadas en el método de cálculo, por lo que se necesita hacer una explicación de manera que se pueda obtener cada una de las expresiones que emplea el método.

Ahora teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, se procede a realizar una breve descripción del método de cálculo empleado actualmente por la planta, usando como base la información proporcionada y realizando un análisis del procedimiento de cálculo con el propósito de describir detalladamente las ecuaciones aplicadas.

2.3.2.1. Descripción del Método proporcionado por Duragas Pifo

El método que se describe se basa en la hoja de cálculo proporcionada por la planta, por lo que se procede a interpretar cada una de las expresiones empleadas en la obtención de cada una de las fases del GLP (líquido y vapor), contenidas en los tanques estacionarios, esto debido a que la planta únicamente proporciona la hoja de cálculo y un breve procedimiento del uso de los instrumentos para medir las propiedades del GLP en el tanque estacionario.

Obtención de la Masa del GLP en fase líquida

El proceso que usa la planta para la obtención de la masa en fase líquida del GLP se explica en 3 partes, así:

$$\text{Litros Estacionarios} = \%L * CTE \quad (2.41)$$

Donde:

Litros Estacionarios = Volumen de GLP en fase líquida en el tanque estacionario, medido en unidades de l (litros).

CTE = Capacidad o volumen máximo que puede almacenar el tanque estacionario, medido en unidades de l (litros).

%L = Porcentaje de volumen de GLP en fase líquido, es un dato que se mide físicamente a partir de un instrumento instalado en el tanque estacionario denominado rotogage (medidor manual).

Posteriormente se usa la siguiente expresión:

$$\text{Litros Corr a } 15^{\circ}\text{C} = \text{Litros Estacionarios} * FC \text{ Vol Corr a } 15^{\circ}\text{C} \quad (2.42)$$

Donde:

Litros Corr a 15°C = Volumen de GLP en fase líquida, corregido a la temperatura de 15°C, expresado en unidades de l (litros).

FC Vol Corr a 15°C = Factor de corrección para reducción del volumen a una temperatura de 15°C; se obtiene ingresando a una tabla de corrección (Tabla 54) a partir del dato de gravedad específica del GLP previamente corregida a la temperatura de 15°C, es un valor adimensional.

Por último se realiza:

$$\text{Kilos Liq Final} = \text{Litros Corr a } 15^{\circ}\text{C} * \rho_{GLP} \quad (2.43)$$

Donde:

Kilos Liq Final = Masa de GLP en fase líquida corregida a la temperatura de 15°C, es un valor medido en unidades de kg (kilogramos).

ρ_{GLP} = Densidad del GLP corregida a de 15°C (Tabla 56) a partir del dato de gravedad específica del GLP previamente corregida a la temperatura de 15°C. Es un valor que está expresado en unidades de kg/l.

Obtención de la Masa del GLP en fase de vapor

Se considera que la planta aplica lo siguiente:

$$\text{Dif. Litros} = (\% \text{Vap}) * \text{CTE} \quad (2.44)$$

Donde:

Dif. Litros = Volumen de GLP en fase de vapor, medido en unidades de l (litros).

% Vap = Porcentaje del GLP en fase de vapor.

A continuación se aplica la siguiente expresión:

$$\text{Kilos Vap Final} = \text{Dif. Litros} * \left(\frac{\text{Peso Molec}}{22,4} \right) * \left(\frac{273,15}{T^{\circ}\text{C} + 273,15} \right) * \text{FP} \quad (2.45)$$

Donde:

Kilos Vap Final = Masa de GLP en fase de vapor, medida en unidades de kg (kilogramos).

Peso Molec = Peso molecular del GLP en fase de vapor, se expresa en unidades de kg/mol; es obtenido inicialmente en unidades de g/mol a partir de una tabla de gravedad específica vs peso molecular.

$T^{\circ}C$ = Temperatura del GLP medida a condiciones del tanque estacionario con el instrumento denominado termo densímetro. Es un valor que está expresado en $^{\circ}C$ (grados Celsius).

FP = Factor de presión, se obtiene usando la expresión:

$$FP = \frac{P * 0,07030696 + 1,033}{1,033} \quad (2.46)$$

En la expresión de FP , se aclara que P corresponde a la presión del GLP medida a condiciones del tanque con el manómetro instalado en el tanque estacionario. Este valor está expresado en unidades de psi.

Obtención de la Masa total de GLP

La masa total de GLP almacenado en los tanques estacionarios se obtiene de la suma de la fase líquida y la de vapor, está expresada en kg como se muestra:

$$MASA\ TOTAL\ GLP = Kilos\ Liq\ Final + Kilos\ Vap\ Final \quad (2.47)$$

2.3.2.2. Estructuración del Método aplicado por Duragas Pifo

Volumen de GLP en fase líquida

Se indica que las ecuaciones para la obtención del volumen líquido aplicado por la planta están estructuradas correctamente por lo que, a continuación se tiene una explicación del uso de las mismas:

A partir de la medida con el rotogage, se obtiene el porcentaje de GLP en fase líquida contenida en el tanque estacionario (% L), posteriormente este porcentaje en volumen se multiplica por el volumen total del tanque calibrado y así se obtiene el volumen de GLP en estado líquido presente en el tanque, esto se describe con la ecuación 2.41.

El volumen de GLP líquido puede también ser obtenido directamente con el uso de las tablas de calibración que se dispone para cada uno de los tanques estacionarios y que han sido proporcionadas por la planta.

Entonces a partir del conocimiento del % en volumen medido con el rotogage y con el ingreso de este porcentaje en la tabla de calibración y corrección volumétrica para el respectivo tanque estacionario finalmente se tiene el correspondiente valor del volumen.

El volumen obtenido del GLP líquido se encuentra a condiciones del tanque estacionario y debido a las actividades de fiscalización dicho valor debe ser expresado a condiciones estándar.

Para la fase líquida es considerada solamente la corrección por temperatura estándar, usando la tabla 54 de la Norma ASTM que aplica la planta. Se aclara que el valor de la temperatura estándar es 60°F que equivale a 15°C aproximadamente, con lo que se identifica que la planta usa el valor de temperatura estándar de 15°C según la norma que aplica.

De manera detallada lo que se hace es corregir el volumen que se tiene en el tanque para llevarlo a la temperatura estándar, luego se aplica un factor de corrección a 15°C al volumen anterior y así se obtiene la ecuación 2.42, que la planta indica.

Como se pudo identificar es necesario tener el valor de la gravedad específica del GLP corregida a 15°C, dicho valor se obtiene de otra tabla basada en la norma ASTM que corresponde a la tabla 53 a partir del dato de la gravedad específica del GLP medida con el termo densímetro, por lo que también debe llevarse a la condición estándar de temperatura.

Para el uso de la tabla 53, el procedimiento de la planta indica que, se ingresa con el dato de la gravedad específica del GLP medida con el termo densímetro y con la temperatura medida en el tanque, posteriormente se obtiene el valor de la gravedad corregida a 15°C, tomando en cuenta que si el valor no se encuentra exactamente en la tabla se deberá usar el proceso de interpolación.

Ahora teniendo claro que ya se ha obtenido el valor de la gravedad específica a 15°C, posteriormente se debe aplicar el mismo procedimiento para obtener el factor de corrección volumétrico a 15°C, en el caso que no se disponga directamente del valor en la tabla de corrección con el ingreso de la gravedad

específica corregida a 15°C y la temperatura medida en el tanque, entonces se debe usar un nuevo proceso de interpolación.

Masa de GLP en fase líquida

Para obtener la masa de GLP en fase líquida se considera la ecuación 2.19 con un cambio de términos, en esta ecuación se despeja la masa y se tiene:

$$m1_{GLP} = V1_{GLP} * \rho_{GLP}$$

La ecuación de obtención de masa se puede expresar en los mismos términos que describe la planta, aclarando que:

Kilos Liq Final = $m1_{GLP}$ = Masa de GLP en fase líquida, expresada en unidades de kg.

Litros Corr a 15°C = $V1_{GLP}$ = Volumen de GLP corregido a 15°C, expresado en unidades de l.

ρ_{GLP} = Densidad del GLP corregida a 15°C, expresado en unidades de kg/l.

La expresión que se obtiene y que describe la planta queda representada por la ecuación 2.43.

Es necesario aclarar que para obtener el valor de la densidad del GLP corregido a 15°C, se debe utilizar otra tabla basada en la norma ASTM, específicamente la tabla 56, en la cual se ingresa con el valor de la gravedad específica corregida a 15 °C y se obtiene el valor de densidad en unidades de kg/l.

Además se debe considerar que, si el valor de densidad no se encuentra directamente en la tabla, nuevamente se debe recurrir al proceso de interpolación.

Volumen de GLP en fase de vapor

Se indica que, para obtener el volumen del GLP en fase de vapor, primero se necesita el porcentaje de volumen de la fase de vapor presente en el tanque y posteriormente el valor obtenido se multiplica por el volumen total del tanque, así finalmente se calcula el volumen en fase de vapor de GLP, por lo que se aclara que está correctamente aplicada la fórmula de volumen de vapor por la planta la misma que corresponde a la ecuación 2.44.

Es necesario aclarar que el porcentaje de volumen de la fase de vapor del GLP se obtiene de la diferencia entre el porcentaje total del tanque menos el porcentaje de la fase líquida de GLP, así:

$$\% Vap = \%T - \%L \quad (2.48)$$

Donde:

$\%T$ = Porcentaje total del tanque estacionario completamente lleno, es equivalente a 100%.

Masa de GLP en fase de vapor

La estructuración de la expresión para la obtención de la masa de GLP en fase de vapor, considera la ley de gases reales con la ecuación 2.20 en la cual se incluye la ecuación 2.21 de moles de un gas, luego se despeja la masa, que se expresa así:

$$m_{2_{GLP}} = P * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * (R * T)^{-1}$$

Hay que considerar que en la expresión anterior, el resultado de $(R * T)^{-1}$ se puede reemplazar por su igualdad que ya fue descrita para la Planta Ecogas Salcedo y que corresponde a la ecuación 2.38.

Reemplazando la ecuación 2.38 en la expresión para la obtención de masa de vapor de GLP, se tiene:

$$m_{2_{GLP}} = P * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * \frac{273,15}{22,414 * (273,15 + ^\circ C)}$$

Considerando que la presión medida en el tanque debe convertirse a presión absoluta, se usa la ecuación 2.7 con los términos siguientes:

$$P_{absoluta} = P_{man} + P_{atm}$$

Donde:

P_{man} = Presión del GLP medida en el tanque estacionario con el manómetro, expresada en unidades de psi; tomar en cuenta que para la aplicación en este método se necesita ingresar el valor en unidades de kgf/cm², considerando que 14,696 psi = 1,03323 kgf/cm² (Cengel, Y. y Boles, M., 2009).

$P_{atm\ local}$ = Es el valor de la presión en un determinado lugar; valor variable dependiendo del sitio donde se mida con un barómetro, aclarándose que en este caso se toma un valor estándar que es 1.03323 kgf/cm².

Se indica que la presión absoluta debe estar expresada en unidades de kgf/cm² absolutas por lo que, inicialmente la presión manométrica debe cambiarse de unidades de medida en el tanque que son psi y expresarla en kgf/cm², entonces la ecuación de presión absoluta incluyendo unidades y reemplazando el valor de la presión atmosférica local, es:

$$P_{absoluta} = P_{man}[psi] * \frac{1 [atm]}{14,696 [psi]} * \frac{1,03323 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]}{1 [atm]} + 1,03323 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

Realizado las operaciones y simplificaciones necesarias se tiene:

$$P_{absoluta} = P_{man} * 0,07030 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right] + 1,03323 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

Se necesita expresar todo el resultado de presión absoluta en unidades de atm absolutas para lo cual nuevamente al resultado final de la ecuación simplificada, se multiplica por el factor de conversión, así:

$$P_{absoluta} = (P_{man} * 0,07030 + 1,03323) \left[\frac{kgf}{cm^2} \right] * \frac{1 [atm]}{1,03323 [kgf/cm^2]}$$

Finalmente con la simplificación de unidades se obtiene la siguiente ecuación de presión absoluta:

$$P_{absoluta} = \frac{P_{man} * 0,07030 + 1,03323}{1,03323} [atm]$$

Se puede cambiar algunos términos de la fórmula de presión absoluta con el fin de expresarlos de manera similar a los términos que la planta señala, entonces se tiene las siguientes igualdades:

$P_{absoluta} = FP$ = Factor de presión. Obtención de presión absoluta en unidades de atm.

$P_{man} = P$ = Presión medida a condiciones del tanque por medio del manómetro y expresada en unidades de psi.

Con las aclaraciones, la ecuación final para presión absoluta es:

$$FP = \frac{P * 0,07030 + 1,03323}{1,03323} \quad (2. 49)$$

Tomando en cuenta las igualdades correspondientes a las expresiones 2.49 y 2.44, aclarándose que el volumen puede ser reemplazado por la ecuación 2.44, entonces la expresión en forma general para la obtención de masa de vapor ($m_{2_{GLP}}$), es:

$$m_{2_{GLP}} = FP * Dif.Litros * PM_{GLP} * \frac{1}{z} * \frac{273,15}{22,414 * (273,15 + ^\circ C)}$$

Finalmente para expresar la ecuación con todos los términos que la planta considera, se toman en cuenta las siguientes igualdades:

$m_{2_{GLP}} = Kilos Vap Final =$ Masa de GLP en fase de vapor, en unidades de kg.

$PM_{GLP} = Peso Molec =$ Peso molecular del GLP, expresado en unidades de kg/mol.

De esta manera la ecuación final para la obtención de la masa del GLP en fase de vapor con los términos especificados y en unidades de kg, es:

$$Kilos Vap Final = FP * Dif.Litros * Peso.Molec * \frac{1}{z} * \frac{273,15}{22,414 * (273,15 + ^\circ C)} \quad (2. 50)$$

2.3.3. ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO APLICADO POR LA PLANTA ENI PIFO

Se debe especificar en primer lugar cual fue la información proporcionada por la planta, para posteriormente realizar las justificaciones que se requieran en el transcurso del análisis, dicha información es:

- Tablas de calibración de cada uno de los Tanques estacionarios disponibles en la Planta para el almacenamiento de GLP, especificándose que en total se dispone de 12 tanques, añadiéndose las siguientes aclaraciones:
 - a) Las Tablas de calibración para los 8 primeros tanques denominados TEP01 al TEP08, corresponden a tablas para tanques de

almacenamiento que disponen de sonda (magnetel) para medición de altura del líquido.

b) Las Tablas de calibración para los tanques del 9 al 12 denominados TEP09 al TEP12, corresponden a tablas para tanques de almacenamiento que disponen de rotogage para medición de porcentaje de volumen líquido.

- Descripción del procedimiento para la obtención de la cantidad de GLP almacenada en tanques estacionarios.

Es necesario aclarar los siguientes puntos relacionados con la información proporcionada:

- El método proporcionado por la planta, justifica que la base técnica en la que se basa para su aplicación es una norma ASTM en conjunto con una norma API pero no se especifica el nombre completo o el número de las normas.
- En el procedimiento proporcionado por la planta se realiza una corrección de gravedad específica inicialmente medida con un hidrómetro (ASTM 310H) para llevarla posteriormente a la temperatura de 15,56 °C que se considera estándar y equivalente a 60°F, de igual manera se realiza una corrección volumétrica a la temperatura de 15,56 °C.
- La planta no proporciona las tablas o método de corrección de valores para llevarlos a temperatura estándar que son útiles para obtener la gravedad específica a condición estándar y el factor de corrección de volumen, por lo que, no se puede verificar la obtención de estos datos.
- Finalmente se aclara que no existe una justificación en cuanto a la obtención de las ecuaciones aplicadas en el procedimiento de la planta, por lo que se necesita realizar una estructuración de cada una de las expresiones que emplea el método.

Tomando en cuenta los antecedentes mencionados, se procede en primer lugar a describir el método de cálculo proporcionado por la planta, posteriormente se realiza un análisis completo del procedimiento de cálculo, incluyendo la estructuración del método, de esta manera se trata de describir detalladamente

las ecuaciones y resultados correctos, usando las propiedades que justifiquen el proceso.

2.3.3.1. Descripción del Método proporcionado por ENI Pifo

Se aclara que la planta ENI Pifo, solamente proporciona una descripción breve del proceso que aplican basada en normativa ASTM y API.

Obtención de la Masa del GLP en fase líquida

El proceso utilizado por la planta para la obtención de la masa en fase líquida del GLP es:

$$\text{Peso del GLP en fase líquida} = V_L * GE_{\frac{15,56}{15,56}} * (FV)_{TI} \quad (2. 51)$$

Donde:

Peso del GLP en fase líquido = Masa de GLP en fase líquida, medida en unidades de kg (kilogramos).

V_L = Volumen del líquido .Este valor puede ser medido por sonda o rotogage directamente de las tablas de calibración y corrección volumétrica, está medido en unidades de l (litros).

$GE_{\frac{15,56}{15,56}}$ = Gravedad específica reducida a temperatura de referencia, es un valor adimensional.

$(FV)_{TI}$ = Factor de corrección de volumen correspondiente a la temperatura observada, es un valor adimensional.

Obtención de la Masa del GLP en fase de vapor

Para la obtención de este valor la planta aplica lo siguiente:

$$\text{Peso del GLP en fase gaseosa} = (V_T - V_L) * P_I * PM * (FRA)_{TI} \quad (2. 52)$$

Donde:

Peso del GLP en fase gaseosa = Masa de GLP en fase de vapor, medida en unidades de kg (kilogramos).

V_T = Volumen total del tanque medido en l (litros).

P_I = Presión inicial medida + 1 atm.

PM =Peso molecular del GLP expresado en kg/mol.

$(FRA)_{TI}$ = Factor de temperatura a la temperatura final, es un dato adimensional.

Obtención de la Masa total de GLP

La masa total de GLP almacenado en los tanques estacionarios, se obtiene de la suma de la fase líquida y la de vapor, la misma que se expresa en kg, esto se muestra de la siguiente manera:

$$TOTAL\ GLP = Peso\ GLP\ en\ fase\ líquida + Peso\ GLP\ en\ fase\ gaseosa \quad (2.53)$$

2.3.3.2. Estructuración completa del Método proporcionado por ENI Pifo

Volumen de GLP en fase líquida

Se describe el proceso para obtención del volumen de GLP líquido, aclarándose que el procedimiento variará un poco dependiendo de la herramienta o aparato de medida instalado en cada tanque estacionario (rotogage o sonda), así se tiene los siguientes casos:

- Usando el aparato de medida denominado rotogage, proporciona un valor en porcentaje de líquido presente en el tanque, posteriormente se ingresa dicho valor en la tabla de calibración correspondiente a cada tanque estacionario y que proporciona la planta para finalmente obtener el volumen de GLP en fase líquida en unidades de litros.
- Usando el aparato de medida denominado sonda, proporciona un valor del nivel de líquido presente en el tanque, es decir la altura en cm que alcanza el líquido en el tanque, posteriormente conociendo este valor se ingresa en la tabla de calibración correspondiente a cada tanque y se obtiene el volumen de GLP en fase líquida que se requiere en litros.

El volumen de GLP en fase líquida debe ser corregido a una temperatura estándar que corresponde a 60 °F, o su equivalente de 15,56 °C con el que la planta trabaja, para llevar a cabo este proceso, la planta ENI Pifo indica que, se utiliza una tabla de corrección de volumen de donde se obtiene un factor de corrección de volumen

correspondiente a la temperatura observada, el cual se multiplica por el volumen líquido obtenido de la tabla de calibración para corregirlo.

Con lo explicado se puede establecer la siguiente expresión para la obtención del volumen de GLP líquido:

$$V_{1_{GLP}} = V_L * (FV)_{TI} \quad (2. 54)$$

Donde:

$V_{1_{GLP}}$ = Volumen de GLP en fase líquida corregido a 15,56 °C y expresado en unidades de l.

V_L = Volumen de GLP en fase líquida medido con la sonda o rotogage y expresado en unidades de l.

$(FV)_{TI}$ = Factor de corrección de volumen a temperatura de 15,56°C.

Masa de GLP en fase líquida

En este punto se explica el proceso de obtención de masa en fase líquida del GLP, para lo cual se debe aclarar lo siguiente:

- a) Para el cálculo de masa se necesita de la gravedad específica para el GLP la cual es medida por la planta ENI Pifo utilizando el instrumento denominado hidrómetro (ASTM 310H), añadiéndose que con dicho instrumento de medida se toma una muestra del GLP y se puede obtener las lecturas tanto de la densidad y de temperatura del fluido según señala la planta.
- b) Es importante indicar que la gravedad específica obtenida a partir de la medición con el hidrómetro, debe ser corregida para llevarla a condiciones de temperatura estándar que tiene un valor correspondiente a 60 °F o su equivalente de 15,56°C, para lo cual la planta ENI Pifo especifica que se usa una tabla de corrección de gravedad específica (La tabla no se proporcionó con la información emitida).

Para obtener la masa del GLP líquido, se usa la ecuación 2.18 de gravedad específica para un líquido y se combina con ecuación de 2.19 densidad de líquido, finalmente se despeja la masa y se obtiene la siguiente expresión:

$$m1_{GLP} = \frac{GE_{15,56}}{15,56} * V1_{GLP} * (\rho_{Agua\ 15,56^{\circ}C})$$

Donde:

$m1_{GLP}$ = Masa del GLP en fase líquida, medido a condiciones estándar y expresado en unidades de kg.

$\frac{GE_{15,56}}{15,56}$ = Gravedad específica del GLP a temperatura estándar de 15,56 °C.

$\rho_{GLP\ 15,56^{\circ}C}$ = Densidad del GLP medida a temperatura estándar de 15,56°C, expresado en unidades de kg/l.

$\rho_{Agua\ 15,56^{\circ}C}$ = Densidad del agua medida a temperatura estándar de 15.56°C (60°F). Su valor a temperatura estándar es de 0,999016 kg/l (API 11.1, 2004).

Con el fin de describir una expresión completa para la obtención de masa del GLP, se reemplaza la ecuación 2.54 en la ecuación de obtención de masa de líquido ($m1_{GLP}$), y se obtiene:

$$m1_{GLP} = \frac{GE_{15,56}}{15,56} * VL * (FV)_{TI} * (\rho_{AGUA})$$

Con el fin de expresar la ecuación de masa en términos similares a los de la planta, se procede a incluir la siguiente igualdad:

$$m1_{GLP} = \text{Peso del GLP en fase líquida}$$

Entonces la ecuación completa de obtención de masa de GLP líquidos es:

$$\text{Peso del GLP en fase líquida} = \frac{GE_{15,56}}{15,56} * VL * (FV)_{TI} * (\rho_{AGUA}) \quad (2. 55)$$

Volumen de GLP en fase de vapor

El volumen de GLP en fase de vapor a condiciones del tanque es el resultado de la diferencia entre el volumen total del tanque y el volumen del GLP en fase líquida, lo cual puede ser expresado por la siguiente expresión:

$$V_{vap} = VT - VL \quad (2. 56)$$

Donde:

V_{vap} = Volumen de GLP en fase de vapor, presente en el tanque estacionario, expresado en unidades de l.

VT = Volumen total del tanque estacionario expresado en unidades de l.

Masa del GLP en fase de vapor

Para realizar el análisis correspondiente a la obtención de la masa en fase de vapor del GLP, se considera que el desarrollo parte desde la ley de gases reales con la ecuación 2.20 y combinada con la ecuación 2.21 de moles de gas, posteriormente se resuelve hasta despejar la masa del GLP vapor ($m_{2_{GLP}}$), entonces la expresión es:

$$m_{2_{GLP}} = P * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * (R * T)^{-1}$$

Hay que considerar que el producto de $(R * T)^{-1}$, puede ser reemplazado por una igualdad ya obtenida anteriormente y que corresponde a la ecuación 2.38.

Al producto de $(R * T)^{-1}$, se lo identifica como un factor denominado RA , que en el caso de la planta ENI Pifo, dicho factor se denomina como $(FRA)_{TI}$, entonces se hace la siguiente aclaración:

$$(R * T)^{-1} = RA = (FRA)_{TI} = \text{Factor de temperatura a la temperatura final.}$$

Posteriormente la expresión de obtención de masa en términos generales y considerando las aclaraciones anteriores, es:

$$m_{2_{GLP}} = P * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * (FRA)_{TI}$$

Es necesario considerar que la presión medida en el tanque debe convertirse a presión absoluta (P absoluta), entonces para dicho propósito se tiene que sumar la presión inicial medida o manométrica más la presión atmosférica local , lo cual se expresa mediante la ecuación 2.7, que por el momento se expresa en los siguientes términos:

$$P_{absoluta} = P_{man} + P_{atm\ local}$$

Donde:

$P_{absoluta}$ = Presión absoluta expresada en unidades de atm.

P_{man} = Presión manométrica medida inicialmente en el tanque en unidades de psi, posteriormente convertida a unidades de atm.

$P_{atm\ local}$ = Presión atmosférica local en la planta, considerándose que el valor es 1 atm.

Para disponer de términos similares a los de la planta ENI Pifo, se aclara que:

$P_{absoluta} = P_I$ = Presión inicial medida (manométrica) + 1 atmósfera. Este valor está expresado en atm absolutas.

Posteriormente la presión absoluta se expresa con la siguiente expresión:

$$P_I = P_{manométrica} + 1atm \quad (2. 57)$$

Con el conocimiento de las equivalencias de las fórmulas descritas, entonces en términos generales la fórmula de obtención de la masa se puede expresar como:

$$m_{2_{GLP}} = P_I * V * PM_{GLP} * \frac{1}{Z} * (FRA)_{TI}$$

Finalmente para expresar la ecuación con todos los términos que la planta considera, se toman en cuenta las siguientes igualdades:

$m_{2_{GLP}} = \text{Peso del GLP en fase gaseosa}$ = Masa del GLP en estado de vapor, expresado en unidades de kg.

$PM_{GLP} = P M$ = Peso molecular del GLP, expresado en unidades de kg/mol.

$V = V_{vap}$ = Volumen de GLP en estado de vapor, expresado en litros

De esta manera para la obtención de masa de GLP en fase de vapor, en unidades de kg y con los términos especificados, corresponde a una expresión que además incluye la equivalencia de V_{vap} representada por la ecuación 2.56, entonces la expresión completa de obtención de masa de GLP vapor es:

$$\text{Peso del GLP en fase gaseosa} = P_I * (VT - VL) * PM * \frac{1}{Z} * (FRA)_{TI} \quad (2. 58)$$

2.4.CÁLCULO DE PORCENTAJES DE ERROR

Es necesario un análisis de porcentaje de error entre los valores finales de masa proporcionados por cada planta de almacenamiento y envasado de GLP y los

valores calculados con el método que dio los resultados más adecuados y que es el considerado como estandarizado, descrito en el numeral 2.2.2 de este capítulo, esto con el fin de determinar si los valores obtenidos con el método se aproximan a los valores reportados por las plantas y si son confiables, entonces se procede a realizar los cálculos por cada tanque en planta, aplicando la expresión:

$$\%error = \frac{|valor\ aprox - valor\ real|}{|valor\ real|} * 100 \quad (2. 59)$$

Donde:

valor aprox = Valor aproximado, corresponde al valor de masa total de GLP en kg que se obtiene con el método descrito en el numeral 2.2.2 de este capítulo.

valor real = Valor real, corresponde al dato de masa total de GLP en kg que reporta cada planta con su método.

Es importante indicar que los datos de kg de GLP en cada tanque con el método que usa cada planta, fueron extraídos de actas de toma física de stocks de GLP y gas natural proporcionadas por la ARCH el 01-10-2018, además los datos adicionales para los cálculos con el método estandarizado fueron medidos en cada planta.

2.4.1. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ECOGAS SALCEDO.

Se describe de forma resumida en la tabla 2.8 los resultados de los porcentajes de error obtenidos, también se muestra en la figura 2.1, la representación de los kg descritos por la planta y los valores obtenidos con el método aplicado, por último la representación gráfica de los porcentajes de error se muestra en la figura 2.2. Los cálculos completos y detallados para cada uno de los tanques estacionarios correspondientes a la planta Ecogas Salcedo se muestran en el ANEXO 7.

Tabla 2.8. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ECOGAS SALCEDO

| TANQUE | KG CON MÉTODO EN PLANTA | KG CON MÉTODO ESTANDARIZADO | % ERROR |
|--------|-------------------------|-----------------------------|---------|
| TE-1 | 50872 | 51727,300 | 1,68 |
| TE-2 | 17114 | 17019,570 | 0,55 |
| TE-3 | 35555 | 35449,758 | 0,29 |
| TA-1 | 34700 | 36700,813 | 5,77 |
| TA-2 | 36562 | 34314,395 | 6,15 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

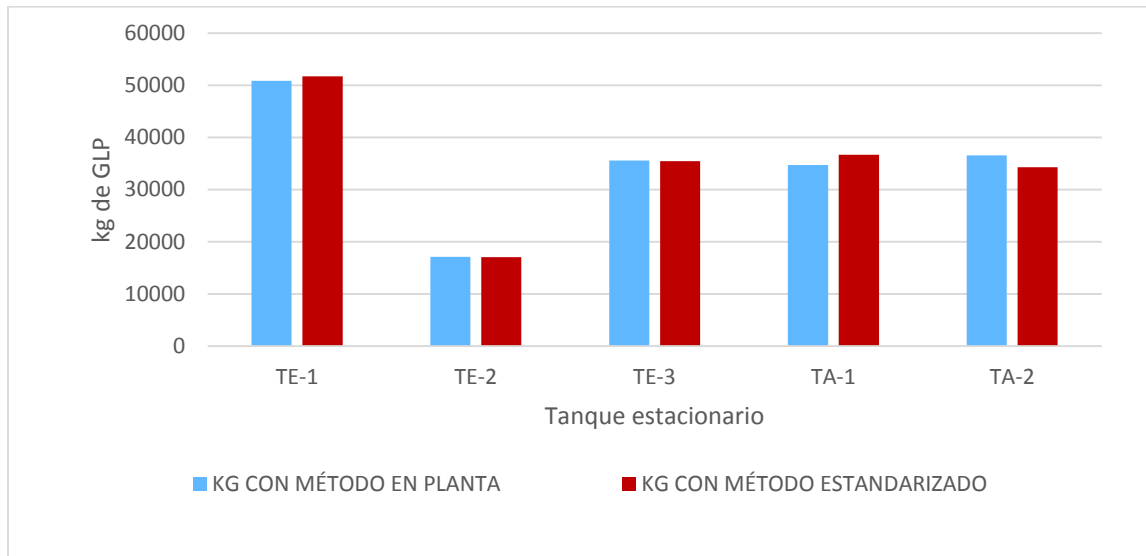


Figura 2.1. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA ECOGAS SALCEDO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

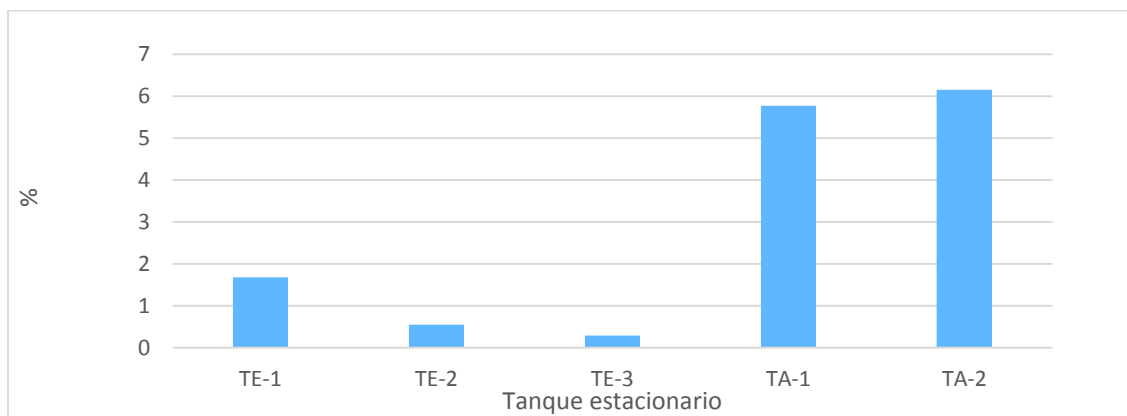


Figura 2.2. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA ECOGAS SALCEDO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

2.4.2. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA DURAGAS PIFO

Al igual que en la planta anterior, a continuación se describe en la tabla 2.9 en forma resumida los resultados de los porcentajes de error obtenidos, además la representación de los kg obtenidos con el método se muestra en la figura 2.3 y una representación gráfica de los porcentajes de error se muestra en la figura 2.4. Los cálculos completos y detallados para cada uno de los tanques estacionarios correspondientes a la planta Duragas Pifo se muestran en el ANEXO 7.

Tabla 2.9. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA DURAGAS PIFO

| TANQUE | KG CON MÉTODO EN PLANTA | KG CON MÉTODO ESTANDARIZADO | % ERROR |
|--------|-------------------------|-----------------------------|---------|
| D-23 | 44255 | 44424,634 | 0,38 |
| D-19 | 45106 | 45230,982 | 0,28 |
| D-20 | 36087 | 36135,294 | 0,13 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarbúfero, 2018.

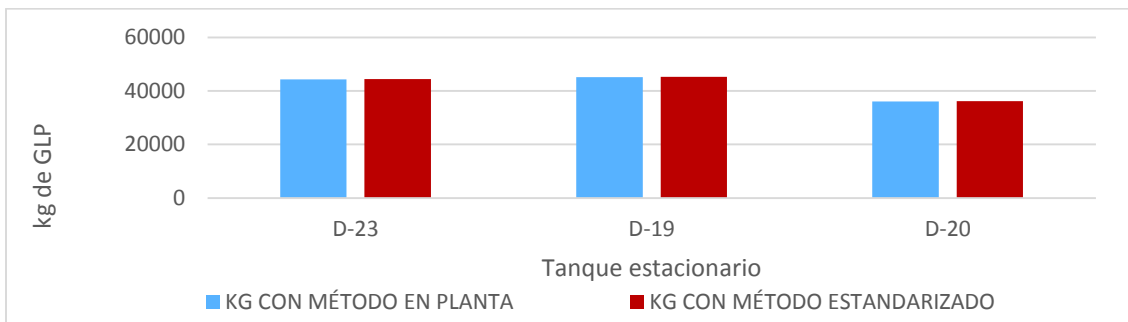


Figura 2.3. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA DURAGAS PIFO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.



Figura 2.4. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA DURAGAS PIFO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

2.4.3. RESUMEN DE CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ENI PIFO

De forma similar a las plantas anteriores, a continuación se presenta de forma resumida los resultados de los porcentajes de error en la tabla 2.10, además en la figura 2.5 se muestra los kg obtenidos con el método, se tiene también en la figura 2.6 una representación gráfica de los porcentajes de error calculados. Se aclara que los cálculos completos y detallados para cada uno de los tanques estacionarios correspondientes a la planta ENI Pifo se muestran en el ANEXO 7 del presente trabajo.

Tabla 2.10. CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR PARA PLANTA ENI PIFO

| TANQUE | KG CON MÉTODO EN PLANTA | KG CON MÉTODO ESTANDARIZADO | % ERROR |
|--------|-------------------------|-----------------------------|---------|
| TEP-01 | 39563 | 39605,835 | 0,11 |
| TEP-02 | 35166 | 35185,490 | 0,06 |
| TEP-03 | 36079 | 36071,368 | 0,02 |
| TEP-04 | 22326 | 20686,212 | 7,34 |
| TEP-05 | 22459 | 22442,436 | 0,07 |
| TEP-06 | 35672 | 35659,286 | 0,04 |
| TEP-07 | 36575 | 36511,723 | 0,17 |
| TEP-08 | 36366 | 36385,801 | 0,05 |
| TEP-09 | 49161 | 45559,310 | 7,33 |
| TEP-10 | 52435 | 49407,236 | 5,77 |
| TEP-11 | 51395 | 51307,462 | 0,17 |
| TEP-12 | 52029 | 52240,326 | 0,41 |

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

FUENTE: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2018.

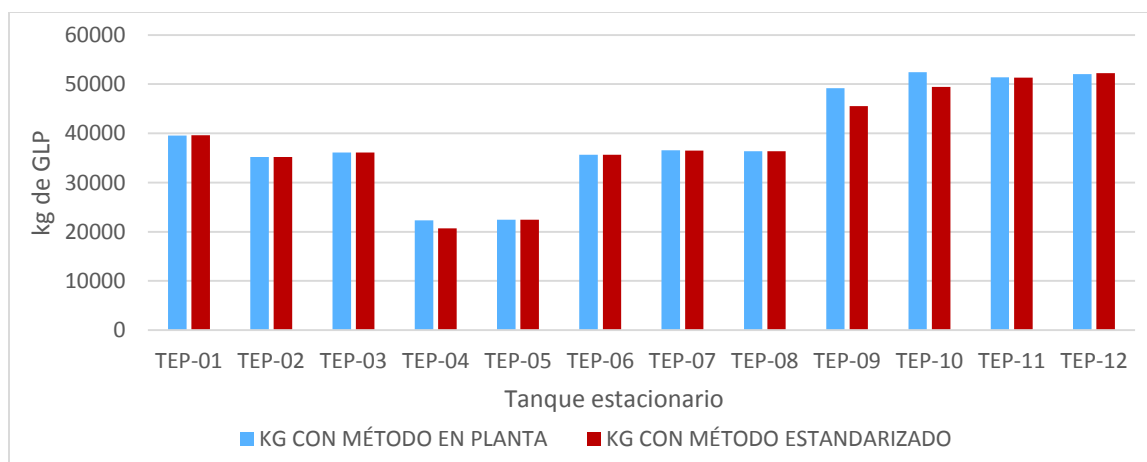


Figura 2.5. VALORES DE MASA DE GLP OBTENIDOS CON MÉTODOS DE PLANTA ENI PIFO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

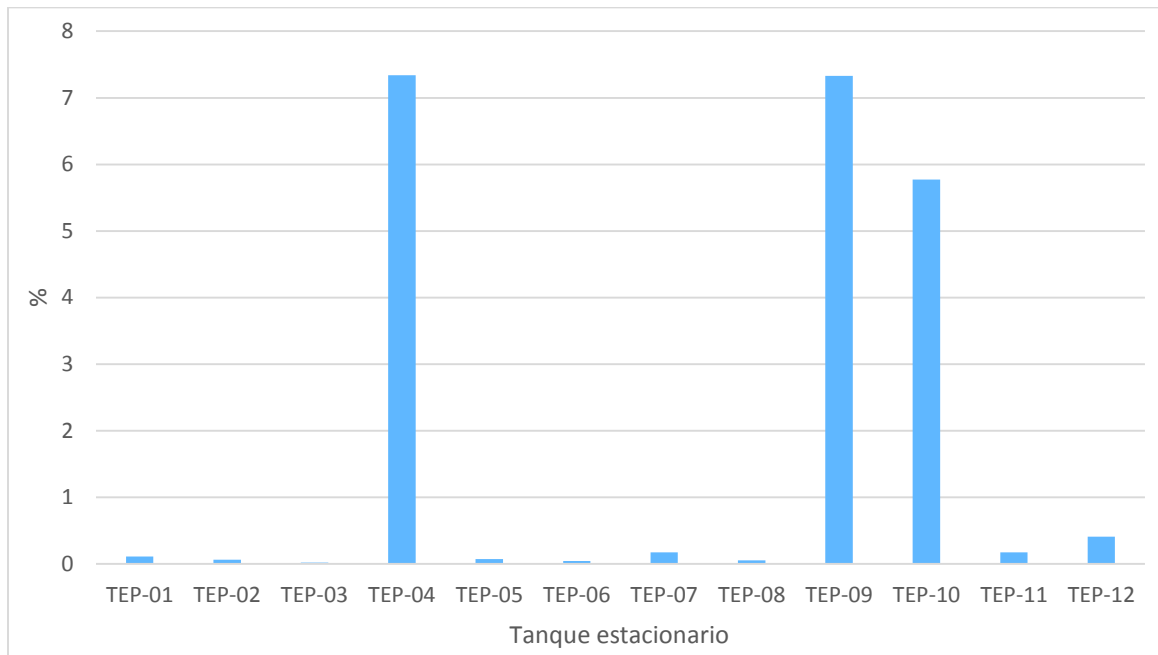


Figura 2.6. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS DE PLANTA ENI PIFO Y EL ESTANDARIZADO

ELABORADO POR: Arias, R., 2018.

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS Y ESTRUCTURACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LAS PLANTAS CONSIDERADAS

3.1.1. RESULTADOS EN LA PLANTA ECOGAS SALCEDO

Al comparar la ecuación 2.36 obtenida del análisis de la masa en fase líquida del GLP con la expresión 2.31 proporcionada por la planta, se puede identificar lo siguiente:

- La ecuación 2.36, incluye el valor de la densidad del GLP, el cual no se toma en cuenta en la expresión 2.31 de que aplica la planta, sino que considera que en su lugar debería ir la gravedad específica del GLP (G.E), lo cual es incorrecto debido a que las unidades que la planta indica corresponden a densidad y no a gravedad específica puesto que será un dato adimensional.
- Se aclara que la obtención de la gravedad específica por parte de la planta debería realizarse siempre con el uso de un termo densímetro, sin embargo se identifica en la hoja de cálculo que se utiliza un valor constante de gravedad para todos los tanques lo cual es incorrecto, además dicha gravedad no está corregida a temperatura estándar para el uso en la tabla de obtención del factor de corrección de temperatura, lo cual ocasionará una variación en los resultados.

En cuanto al análisis de la masa en fase vapor del GLP, se puede comparar la ecuación 2.40 obtenida del análisis desarrollado, con la expresión 2.32 descrita por la planta y se puede identificar los siguientes puntos:

- La expresión 2.32 para el cálculo de la masa del GLP en fase de vapor descrita por la planta, no incluye el factor de compresibilidad z o bien lo toma como un valor ideal que equivale a 1, lo cual dará una variación significativa en el resultado final.

- Es importante indicar que la expresión que proporciona la planta incluye un factor denominado RA, el cual corresponde al producto entre $(R * T)^{-1}$, obtenido al aplicar propiedades de gas y la constante universal de los gases, por lo que se pudo demostrar que no corresponde a un factor sino a una agrupación de propiedades de gas que da como resultado la ecuación 2.38.
- Se aclara que el factor de presión FP que describe la planta, corresponde al proceso de cálculo de la presión absoluta en unidades de atm representado por la ecuación 2.39, además se comprobó que en la fórmula de FP, la presión del gas medida en el tanque estacionario debe ser ingresada en unidades de kgf/cm², y no en unidades de Bar (Bares), como indica la expresión proporcionada por la planta.
- Es necesario indicar que en lo que se refiere a la obtención de la presión absoluta, como se sabe es el resultado de la suma entre la presión manométrica y la presión atmosférica local, por lo que en el método que utiliza la planta, el dato de presión atmosférica empleado es de 1 atm = 1,03323 kgf/cm² que es un valor ideal, y no representa en realidad la presión local, la cual debe medirse usando un barómetro en el sitio donde está ubicada la planta, entonces el resultado de la presión absoluta debe variar.
- Se aclara que la expresión CTE = 0,001 que se incluye en la expresión 2.32 proporcionada por la planta, se obtiene como resultado de conversiones de unidades para al final obtener la masa del GLP en fase de vapor en unidades de kg. Es importante entonces tomar en cuenta que el valor proporcionado por la planta es 0,0001 lo cual es incorrecto y sería un cambio de unidades diferente.

3.1.2. RESULTADOS EN LA PLANTA DURAGAS PIFO

Al concluirse el análisis de la expresión 2.43 de obtención de masa de fase líquida del GLP descrita por la planta, se pudo identificar que el proceso empleado hasta el momento se ha desarrollado correctamente, es decir, la planta aplica las propiedades correctas.

En lo que se refiere al proceso de análisis de la fase de vapor de GLP, se realiza una comparación entre la expresión 2.45 proporcionada por la planta y la ecuación 2.50 estructurada, de esta manera se identifican los siguientes puntos:

- Al igual que en el análisis de la planta Ecogas Salcedo, en la expresión para el cálculo de la masa del GLP en fase de vapor descrita por la Planta Duragas Pifo, el factor de compresibilidad z no es considerado o lo toma como un valor ideal que equivale a 1.
- Se aclara que el factor de presión FP que describe la planta Duragas Pifo, corresponde al proceso de cálculo de la presión absoluta, que además incluye la respectiva conversión de unidades de presión manométrica inicialmente medida en psi, hasta la obtención del resultado final en unidades de atm absolutas usando la ecuación 2.49, que además incluye las unidades de conversión completas.
- Es importante aclarar que en la obtención de la presión absoluta, el dato aplicado de presión atmosférica local que actualmente se usa en la planta Duragas Pifo es un valor ideal de 1 atm, entonces para obtener un resultado real, el valor de la presión atmosférica se debe medir usando un barómetro en el sitio donde está ubicada la planta.
- Para la obtención de $(R * T)^{-1}$, se utilizó el mismo procedimiento aplicado para la planta Ecogas Salcedo descrito con la expresión 2.38, debido a que es un proceso lógico que usa las propiedades del gas.

3.1.3. RESULTADOS EN LA PLANTA ENI PIFO.

Con respecto a la fase líquida del GLP al comparar la ecuación 2.55 con la expresión 2.51 proporcionada por la planta ENI Pifo, se puede identificar los siguientes puntos:

- La ecuación 2.55 incluye el valor de la densidad del agua, el cual no se toma en cuenta en la expresión 2.51 de la planta y será un valor importante a considerarse para la debida simplificación de unidades y obtener el resultado final de la masa de GLP en fase líquida en unidades de kg, sin embargo podría omitirse el valor de la densidad del agua y la gravedad específica del GLP en el caso en que se disponga del valor de densidad

del GLP en unidades de kg/l y se aplicaría un proceso similar al de Ecogas Salcedo para la obtención de la masa de GLP en fase líquida, pero debido a que la planta ENI Pifo no proporcionó suficiente información para el análisis correspondiente no se puede justificar esta afirmación.

- La planta ENI Pifo especifica que, en su procedimiento se aplica una tabla de corrección de gravedad específica para llevarla a la temperatura de 15,56°C (60°F), sin embargo dicha tabla no se incluyó en la información proporcionada por lo que, no existe un justificativo de la veracidad de la aplicación de misma.
- La planta ENI Pifo especifica que, su procedimiento incluye el uso de una tabla para la obtención del factor $(FV)_{TI}$. Sin embargo dicha tabla no se incluyó en la información proporcionada por lo que, no existe un justificativo de la aplicación correcta de dicha tabla.

Continuando con el proceso de análisis de la fase de vapor del GLP, se realiza una comparación entre la expresión 2.52 proporcionada por la planta ENI Pifo y la ecuación 2.58 estructurada, para lo cual se consideran los siguientes puntos:

- Al igual que en el análisis de la plantas Ecogas Salcedo y Duragas Pifo, en la expresión para el cálculo de la masa del GLP en fase de vapor descrita por la planta ENI Pifo, no se incluye el factor de compresibilidad z porque no lo consideran o lo toman como un valor ideal que equivale a 1.
- Se aclara que la obtención de P_i que describe la planta ENI Pifo, corresponde al proceso de cálculo de la presión absoluta, que se expresa en atm absolutas.
- Es importante aclarar que el valor de la presión atmosférica se debe medir usando un barómetro en el sitio donde está ubicada la planta, ya que el valor usado actualmente es ideal equivalente de 1 atm.
- La planta ENI Pifo, no justifica cual es el procedimiento que se aplica en la obtención del peso molecular del GLP.
- Se aclara que la expresión que representa al factor $(FRA)_{TI}$, no fue proporcionada por la planta ENI Pifo, sin embargo, la ecuación fue deducida tomando en cuenta la definición de la constante de los gases y

propiedades de un gas, realizando el mismo proceso aplicado en la planta Ecogas Salcedo y que está representado por la ecuación 2.38.

3.2. CONSIDERACIONES PARA LA ESTANDARIZACIÓN DE UN MÉTODO DE CÁLCULO DE MASA DE GLP

Al revisarse los métodos de cálculo de masa de GLP descritos en el capítulo 2, entonces corresponde estandarizar un solo método a usarse en todas las plantas de almacenamiento y envasado de GLP para determinar la cantidad de kg del producto presente en los tanques estacionarios.

Adicionalmente el método a estandarizarse debe presentar un sustento bibliográfico adecuado, además de su facilidad de uso para procesos de fiscalización, por lo que se deben tomar en cuenta ciertos parámetros de análisis y finalmente concluir cual es mejor método entre los 2 descritos para el cálculo de la masa de GLP.

Entonces a continuación se detalla los parámetros para justificar la elección del método más adecuado, así se tiene que:

- El método de cálculo de masa detallado en el numeral 2.2.1, que se denominó aplicación 1, involucra en su proceso la necesidad de usar la composición del GLP y sus fracciones molares para la obtención del peso molecular, lo cual conlleva a la dificultad de obtención de dichos datos debido a que es necesario un análisis de laboratorio para este fin, además se requiere de muestras de GLP de todas las refinerías a nivel nacional, puesto que el producto que se envasa en cada planta, es una mezcla de GLP de diferentes refinerías además se le adiciona GLP importado para satisfacer la demanda del mercado.

Entonces no resulta factible la aplicación de este método en todas las plantas debido a que solo se dispone para este trabajo la composición de GLP del complejo industrial de Shushufindi.

- Es importante mencionar que el método de cálculo de masa denominado aplicación 1 involucra además que en el cálculo de la fase de vapor, se requiera la obtención del factor de desviación “z”, lo cual se dificulta debido

a que es indispensable la composición del GLP para obtener las propiedades pseudoreducidas de la mezcla de hidrocarburos, adicionalmente para este caso se requiere del uso de una gráfica extendida para obtener el valor de “z” debido a que los valores de estas propiedades son muy bajos para ser ingresados en una gráfica común.

Entonces al no disponerse de una gráfica extendida de “z”, se aplica otro proceso que involucra su obtención mediante fracciones molares de cada compuesto y se incluyen los valores de “z” para cada componente a condiciones estándar, sin embargo resultaría un valor aproximado pero no válido ya que, como se mencionó anteriormente se requiere la información de todo el GLP producido a nivel nacional en todas las refinerías.

- Por otra lado el método de obtención de masa de GLP descrito en el numeral 2.2.2 denominado aplicación 2, usa propiedades de líquido y el equivalente del vapor en líquido, esto facilita los cálculos debido a que al incluir la conversión del vapor a líquido se evita el uso de la ley de gases reales con las respectivas propiedades que involucra.
- Otro dato importante es que el método de obtención de masa de GLP denominado aplicación 2, facilita su procedimiento debido a que usa para sus cálculos únicamente la densidad del GLP a 60°F en estado líquido y los volúmenes en fase líquida por lo que es un proceso más simplificado de cálculo y aplicable con los datos que se disponen.

Una vez considerados los parámetros anteriores y debido a la dificultad de obtención de todos los datos para el uso de la aplicación 1, se descarta dicho método y se concluye que el método más adecuado para la obtención de masa de GLP es la aplicación 2, que en adelante corresponde al método que será estandarizado y recomendado para su uso en procesos de fiscalización para la obtención de kg de GLP almacenados en tanques estacionarios.

3.3.COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE MASA EMPLEADOS EN PLANTAS Y EL MÉTODO ESTANDARIZADO

En esta sección es de importancia destacar cuales son las falencias existentes en los métodos de cálculo empleados actualmente por las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas para este trabajo, esto servirá para comparar con el método estructurado en base a la norma API 14.8, y así justificar porque es más conveniente el uso de este método estandarizado, por lo tanto se describen los siguientes puntos generales:

- El método estandarizado para el cálculo de masa de GLP, no requiere de la composición del GLP para sus cálculos ya que no se utiliza la fase de vapor para la obtención de kg, posteriormente al analizar los métodos de cálculos en todas las plantas, se verificó que la composición del GLP sería necesaria para la obtención del peso molecular aplicado en la obtención de masa en fase de vapor, sin embargo se identificó que esta aplicación no se realiza ya que se emplea una tabla de pesos moleculares vs gravedad específica sin la debida justificación para su uso y sin considerar todos los hidrocarburos que componen al GLP que está almacenado.
- El método estandarizado para el cálculo de masa de GLP, emplea tablas de corrección de gravedad específica y de corrección de volumen líquido a 60°F exclusivas para GLP y basadas en normativa ASTM D 1250-80, que al compararse con las tablas que usan las plantas se verificó que; en el caso de Duragas Pifo las tablas que usan son aplicables para todos los productos refinados del crudo y no exclusivamente para GLP; en el caso de Ecogas Salcedo solo se usan tablas de corrección volumétrica que no tienen una justificación de su procedencia, además se utiliza un valor constante de gravedad específica corregida para todos sus tanques; por último en la planta ENI Pifo, no se tiene una justificación del uso de tablas puesto que la información completa no fue proporcionada.
- Es importante indicar que en todos los métodos de cálculo usados en las plantas se identificó que, para la fase líquida no se considera la densidad

del agua a 60°F y para la fase de vapor tampoco se considera el factor de desviación (z); todos estos parámetros son de consideración en el método estandarizado de cálculo de masa.

Con los puntos generales descritos se comprueba que debido a las inconsistencias y falencias identificadas en los métodos usados en plantas, lo más factible es el uso del método de cálculo de masa estandarizado.

3.4. RESULTADOS DE PORCENTAJES DE ERROR EN LAS PLANTAS CONSIDERADAS

3.4.1. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ECOGAS SALCEDO

En lo referente a los resultados mostrados al obtener los porcentajes de error para cada uno de los tanques, se nota que los valores o capacidades obtenidas con el método estandarizado al momento presentan valores en kg muy cercanos a los que obtiene la planta con su método lo que se ve reflejado en la figura 2.1, además se puede notar que se tiene un error bajo en los tanques ; con porcentajes que varían desde 0,29% hasta un máximo de 6,15 % lo cual se encuentra representado en la figura 2.2, notándose que en 2 de los tanques se presenta errores alejados a la tendencia de los otros pues corresponden a valores de 5,77% y 6,15% lo cual indica que estos errores pueden deberse a que estos tanques o los aparatos de medida instalados estén descalibrados, lo que proporciona una lectura errónea de los valores iniciales para el cálculo, sin embargo en general los porcentajes de error son bajos, lo cual indica que el método estandarizado proporciona valores confiables y puede ser aplicado sin problemas en esta planta.

3.4.2. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA DURAGAS PIFO.

Los resultados de las capacidades en kg obtenidas con el método estandarizado en los tanques de esta planta presentan valores similares a los que proporciona el método que usa la planta, lo cual se puede notar en la figura 2.3, además se puede destacar que los porcentajes de error obtenidos en esta planta son muy bajos comparados con la planta anterior, pues en el caso de la planta Duragas Pifo los valores de error están entre 0,13% hasta un máximo de 0,38% que se

distingue mediante la figura 2.4 todo lo cual indica que, el método estandarizado proporciona resultados confiables y puede aplicarse en esta planta sin problemas.

3.4.3. RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ENI PIFO

En lo que respecta a los resultados de la capacidad en kg obtenidos en esta planta con el método estandarizado, se nota que se obtiene valores similares a los que la planta reporta con su método, lo que se puede notar revisando la figura 2.5, además se tiene valores de porcentaje de error bajos entre 0,02% hasta un máximo de 7,34% que se encuentran representados en la figura 2.6; es de importancia destacar que se tiene un caso similar al de la planta Ecogas Salcedo, pues en el caso de la planta ENI Pifo en 3 de los tanques existen errores alejados de la tendencia con valores de 5,77% ; 7,33% y 7,34% lo cual indica que, al igual que para la planta Ecogas Salcedo, los errores pueden deberse a que los tanques o los aparatos de medida instalados estén descalibrados, lo que proporciona una lectura errónea de los valores iniciales para el cálculo, sin embargo los errores para la mayoría de tanques son muy bajos considerando que en este caso se dispone de 12 tanques y solo 3 presentan una variación significativa, por lo en esta planta el método estandarizado es confiable y puede ser aplicado sin problema.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se conoce que el método de calibración volumétrico es aplicado comúnmente para tanques horizontales de forma irregular y con volúmenes de manejo grandes, además la característica principal de este método es que el proceso para aforar el tanque consiste obtener diferentes valores de volumen en función del nivel que ocupe un fluido en el tanque o en función del porcentaje de fluido presente en el tanque, esto concuerda con los valores observados en las tablas de calibración de las 3 plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas para este estudio. Por lo tanto se concluye que el método de calibración de tanques estacionarios aplicado en las plantas Ecogas Salcedo, Duragas Pifo y ENI Pifo, es el volumétrico, todo lo cual se pudo verificar en las tablas de calibración de cada tanque estacionario.
- El procedimiento de cálculo volumétrico de GLP almacenado en tanques estacionarios descrito en la Norma API 14.8, detalla la obtención del volumen en condiciones estándar en cada fase dentro del tanque como son líquido y vapor, identificándose que en la fase líquida interviene un factor de conversión de volumen a condiciones estándar y que para la fase de vapor el volumen previamente debe ser convertido a condiciones estándar y posteriormente se aplica un factor de conversión(transformación) del volumen de vapor en su equivalente en líquido, esto con el propósito de sumar los volúmenes en una sola fase.

En este punto si se considera que el volumen en la fase de vapor no se encuentra a condiciones estándar, puede ser multiplicado también por un factor de conversión que al mismo tiempo lo transforme en condiciones estándar y en su equivalente en líquido. Por lo tanto se concluye que este último proceso de conversión directa del volumen de GLP vapor a su equivalente en líquido y a condiciones estándar es el de mayor

conveniencia y el que fue aplicado en el desarrollo de este trabajo, por la disposición de la información del factor de conversión descrito en la Norma GPA 8195-95, además se pudo observar que resulta muy fácil su aplicación.

- Al evaluar los métodos de obtención de masa de todas la plantas consideradas en este trabajo, se pudo identificar que dichos métodos no justifican claramente la procedencia de sus cálculos puesto que en la información se nombran en forma general las normas técnicas pero no se detalla el número de norma aplicada ni los justificativos para la aplicación de las mismas, razón por la cual se concluye que dichos métodos no están estructurados correctamente.
- Al revisar los métodos de cálculo de masa de GLP proporcionados por cada una de las plantas consideras para este trabajo se identificó los siguientes errores en su aplicación:
 - a. Todos los métodos actualmente aplicados en las plantas involucran para el cálculo de masa en la fase de vapor la ley de gases ideales, por lo que se tendrá una variación en los resultados debido a que, al no utilizarse la ley de gases reales se omite una propiedad muy importante que es el factor de desviación “z” el cual, cambiará el valor del volumen de vapor medido y por consiguiente variará el valor de la masa cuando se apliquen los cálculos respectivos.
 - b. En cuanto a la fase líquida, en ningún método aplicado por las plantas se incluye la densidad del agua a condiciones estándar misma que es de uso en la obtención de densidad del GLP a las mismas condiciones estándar y que posteriormente debe ser usada en el cálculo de masa.
- Una vez estructurado el proceso de cálculo de volumen del GLP basado en la Norma 14.8, este proceso se incluyó en la aplicación del cálculo de masa de GLP, en donde se pudo identificar 2 aplicaciones posibles para el cálculo de masa, la primera detallada en el numeral 2.2.1 describe la aplicación usando 2 fases por separado para lo cual es necesario considerar propiedades de líquidos y la ley de gases reales, lo cual resulta en un proceso largo y complicado al no disponerse de todos los datos necesarios

para el cálculo de la fase de vapor, entonces la segunda aplicación considerada para el cálculo de masa y detallada en el numeral 2.2.2, implica la conversión del volumen de vapor en un equivalente en líquido, con lo cual se tiene únicamente la fase líquida y sería necesario la aplicación de propiedades únicamente en esta fase, evitándose así el cálculo de propiedades de gas real y facilitándose en gran medida los cálculos para la obtención de masa, entonces así se concluye que el método de cálculo de masa de GLP que se consideró para estandarizarse fue el que se describe en el numeral 2.2.2 por la facilidad de los cálculos, disposición de toda la información y resulta práctico el uso en todas las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas.

- Al aplicarse el método estandarizado de cálculo de masa de GLP usando datos reales de cada una de las plantas consideradas y luego de realizarse diversas pruebas, se concluyó que el método proporciona resultados válidos y muy cercanos a los que las plantas reportan por lo que, la aplicación de este método puede ser recomendable en todas las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas para este estudio.

4.2. RECOMENDACIONES

- Para identificar de forma inmediata el método de calibración de los tanques contenedores de GLP, es recomendable solicitar los certificados de calibración pertenecientes a cada tanque y corroborar que la información de los tanques se ajuste a la descripción del método de calibración.
- Debido a que la información descrita en la norma API 14.8, no detalla claramente la obtención del factor de conversión a líquido usado en la fase de vapor del GLP, es recomendable la obtención de este factor a partir de la norma Internacional GPA 8195-95, pues dicha norma describe un proceso claro y fácil para su determinación.
- Es recomendable la evaluación de los métodos de cálculo que cada planta de almacenamiento y envasado de GLP aplica actualmente en el cálculo de volumen y posteriormente para el cálculo de masa de GLP, pues esto contribuirá a que se tenga un parámetro de comparación entre los métodos de plantas y el estructurado en este trabajo.

- Es recomendable la estructuración de cada una de las ecuaciones empleadas en los métodos actualmente usados por las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas para este trabajo, pues esto permitirá identificar fácilmente los errores presentes en las ecuaciones y realizar las debidas correcciones.
- Se recomienda disponer de las debidas normas internacionales y demás bibliografía actualizada, para la justificación de la aplicación de propiedades de fluidos y de las ecuaciones consideradas en el método de cálculo de masa de GLP estandarizado.
- Es de gran importancia aplicar el método estandarizado con el uso de datos reales de cada una de las plantas de almacenamiento y envasado de GLP consideradas en este trabajo, con lo cual se verificarán que los resultados obtenidos son correctos y confiables, para de esta manera se puede recomendar el uso constante de este método en las plantas que se tomaron en cuenta.
- Se recomienda que previo al uso de los datos obtenidos en las plantas de almacenamiento y envasado de GLP , se verifique que tanto los tanques estacionarios como los instrumentos de medida que se emplean en la determinación de los datos, estén correctamente calibrados para evitar disponer de información errónea y de resultados equivocados cuando se realicen los cálculos pertinentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE “API”. (Octubre 2011). Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 14- Natural Gas Fluids Measurement. Section 8-Liquefied Petroleum Gas Measurement. U.S.A-Washington DC.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE “API”. (Mayo 2004). Manual of 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. U.S.A-Washington DC.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE “API”. (Abril 2004). Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 2.2 E - Petroleum and Liquid Petroleum Products-Calibration of Horizontal Cylindrical Tanks. Part 1: Manual Methods. U.S.A-Washington DC.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE “API”. (Abril 2004). Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 2.2 F- Petroleum and Liquid Petroleum Products-Calibration of Horizontal Cylindrical Tanks. Part 2: Internal Electro-optical Distance-ranging Method. U.S.A-Washington DC.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS “ASTM”. (1980). TABLE 33 : Specific Gravity Reduction to 60°F for Liquefied Petroleum Gases and Natural Gasoline. Designation: D 1250-80 .VOL XI-XII. USA.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS “ASTM”. (1980). TABLE 34 : Reduction of Volume to 60°F Against Specific Gravity 60/60°F for Liquefied Petroleum Gases.Designation: D 1250-80. VOL XI-XII. USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS “ASTM”. (1996).Standard Practice for Calculation of Certain Physical Properties of Liquefied Petroleum (LP) Gases from Compositional Analysis. Designation: D 2598-96. U.S.A.
- Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero “ARCH”. (2018). Archivos- Galería fotográfica y Consolidado de despachos hacia plantas de almacenamiento y envasado de GLP. Quito-Ecuador.

- Agencia Nacional de Hidrocarburos “ANH” (2017).PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA EL CÁLCULO DE VOLUMEN DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) EN TANQUES PRESURIZADOS ESTACIONARIOS. (Reglamento Técnico). Bolivia.
- Abastible S.A. (2015). Gas Licuado de Petróleo-Hoja Datos de Seguridad. Chile.
- Acosta, M. (2010). Blog: Propiedades de los fluidos: Presión Atmosférica. Recuperado de: <http://miguelfluidos.blogspot.com/2010/10/presion.html>
- Beggs, H. (1984). Gas Production Operations. U.S.A – Tulsa.
- Cengel, Y. y Boles, M. (2009).Termodinámica. México, D.F. Sexta edición.
- Craft, B. y Hawkins, H. (1968). Ingeniería Aplicada de Yacimientos Petrolíferos. E.E.U.U. Editorial Tecnos , S.A.
- Chang, R. (2002). Química. México , D.F. Séptima edición.
- Di Pelino, A., Vianco, G., Iglesias, F., Katz, P. y Daniele, M. (2002). Instituto Argentino de la Energía- Informe sobre la situación actual del Gas Licuado de Petróleo. Argentina.
- DURAGAS S.A. (2018). Información de método de cálculo de kg de GLP almacenado en tanques estacionarios. Quito-Ecuador
- ECOGAS S.A. (2018). Información de método de cálculo de kg de GLP almacenado en tanques estacionarios. Salcedo-Ecuador.
- ENI ECUADOR S.A. (2018). Información de método de cálculo de kg de GLP almacenado en tanques estacionarios. Quito-Ecuador.
- Engineered Controls International, Inc- REGO productos. (2018). Manual de Servicio para el Instalador de Gas-LP. USA.
- EQUIGAS (2017). Catálogo - Rotogages para tanques móviles y estacionarios de gran capacidad. Guatemala.
- Guato, J. y Guayasamín, J. (2014). Elaboración de Manual de Mantenimiento para tanques a presión de Almacenamiento de GLP- Proyecto de Titulación. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
- Guevara, A. y Vinueza, J. (2005). DISEÑO MECÁNICO DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO DE 16000

TONELADAS MÉTRICAS DE CAPACIDAD (Proyecto de pregrado).Escuela Politécnica del Ejército. Quito-Ecuador.

- Intertek Group plc. (2018). Calibración de Tanques. México. Disponible en: <http://www.intertek.com.mx/servicios/calibracion-tanques/>
- La Rosa, G. (2011). Optimización de la Metodología para la Calibración de Tanques Cilíndricos verticales atmosféricos para el Almacenamiento de Hidrocarburos Líquidos-Proyecto de Titulación. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima-Perú.
- Lara, G. (2012). Seguridad industrial en Planta de envasado de GLP-Proyecto de Titulación. Universidad de Guayaquil. Guayaquil-Ecuador.
- López, J. (2001). Manual de Instalaciones de GLP. CEPESA ELF GAS S.A. Madrid-España.
- MetAs y Metrólogos Asociados. (2007).Correcciones de Medición de Volumen por Método Gravimétrico. México.
- Moreno, N., Diaz, A. y Pavón, M. (2005). Calibración de tanques de petróleo. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos22/calibracion/calibracion.shtml>
- Organismo Supervisor de la Investigación en Energía y Minería “Osinermin”. (2012). El gas Natural y sus Diferencias con el GLP. Perú.
- PEMEX (2007). Hoja de Datos de Seguridad para sustancias químicas-Gas Licuado del Petróleo. México.
- Pérez, J., García, M. y Pérez H. (2004). Calibración volumétrica de tanques de Almacenamiento Verticales. México.
- Petroblogger.com. (2012). Tanques para el almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo. Disponible en: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/tanques-almacenamiento-glp/>
- Propanogas.com (2018).Diferencia entre la composición y características químicas del Propano y Butano. Recuperado de: <https://propanogas.com/faq/diferencia-propano-butano>
- PYPESA (2018). Gas LP-Catálogo de Productos. Guadalajara-México

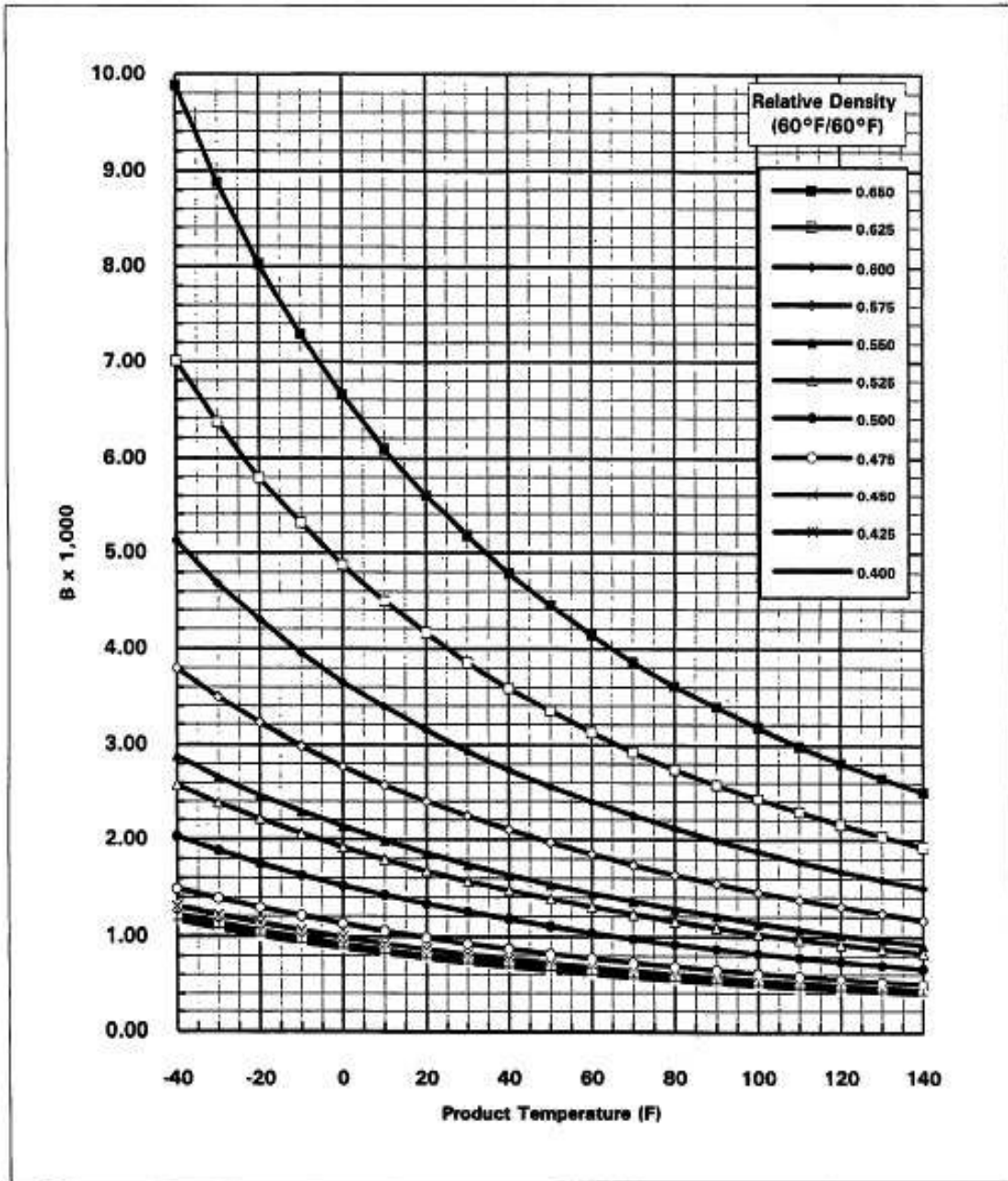
- Rodas, S. (2013).SIMULACIÓN DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO EN LA PLANTA DE GAS DE SHUSHUFINDI.(Tesis de grado).Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador.
- Salazar, V., Martinez, G. y Abad, J. (2010). Modelo para la Determinación del tamaño óptimo de un tanque estacionario de Almacenamiento de GLP Aplicado al negocio de comercialización al Granel- Artículo Académico. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador
- Sánchez, I. (2015). Determinación de un método para identificar el tamaño óptimo de la muestra en el proceso de llenado, para asegurar el correcto envasado del cilindro de gas doméstico-Tesis de Grado. Escuela Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador.
- Venegas, D. y Ayabaca, C. (2017). Instalaciones de gas licuado de petróleo para sistemas residenciales, comerciales e industriales. Editorial Académica Española. España.
- www.insa.com.co (2018). Manejo Seguro de GLP en tanques estacionarios. Disponible en: <https://docplayer.es/26246759-Manejo-seguro-de-glp-en-tanques-estacionarios.html>

ANEXOS

**ANEXO 1. GRÁFICA PARA DETERMINACIÓN DE
FACTOR B DESCRITO EN LA NORMA GPA 8195-95**

FIGURA 6.1. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE “B” CON LOS DATOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA A 60°F Y CON LA PRESIÓN ABSOLUTA DEL GLP.

Figure 6.1
B Factor Determination
(B x 1,000)

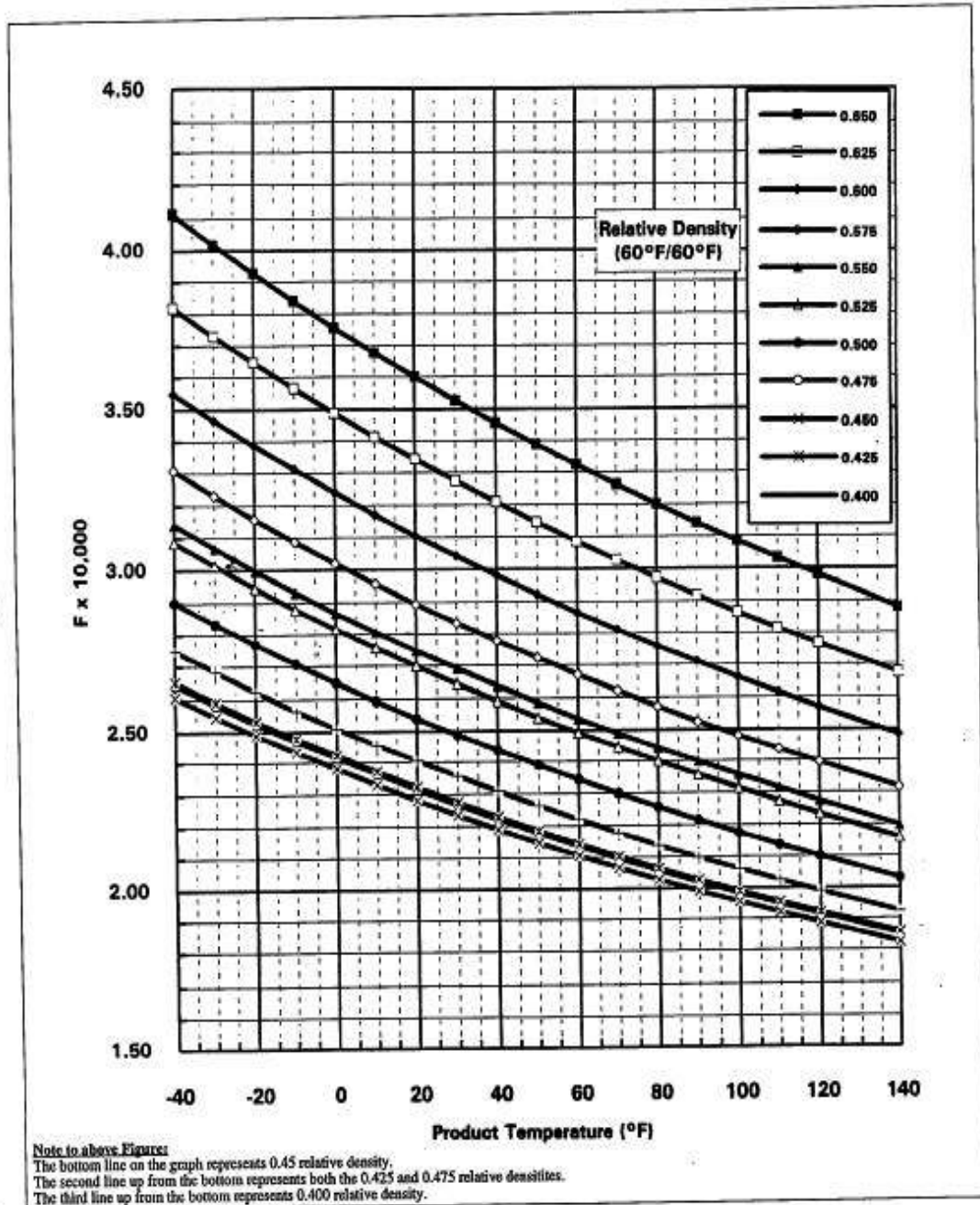


FUENTE: GPA 8195-95

**ANEXO 2. GRÁFICA PARA DETERMINACIÓN DE
FACTOR F DESCRITO EN LA NORMA GPA 8195-95**

FIGURA 6.2. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE "F" CON LOS DATOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA A 60°F Y CON LA PRESIÓN ABSOLUTA DEL GLP.

Figure 6.2
F Factor Determination
(F x 10,000)



FUENTE: GPA 8195-95

**ANEXO 3. INSTRUCCIONES DE USO DE TABLA 33
DESCRITA EN LA NORMA ASTM 1250-80**

USO DE TABLA 33 APLICADA EN LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL GLP A 60°F.

TABLE 33

SPECIFIC GRAVITY REDUCTION TO 60°F FOR LIQUEFIED PETROLEUM GASES AND NATURAL GASOLINE

This table¹ gives values of specific gravity 60/60°F of liquefied petroleum gas corresponding to specific gravities up to 0.590 observed with a glass hydrometer in a pressure vessel at temperatures other than 60°F. Also included are values for natural gasoline corresponding to specific gravities from 0.600 up to 0.650 observed with a glass hydrometer in an open cylinder at temperatures other than 60°F. The tabulated values are correct only for material containing essentially no unsaturated hydrocarbons.

The table at specific gravities 0.590 and below, as contrasted with specific gravities 0.600 and above, takes into account only the change in volume of the liquefied petroleum gas, because the change in the volume of the hydrometer was considered insignificant in comparison with the accuracy of the values for the change in volume of the liquid.

Enter this table with specific gravities to three decimal places as observed on a glass hydrometer in a pressure cylinder and with temperatures measured to the nearest 1°F.

EXAMPLE

If the specific gravity observed on a hydrometer in a liquefied petroleum gas sample confined in a pressure vessel at 86.5°F is 0.5855, what is its specific gravity 60/60°F?

Enter the table in the column for "Observed Specific Gravity" headed 0.580, and note that against an "Observed Temperature" of 87°F, the corresponding specific gravity 60/60°F is 0.597
Likewise, note that for 0.590 specific gravity opposite 87°F, the corresponding specific gravity 60/60°F is 0.606
This represents an increase of 0.009 in specific gravity 60/60°F for an increase of 0.010 in the observed value. Therefore, by simple proportion, an increase in the specific gravity value noted at 87°F from 0.580 to 0.5855 increases the corresponding specific gravity 60/60°F by $0.0055 \times 0.009 \div 0.010$, or 0.005
Then, the specific gravity 60/60°F corresponding to the observed specific gravity of 0.5855 at 86.5°F is $0.597 + 0.005$, or 0.602

¹ Values given in this table are identical with those in Table 23 below specific gravity 0.600, while those of specific gravity 0.600 and above are rounded values from Table 23. This table has been arranged here for the convenience of the American liquefied petroleum gas and natural gasoline industries.

**ANEXO 4. INSTRUCCIONES DE USO DE LA TABLA 34
DESCRITA EN LA NORMA ASTM 1250-80**

USO DE TABLA 34 APLICADA EN LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICA A 60°F PARA EL GLP EN ESTADO LÍQUIDO.

ASTM D1250 VOL*XI/XII 80 ■ 0759510 0020521 7 ■

TABLE 34

REDUCTION OF VOLUME TO 60°F AGAINST SPECIFIC GRAVITY 60/60°F FOR LIQUEFIED PETROLEUM GASES

This table¹ gives factors for converting volumes of liquefied petroleum gases observed at temperatures other than 60°F for values of specific gravity in the range from 0.495 to 0.604. The tabulated values are correct only for material essentially free of unsaturated hydrocarbons.

It is emphasized that the volume correction factors in this table make no allowance for the thermal expansion of tanks or other types of containers.

Enter this table with specific gravities at 60/60°F to three decimal places and volumes measured at Fahrenheit temperatures to the nearest 1°F.

EXAMPLE

What is the volume at 60°F of 7857 gal at 75°F of a liquefied petroleum gas whose specific gravity 60/60°F is 0.543?

Enter the table in the column for "Specific Gravity 60/60°F" headed 0.535 to 0.544 (which includes the value 0.543) and note that against an "Observed Temperature" of 75°F the factor is 0.979

Hence, 7857 gal of liquid at 75°F having a specific gravity 60/60°F of 0.543 occupy a volume at 60°F of 7857×0.979 , or 7692 gal

¹Values given in this table are identical with those in TABLE 24 for the value which matches the midpoint of the ranges shown in the above table. The column headed 0.595 to 0.604 specific gravity was taken from the four-decimal-place column of data for 0.600 specific gravity and rounded to three decimal places. This table has been arranged here for the convenience of the American liquefied petroleum gas industry.

**ANEXO 5. TABLA 33 EXTRAIDA DE LA NORMA ASTM
1250-80**

TABLA 33. DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL GLP A 60°F, A PARTIR DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y TEMPERATURA OBTENIDAS CON EL DENSÍMETRO.

| | | Table 33 Specific Gravity Reduction to 60°F | | | | | | | | 0.490 to 0.570 30 to 60°F |
|-----------------------------------|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| Observed Temperature, deg F | Observed Specific Gravity | | | | | | | | | |
| | 0.490 | 0.500 | 0.510 | 0.520 | 0.530 | 0.540 | 0.550 | 0.560 | 0.570 | |
| | Corresponding Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | | | |
| 30 | — | — | 0.484 | 0.495 | 0.506 | 0.517 | 0.528 | 0.539 | 0.550 | |
| 31 | — | — | 0.485 | 0.496 | 0.507 | 0.518 | 0.529 | 0.540 | 0.550 | |
| 32 | — | — | 0.486 | 0.497 | 0.508 | 0.519 | 0.530 | 0.540 | 0.551 | |
| 33 | — | — | 0.487 | 0.498 | 0.509 | 0.520 | 0.531 | 0.541 | 0.552 | |
| 34 | — | — | 0.488 | 0.499 | 0.509 | 0.520 | 0.531 | 0.542 | 0.553 | |
| 35 | — | — | 0.488 | 0.499 | 0.510 | 0.521 | 0.532 | 0.543 | 0.553 | |
| 36 | — | — | 0.489 | 0.500 | 0.511 | 0.522 | 0.533 | 0.543 | 0.554 | |
| 37 | — | — | 0.490 | 0.501 | 0.512 | 0.523 | 0.533 | 0.544 | 0.555 | |
| 38 | — | — | 0.491 | 0.502 | 0.512 | 0.523 | 0.534 | 0.545 | 0.556 | |
| 39 | — | — | 0.492 | 0.503 | 0.513 | 0.524 | 0.535 | 0.545 | 0.556 | |
| 40 | — | 0.483 | 0.493 | 0.504 | 0.514 | 0.525 | 0.536 | 0.546 | 0.557 | |
| 41 | — | 0.484 | 0.494 | 0.505 | 0.515 | 0.526 | 0.537 | 0.547 | 0.557 | |
| 42 | — | 0.485 | 0.495 | 0.506 | 0.516 | 0.527 | 0.537 | 0.547 | 0.558 | |
| 43 | — | 0.485 | 0.496 | 0.506 | 0.517 | 0.527 | 0.538 | 0.548 | 0.559 | |
| 44 | — | 0.486 | 0.497 | 0.507 | 0.517 | 0.528 | 0.539 | 0.549 | 0.559 | |
| 45 | — | 0.487 | 0.497 | 0.508 | 0.518 | 0.529 | 0.539 | 0.550 | 0.560 | |
| 46 | — | 0.488 | 0.498 | 0.509 | 0.519 | 0.530 | 0.540 | 0.550 | 0.561 | |
| 47 | — | 0.489 | 0.499 | 0.510 | 0.520 | 0.530 | 0.541 | 0.551 | 0.561 | |
| 48 | — | 0.489 | 0.500 | 0.510 | 0.520 | 0.531 | 0.542 | 0.552 | 0.562 | |
| 49 | — | 0.490 | 0.501 | 0.511 | 0.521 | 0.532 | 0.542 | 0.553 | 0.563 | |
| 50 | 0.480 | 0.491 | 0.502 | 0.512 | 0.522 | 0.533 | 0.543 | 0.553 | 0.563 | |
| 51 | 0.481 | 0.492 | 0.503 | 0.513 | 0.523 | 0.533 | 0.544 | 0.554 | 0.564 | |
| 52 | 0.482 | 0.493 | 0.504 | 0.514 | 0.524 | 0.534 | 0.544 | 0.554 | 0.564 | |
| 53 | 0.483 | 0.494 | 0.504 | 0.515 | 0.525 | 0.535 | 0.545 | 0.555 | 0.565 | |
| 54 | 0.484 | 0.494 | 0.505 | 0.515 | 0.525 | 0.536 | 0.546 | 0.556 | 0.566 | |
| 55 | 0.485 | 0.495 | 0.506 | 0.516 | 0.526 | 0.536 | 0.546 | 0.557 | 0.567 | |
| 56 | 0.486 | 0.496 | 0.507 | 0.517 | 0.527 | 0.537 | 0.547 | 0.557 | 0.567 | |
| 57 | 0.487 | 0.497 | 0.507 | 0.518 | 0.528 | 0.538 | 0.548 | 0.558 | 0.568 | |
| 58 | 0.488 | 0.498 | 0.508 | 0.518 | 0.529 | 0.539 | 0.549 | 0.559 | 0.569 | |
| 59 | 0.489 | 0.499 | 0.509 | 0.519 | 0.529 | 0.539 | 0.549 | 0.559 | 0.569 | |
| 60 | 0.490 | 0.500 | 0.510 | 0.520 | 0.530 | 0.540 | 0.550 | 0.560 | 0.570 | |

FUENTE: ASTM 1250-80

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 33

Table 33
0.490 to 0.570
60 to 90°F
Specific Gravity Reduction to 60°F

| Observed Temperature, deg F | Observed Specific Gravity | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.490 | 0.500 | 0.510 | 0.520 | 0.530 | 0.540 | 0.550 | 0.560 | 0.570 |
| | Corresponding Specific Gravity 60 / 60°F | | | | | | | | |
| 60 | 0.490 | 0.500 | 0.510 | 0.520 | 0.530 | 0.540 | 0.550 | 0.560 | 0.570 |
| 61 | 0.491 | 0.501 | 0.511 | 0.521 | 0.531 | 0.541 | 0.551 | 0.561 | 0.571 |
| 62 | 0.492 | 0.502 | 0.512 | 0.522 | 0.532 | 0.541 | 0.551 | 0.561 | 0.571 |
| 63 | 0.493 | 0.503 | 0.513 | 0.522 | 0.532 | 0.542 | 0.552 | 0.562 | 0.572 |
| 64 | 0.494 | 0.504 | 0.513 | 0.523 | 0.533 | 0.543 | 0.553 | 0.563 | 0.573 |
| 65 | 0.494 | 0.504 | 0.514 | 0.524 | 0.534 | 0.544 | 0.554 | 0.564 | 0.573 |
| 66 | 0.495 | 0.505 | 0.515 | 0.525 | 0.535 | 0.544 | 0.554 | 0.564 | 0.574 |
| 67 | 0.496 | 0.506 | 0.516 | 0.526 | 0.535 | 0.545 | 0.555 | 0.565 | 0.575 |
| 68 | 0.497 | 0.507 | 0.517 | 0.526 | 0.536 | 0.546 | 0.556 | 0.566 | 0.576 |
| 69 | 0.498 | 0.508 | 0.518 | 0.527 | 0.537 | 0.547 | 0.557 | 0.566 | 0.576 |
| 70 | 0.499 | 0.509 | 0.518 | 0.528 | 0.538 | 0.547 | 0.557 | 0.567 | 0.577 |
| 71 | 0.500 | 0.510 | 0.519 | 0.529 | 0.538 | 0.548 | 0.558 | 0.568 | 0.577 |
| 72 | 0.501 | 0.511 | 0.520 | 0.529 | 0.539 | 0.548 | 0.558 | 0.568 | 0.578 |
| 73 | 0.501 | 0.511 | 0.521 | 0.530 | 0.540 | 0.549 | 0.559 | 0.569 | 0.579 |
| 74 | 0.502 | 0.512 | 0.521 | 0.531 | 0.541 | 0.550 | 0.560 | 0.569 | 0.579 |
| 75 | 0.503 | 0.513 | 0.522 | 0.532 | 0.541 | 0.551 | 0.561 | 0.570 | 0.580 |
| 76 | 0.504 | 0.513 | 0.523 | 0.532 | 0.542 | 0.551 | 0.561 | 0.571 | 0.581 |
| 77 | 0.504 | 0.514 | 0.524 | 0.533 | 0.543 | 0.552 | 0.562 | 0.572 | 0.581 |
| 78 | 0.505 | 0.515 | 0.524 | 0.534 | 0.544 | 0.553 | 0.563 | 0.572 | 0.582 |
| 79 | 0.506 | 0.516 | 0.525 | 0.535 | 0.544 | 0.554 | 0.563 | 0.573 | 0.582 |
| 80 | 0.507 | 0.517 | 0.526 | 0.535 | 0.545 | 0.554 | 0.564 | 0.573 | 0.583 |
| 81 | 0.508 | 0.518 | 0.527 | 0.536 | 0.545 | 0.555 | 0.565 | 0.574 | 0.584 |
| 82 | 0.509 | 0.519 | 0.528 | 0.537 | 0.546 | 0.555 | 0.565 | 0.574 | 0.584 |
| 83 | 0.510 | 0.519 | 0.528 | 0.538 | 0.547 | 0.556 | 0.566 | 0.575 | 0.585 |
| 84 | 0.510 | 0.520 | 0.529 | 0.538 | 0.548 | 0.557 | 0.567 | 0.576 | 0.585 |
| 85 | 0.511 | 0.521 | 0.530 | 0.539 | 0.548 | 0.558 | 0.568 | 0.577 | 0.586 |
| 86 | 0.512 | 0.521 | 0.531 | 0.540 | 0.549 | 0.558 | 0.568 | 0.577 | 0.587 |
| 87 | 0.513 | 0.522 | 0.531 | 0.541 | 0.550 | 0.559 | 0.569 | 0.578 | 0.587 |
| 88 | 0.513 | 0.523 | 0.532 | 0.541 | 0.551 | 0.560 | 0.569 | 0.579 | 0.588 |
| 89 | 0.514 | 0.524 | 0.533 | 0.542 | 0.551 | 0.561 | 0.570 | 0.579 | 0.589 |
| 90 | 0.515 | 0.524 | 0.534 | 0.543 | 0.552 | 0.561 | 0.570 | 0.580 | 0.589 |

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 33

Table 33
Specific Gravity Reduction to 60°F 0.580 to 0.650
30 to 60°F

| Observed Temperature, deg F | Observed Specific Gravity | | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.580 | 0.590 | 0.600 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 |
| | Corresponding Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | |
| 30 | 0.560 | 0.571 | 0.582 | 0.593 | 0.603 | 0.613 | 0.624 | 0.634 |
| 31 | 0.561 | 0.572 | 0.583 | 0.593 | 0.604 | 0.614 | 0.624 | 0.635 |
| 32 | 0.561 | 0.572 | 0.583 | 0.594 | 0.604 | 0.615 | 0.625 | 0.635 |
| 33 | 0.562 | 0.573 | 0.584 | 0.594 | 0.605 | 0.615 | 0.626 | 0.636 |
| 34 | 0.563 | 0.574 | 0.584 | 0.595 | 0.605 | 0.616 | 0.626 | 0.636 |
| 35 | 0.564 | 0.574 | 0.585 | 0.596 | 0.606 | 0.616 | 0.627 | 0.637 |
| 36 | 0.564 | 0.575 | 0.586 | 0.596 | 0.607 | 0.617 | 0.627 | 0.637 |
| 37 | 0.565 | 0.576 | 0.586 | 0.597 | 0.607 | 0.617 | 0.628 | 0.638 |
| 38 | 0.566 | 0.576 | 0.587 | 0.597 | 0.608 | 0.618 | 0.628 | 0.639 |
| 39 | 0.567 | 0.577 | 0.588 | 0.598 | 0.608 | 0.619 | 0.629 | 0.639 |
| 40 | 0.567 | 0.578 | 0.588 | 0.599 | 0.609 | 0.619 | 0.629 | 0.640 |
| 41 | 0.568 | 0.578 | 0.589 | 0.599 | 0.609 | 0.620 | 0.630 | 0.640 |
| 42 | 0.568 | 0.579 | 0.589 | 0.600 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.641 |
| 43 | 0.569 | 0.579 | 0.590 | 0.600 | 0.611 | 0.621 | 0.631 | 0.641 |
| 44 | 0.570 | 0.580 | 0.591 | 0.601 | 0.611 | 0.621 | 0.632 | 0.642 |
| 45 | 0.571 | 0.581 | 0.591 | 0.602 | 0.612 | 0.622 | 0.632 | 0.642 |
| 46 | 0.571 | 0.582 | 0.592 | 0.602 | 0.612 | 0.622 | 0.633 | 0.643 |
| 47 | 0.572 | 0.582 | 0.592 | 0.603 | 0.613 | 0.623 | 0.633 | 0.643 |
| 48 | 0.573 | 0.583 | 0.593 | 0.603 | 0.613 | 0.624 | 0.634 | 0.644 |
| 49 | 0.573 | 0.584 | 0.594 | 0.604 | 0.614 | 0.624 | 0.634 | 0.644 |
| 50 | 0.574 | 0.584 | 0.594 | 0.604 | 0.615 | 0.625 | 0.635 | 0.645 |
| 51 | 0.575 | 0.585 | 0.595 | 0.605 | 0.615 | 0.625 | 0.635 | 0.645 |
| 52 | 0.575 | 0.585 | 0.595 | 0.606 | 0.616 | 0.626 | 0.636 | 0.646 |
| 53 | 0.576 | 0.586 | 0.596 | 0.606 | 0.616 | 0.626 | 0.636 | 0.646 |
| 54 | 0.576 | 0.586 | 0.597 | 0.607 | 0.617 | 0.627 | 0.637 | 0.647 |
| 55 | 0.577 | 0.587 | 0.597 | 0.607 | 0.617 | 0.627 | 0.637 | 0.647 |
| 56 | 0.578 | 0.588 | 0.598 | 0.608 | 0.618 | 0.628 | 0.638 | 0.648 |
| 57 | 0.578 | 0.588 | 0.598 | 0.608 | 0.618 | 0.628 | 0.638 | 0.648 |
| 58 | 0.579 | 0.589 | 0.599 | 0.609 | 0.619 | 0.629 | 0.639 | 0.649 |
| 59 | 0.579 | 0.589 | 0.599 | 0.609 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 |
| 60 | 0.580 | 0.590 | 0.600 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 |

FUENTE: ASTM 1250-80

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 33

Table 33
0.580 to 0.650
60 to 90°F
Specific Gravity Reduction to 60°F

| Observed Temperature, deg F | Observed Specific Gravity | | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.580 | 0.590 | 0.600 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 |
| | Corresponding Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | |
| 60 | 0.580 | 0.590 | 0.600 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 |
| 61 | 0.581 | 0.591 | 0.601 | 0.611 | 0.621 | 0.631 | 0.641 | 0.651 |
| 62 | 0.581 | 0.591 | 0.601 | 0.611 | 0.621 | 0.631 | 0.641 | 0.651 |
| 63 | 0.582 | 0.592 | 0.602 | 0.612 | 0.622 | 0.632 | 0.642 | 0.652 |
| 64 | 0.582 | 0.592 | 0.602 | 0.612 | 0.622 | 0.632 | 0.642 | 0.652 |
| 65 | 0.583 | 0.593 | 0.603 | 0.613 | 0.623 | 0.633 | 0.643 | 0.653 |
| 66 | 0.584 | 0.594 | 0.603 | 0.613 | 0.623 | 0.633 | 0.643 | 0.653 |
| 67 | 0.584 | 0.594 | 0.604 | 0.614 | 0.624 | 0.634 | 0.644 | 0.654 |
| 68 | 0.585 | 0.595 | 0.605 | 0.614 | 0.624 | 0.634 | 0.644 | 0.654 |
| 69 | 0.586 | 0.596 | 0.605 | 0.615 | 0.625 | 0.635 | 0.645 | 0.655 |
| 70 | 0.586 | 0.596 | 0.606 | 0.616 | 0.625 | 0.635 | 0.645 | 0.655 |
| 71 | 0.587 | 0.597 | 0.606 | 0.616 | 0.626 | 0.636 | 0.646 | 0.656 |
| 72 | 0.587 | 0.597 | 0.607 | 0.617 | 0.627 | 0.636 | 0.646 | 0.656 |
| 73 | 0.588 | 0.598 | 0.607 | 0.617 | 0.627 | 0.637 | 0.647 | 0.657 |
| 74 | 0.589 | 0.599 | 0.608 | 0.618 | 0.628 | 0.637 | 0.647 | 0.657 |
| 75 | 0.590 | 0.599 | 0.609 | 0.618 | 0.628 | 0.638 | 0.648 | 0.658 |
| 76 | 0.590 | 0.600 | 0.609 | 0.619 | 0.629 | 0.638 | 0.648 | 0.658 |
| 77 | 0.591 | 0.601 | 0.610 | 0.619 | 0.629 | 0.639 | 0.649 | 0.659 |
| 78 | 0.592 | 0.601 | 0.610 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.649 | 0.659 |
| 79 | 0.592 | 0.602 | 0.611 | 0.620 | 0.630 | 0.640 | 0.650 | 0.660 |
| 80 | 0.593 | 0.602 | 0.611 | 0.621 | 0.631 | 0.641 | 0.650 | 0.660 |
| 81 | 0.593 | 0.603 | 0.612 | 0.622 | 0.631 | 0.641 | 0.651 | 0.661 |
| 82 | 0.594 | 0.603 | 0.612 | 0.622 | 0.632 | 0.642 | 0.651 | 0.661 |
| 83 | 0.594 | 0.604 | 0.613 | 0.623 | 0.632 | 0.642 | 0.652 | 0.662 |
| 84 | 0.595 | 0.604 | 0.613 | 0.623 | 0.633 | 0.643 | 0.652 | 0.662 |
| 85 | 0.596 | 0.605 | 0.614 | 0.624 | 0.633 | 0.643 | 0.653 | 0.663 |
| 86 | 0.597 | 0.606 | 0.615 | 0.624 | 0.634 | 0.644 | 0.653 | 0.663 |
| 87 | 0.597 | 0.606 | 0.615 | 0.625 | 0.634 | 0.644 | 0.654 | 0.664 |
| 88 | 0.598 | 0.607 | 0.616 | 0.625 | 0.635 | 0.645 | 0.654 | 0.664 |
| 89 | 0.598 | 0.607 | 0.616 | 0.626 | 0.635 | 0.645 | 0.655 | 0.665 |
| 90 | 0.599 | 0.608 | 0.617 | 0.626 | 0.636 | 0.646 | 0.655 | 0.665 |

FUENTE: ASTM 1250-80

**ANEXO 6. TABLA 34 EXTRAIDA DE LA NORMA ASTM
1250-80**

TABLA 34. OBTENCIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN VOLUMÉTRICO (DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN) DEL GLP A 60°F , A PARTIR DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA A 60°F Y LA TEMPERATURA OBSERVADA EN EL TANQUE.

162

Table 34
Volume Reduction to 60°F for LPG 0.495 to 0.604
-20 to +27°F

| Observed Temperature, deg F | Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0.495 to 0.504 | 0.505 to 0.514 | 0.515 to 0.524 | 0.525 to 0.534 | 0.535 to 0.544 | 0.545 to 0.554 | 0.555 to 0.564 | 0.565 to 0.574 | 0.575 to 0.584 | 0.585 to 0.594 | 0.595 to 0.604 |
| | Factor for Reducing Volume to 60°F | | | | | | | | | | |
| -20 | 1.120 | 1.114 | 1.109 | 1.104 | 1.099 | 1.095 | 1.090 | 1.086 | 1.082 | 1.079 | 1.076 |
| -19 | 1.118 | 1.113 | 1.108 | 1.103 | 1.098 | 1.094 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.078 | 1.075 |
| -18 | 1.117 | 1.111 | 1.106 | 1.101 | 1.097 | 1.093 | 1.088 | 1.084 | 1.080 | 1.077 | 1.074 |
| -17 | 1.115 | 1.110 | 1.105 | 1.100 | 1.095 | 1.091 | 1.086 | 1.082 | 1.079 | 1.076 | 1.073 |
| -16 | 1.114 | 1.108 | 1.103 | 1.098 | 1.094 | 1.090 | 1.085 | 1.081 | 1.078 | 1.075 | 1.072 |
| -15 | 1.112 | 1.107 | 1.102 | 1.097 | 1.093 | 1.089 | 1.084 | 1.080 | 1.077 | 1.074 | 1.071 |
| -14 | 1.111 | 1.106 | 1.101 | 1.096 | 1.092 | 1.088 | 1.083 | 1.079 | 1.076 | 1.073 | 1.070 |
| -13 | 1.109 | 1.104 | 1.099 | 1.095 | 1.091 | 1.087 | 1.082 | 1.078 | 1.075 | 1.072 | 1.069 |
| -12 | 1.108 | 1.103 | 1.098 | 1.093 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.077 | 1.074 | 1.071 | 1.068 |
| -11 | 1.106 | 1.101 | 1.096 | 1.092 | 1.088 | 1.084 | 1.080 | 1.076 | 1.073 | 1.070 | 1.067 |
| -10 | 1.105 | 1.100 | 1.095 | 1.091 | 1.087 | 1.083 | 1.079 | 1.075 | 1.072 | 1.069 | 1.066 |
| -9 | 1.104 | 1.099 | 1.094 | 1.090 | 1.086 | 1.082 | 1.078 | 1.074 | 1.071 | 1.068 | 1.065 |
| -8 | 1.102 | 1.098 | 1.093 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.077 | 1.073 | 1.070 | 1.067 | 1.064 |
| -7 | 1.101 | 1.096 | 1.091 | 1.087 | 1.083 | 1.080 | 1.076 | 1.072 | 1.069 | 1.067 | 1.063 |
| -6 | 1.099 | 1.095 | 1.090 | 1.086 | 1.082 | 1.079 | 1.075 | 1.071 | 1.068 | 1.066 | 1.062 |
| -5 | 1.098 | 1.094 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.078 | 1.074 | 1.070 | 1.067 | 1.065 | 1.061 |
| -4 | 1.097 | 1.093 | 1.088 | 1.084 | 1.080 | 1.077 | 1.073 | 1.069 | 1.066 | 1.064 | 1.060 |
| -3 | 1.096 | 1.092 | 1.087 | 1.083 | 1.079 | 1.076 | 1.072 | 1.068 | 1.065 | 1.063 | 1.059 |
| -2 | 1.094 | 1.090 | 1.086 | 1.082 | 1.078 | 1.075 | 1.071 | 1.068 | 1.065 | 1.063 | 1.059 |
| -1 | 1.093 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.077 | 1.074 | 1.070 | 1.067 | 1.064 | 1.062 | 1.058 |
| 0 | 1.092 | 1.088 | 1.084 | 1.080 | 1.076 | 1.073 | 1.069 | 1.066 | 1.063 | 1.061 | 1.057 |
| 1 | 1.090 | 1.086 | 1.083 | 1.079 | 1.075 | 1.072 | 1.068 | 1.065 | 1.062 | 1.060 | 1.056 |
| 2 | 1.089 | 1.085 | 1.081 | 1.077 | 1.074 | 1.070 | 1.067 | 1.064 | 1.061 | 1.059 | 1.055 |
| 3 | 1.088 | 1.084 | 1.080 | 1.076 | 1.073 | 1.069 | 1.066 | 1.063 | 1.060 | 1.058 | 1.055 |
| 4 | 1.086 | 1.082 | 1.079 | 1.075 | 1.071 | 1.068 | 1.065 | 1.062 | 1.059 | 1.057 | 1.054 |
| 5 | 1.085 | 1.081 | 1.077 | 1.074 | 1.070 | 1.067 | 1.063 | 1.061 | 1.058 | 1.055 | 1.053 |
| 6 | 1.084 | 1.080 | 1.076 | 1.072 | 1.069 | 1.065 | 1.062 | 1.059 | 1.057 | 1.054 | 1.052 |
| 7 | 1.082 | 1.078 | 1.075 | 1.071 | 1.068 | 1.064 | 1.061 | 1.058 | 1.056 | 1.053 | 1.051 |
| 8 | 1.081 | 1.077 | 1.074 | 1.070 | 1.066 | 1.063 | 1.060 | 1.057 | 1.055 | 1.052 | 1.050 |
| 9 | 1.079 | 1.076 | 1.072 | 1.069 | 1.065 | 1.062 | 1.059 | 1.056 | 1.054 | 1.051 | 1.049 |
| 10 | 1.078 | 1.074 | 1.071 | 1.067 | 1.064 | 1.061 | 1.058 | 1.055 | 1.053 | 1.050 | 1.048 |
| 11 | 1.077 | 1.073 | 1.070 | 1.066 | 1.063 | 1.060 | 1.057 | 1.054 | 1.052 | 1.049 | 1.047 |
| 12 | 1.075 | 1.071 | 1.068 | 1.064 | 1.061 | 1.059 | 1.056 | 1.053 | 1.051 | 1.048 | 1.046 |
| 13 | 1.074 | 1.070 | 1.067 | 1.063 | 1.060 | 1.057 | 1.054 | 1.052 | 1.050 | 1.047 | 1.045 |
| 14 | 1.072 | 1.069 | 1.066 | 1.062 | 1.059 | 1.056 | 1.053 | 1.051 | 1.049 | 1.046 | 1.044 |
| 15 | 1.071 | 1.068 | 1.064 | 1.061 | 1.058 | 1.055 | 1.052 | 1.050 | 1.047 | 1.045 | 1.043 |
| 16 | 1.070 | 1.066 | 1.063 | 1.060 | 1.056 | 1.054 | 1.051 | 1.048 | 1.046 | 1.044 | 1.042 |
| 17 | 1.069 | 1.065 | 1.062 | 1.058 | 1.055 | 1.052 | 1.050 | 1.047 | 1.045 | 1.043 | 1.041 |
| 18 | 1.067 | 1.064 | 1.061 | 1.057 | 1.054 | 1.051 | 1.049 | 1.046 | 1.044 | 1.042 | 1.040 |
| 19 | 1.066 | 1.062 | 1.059 | 1.056 | 1.053 | 1.050 | 1.047 | 1.045 | 1.043 | 1.041 | 1.039 |
| 20 | 1.064 | 1.061 | 1.058 | 1.054 | 1.051 | 1.049 | 1.046 | 1.044 | 1.042 | 1.040 | 1.038 |
| 21 | 1.063 | 1.060 | 1.056 | 1.053 | 1.050 | 1.048 | 1.045 | 1.043 | 1.041 | 1.039 | 1.037 |
| 22 | 1.061 | 1.058 | 1.055 | 1.052 | 1.049 | 1.046 | 1.044 | 1.042 | 1.040 | 1.038 | 1.036 |
| 23 | 1.060 | 1.057 | 1.053 | 1.051 | 1.048 | 1.045 | 1.043 | 1.041 | 1.039 | 1.037 | 1.036 |
| 24 | 1.058 | 1.055 | 1.052 | 1.049 | 1.046 | 1.044 | 1.042 | 1.040 | 1.038 | 1.036 | 1.035 |
| 25 | 1.057 | 1.054 | 1.050 | 1.048 | 1.045 | 1.043 | 1.041 | 1.039 | 1.037 | 1.035 | 1.034 |
| 26 | 1.055 | 1.052 | 1.049 | 1.047 | 1.044 | 1.042 | 1.039 | 1.037 | 1.036 | 1.034 | 1.033 |
| 27 | 1.054 | 1.051 | 1.048 | 1.045 | 1.043 | 1.041 | 1.038 | 1.036 | 1.035 | 1.033 | 1.032 |

FUENTE: ASTM 1250-80

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 34

163

Table 34
0.495 to 0.604
28 to 74°F
Volume Reduction to 60°F for LPG

| Observed Temperature, deg F | Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0.495 to 0.504 | 0.505 to 0.514 | 0.515 to 0.524 | 0.525 to 0.534 | 0.535 to 0.544 | 0.545 to 0.554 | 0.555 to 0.564 | 0.565 to 0.574 | 0.575 to 0.584 | 0.585 to 0.594 | 0.595 to 0.604 |
| | Factor for Reducing Volume to 60°F | | | | | | | | | | |
| 28 | 1.052 | 1.049 | 1.047 | 1.044 | 1.041 | 1.039 | 1.037 | 1.035 | 1.034 | 1.032 | 1.031 |
| 29 | 1.051 | 1.048 | 1.045 | 1.043 | 1.040 | 1.038 | 1.036 | 1.034 | 1.033 | 1.031 | 1.030 |
| 30 | 1.049 | 1.046 | 1.044 | 1.041 | 1.039 | 1.037 | 1.035 | 1.033 | 1.032 | 1.030 | 1.029 |
| 31 | 1.047 | 1.045 | 1.042 | 1.040 | 1.038 | 1.036 | 1.034 | 1.032 | 1.031 | 1.029 | 1.028 |
| 32 | 1.046 | 1.043 | 1.041 | 1.038 | 1.036 | 1.035 | 1.033 | 1.031 | 1.030 | 1.028 | 1.027 |
| 33 | 1.044 | 1.042 | 1.040 | 1.037 | 1.035 | 1.034 | 1.032 | 1.030 | 1.029 | 1.027 | 1.026 |
| 34 | 1.043 | 1.040 | 1.038 | 1.036 | 1.034 | 1.032 | 1.031 | 1.029 | 1.028 | 1.026 | 1.025 |
| 35 | 1.041 | 1.039 | 1.037 | 1.035 | 1.033 | 1.031 | 1.029 | 1.028 | 1.027 | 1.025 | 1.024 |
| 36 | 1.039 | 1.037 | 1.035 | 1.033 | 1.031 | 1.030 | 1.028 | 1.027 | 1.025 | 1.024 | 1.023 |
| 37 | 1.038 | 1.036 | 1.033 | 1.032 | 1.030 | 1.029 | 1.027 | 1.026 | 1.024 | 1.023 | 1.022 |
| 38 | 1.036 | 1.034 | 1.032 | 1.031 | 1.029 | 1.027 | 1.026 | 1.025 | 1.023 | 1.022 | 1.021 |
| 39 | 1.035 | 1.033 | 1.031 | 1.029 | 1.028 | 1.026 | 1.025 | 1.024 | 1.022 | 1.021 | 1.020 |
| 40 | 1.033 | 1.031 | 1.029 | 1.028 | 1.026 | 1.025 | 1.024 | 1.023 | 1.021 | 1.020 | 1.019 |
| 41 | 1.031 | 1.030 | 1.028 | 1.027 | 1.025 | 1.024 | 1.023 | 1.022 | 1.020 | 1.019 | 1.018 |
| 42 | 1.030 | 1.028 | 1.027 | 1.025 | 1.024 | 1.023 | 1.022 | 1.021 | 1.019 | 1.018 | 1.017 |
| 43 | 1.028 | 1.027 | 1.025 | 1.024 | 1.022 | 1.021 | 1.020 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.016 |
| 44 | 1.027 | 1.025 | 1.023 | 1.022 | 1.021 | 1.020 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.016 | 1.015 |
| 45 | 1.025 | 1.024 | 1.022 | 1.021 | 1.020 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.015 |
| 46 | 1.023 | 1.022 | 1.021 | 1.020 | 1.018 | 1.018 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.014 | 1.014 |
| 47 | 1.022 | 1.021 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.015 | 1.014 | 1.013 | 1.013 |
| 48 | 1.020 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.014 | 1.013 | 1.013 | 1.012 | 1.012 |
| 49 | 1.019 | 1.018 | 1.017 | 1.015 | 1.015 | 1.014 | 1.013 | 1.012 | 1.012 | 1.011 | 1.011 |
| 50 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.014 | 1.013 | 1.013 | 1.012 | 1.011 | 1.011 | 1.010 | 1.010 |
| 51 | 1.015 | 1.014 | 1.013 | 1.013 | 1.012 | 1.011 | 1.011 | 1.010 | 1.010 | 1.009 | 1.009 |
| 52 | 1.014 | 1.012 | 1.012 | 1.011 | 1.010 | 1.010 | 1.009 | 1.009 | 1.009 | 1.008 | 1.008 |
| 53 | 1.012 | 1.011 | 1.011 | 1.010 | 1.009 | 1.009 | 1.008 | 1.008 | 1.008 | 1.007 | 1.007 |
| 54 | 1.010 | 1.009 | 1.009 | 1.008 | 1.008 | 1.007 | 1.007 | 1.007 | 1.007 | 1.006 | 1.006 |
| 55 | 1.009 | 1.008 | 1.008 | 1.007 | 1.007 | 1.006 | 1.006 | 1.006 | 1.006 | 1.005 | 1.005 |
| 56 | 1.007 | 1.006 | 1.006 | 1.005 | 1.005 | 1.005 | 1.005 | 1.005 | 1.004 | 1.004 | 1.004 |
| 57 | 1.005 | 1.005 | 1.005 | 1.004 | 1.004 | 1.004 | 1.004 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| 58 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| 59 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 1.001 |
| 60 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 61 | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| 62 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 |
| 63 | 0.995 | 0.995 | 0.995 | 0.996 | 0.996 | 0.996 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.997 |
| 64 | 0.993 | 0.994 | 0.994 | 0.994 | 0.994 | 0.995 | 0.995 | 0.995 | 0.996 | 0.996 | 0.996 |
| 65 | 0.991 | 0.992 | 0.992 | 0.993 | 0.993 | 0.993 | 0.994 | 0.994 | 0.994 | 0.995 | 0.995 |
| 66 | 0.990 | 0.990 | 0.990 | 0.991 | 0.992 | 0.992 | 0.993 | 0.993 | 0.993 | 0.993 | 0.994 |
| 67 | 0.988 | 0.989 | 0.989 | 0.990 | 0.990 | 0.991 | 0.991 | 0.992 | 0.992 | 0.992 | 0.993 |
| 68 | 0.986 | 0.987 | 0.987 | 0.988 | 0.989 | 0.990 | 0.990 | 0.990 | 0.991 | 0.991 | 0.992 |
| 69 | 0.985 | 0.985 | 0.986 | 0.987 | 0.987 | 0.988 | 0.989 | 0.989 | 0.990 | 0.990 | 0.991 |
| 70 | 0.983 | 0.984 | 0.984 | 0.985 | 0.986 | 0.987 | 0.988 | 0.988 | 0.989 | 0.989 | 0.990 |
| 71 | 0.981 | 0.982 | 0.983 | 0.984 | 0.984 | 0.986 | 0.986 | 0.987 | 0.988 | 0.988 | 0.989 |
| 72 | 0.979 | 0.981 | 0.981 | 0.982 | 0.983 | 0.984 | 0.985 | 0.986 | 0.987 | 0.987 | 0.988 |
| 73 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.981 | 0.982 | 0.983 | 0.984 | 0.985 | 0.986 | 0.986 | 0.987 |
| 74 | 0.976 | 0.977 | 0.978 | 0.980 | 0.980 | 0.982 | 0.983 | 0.984 | 0.985 | 0.985 | 0.986 |

FUENTE: ASTM 1250-80

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 34

164

Table 34
Volume Reduction to 60°F for LPG

0.495 to 0.604
75 to 120°F

| Observed Temperature, deg F | Specific Gravity 60/60°F | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0.495 to 0.504 | 0.505 to 0.514 | 0.515 to 0.524 | 0.525 to 0.534 | 0.535 to 0.544 | 0.545 to 0.554 | 0.555 to 0.564 | 0.565 to 0.574 | 0.575 to 0.584 | 0.585 to 0.594 | 0.595 to 0.604 |
| | Factor for Reducing Volume to 60°F | | | | | | | | | | |
| 75 | 0.974 | 0.976 | 0.977 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.981 | 0.983 | 0.983 | 0.984 | 0.985 |
| 76 | 0.972 | 0.974 | 0.975 | 0.977 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.981 | 0.982 | 0.983 | 0.985 |
| 77 | 0.970 | 0.972 | 0.973 | 0.975 | 0.976 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.981 | 0.982 | 0.984 |
| 78 | 0.969 | 0.970 | 0.972 | 0.974 | 0.975 | 0.977 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.981 | 0.983 |
| 79 | 0.967 | 0.969 | 0.970 | 0.972 | 0.974 | 0.975 | 0.977 | 0.978 | 0.979 | 0.980 | 0.982 |
| 80 | 0.965 | 0.967 | 0.969 | 0.971 | 0.972 | 0.974 | 0.975 | 0.977 | 0.978 | 0.979 | 0.981 |
| 81 | 0.963 | 0.965 | 0.967 | 0.969 | 0.971 | 0.973 | 0.974 | 0.975 | 0.977 | 0.978 | 0.980 |
| 82 | 0.961 | 0.963 | 0.966 | 0.968 | 0.969 | 0.971 | 0.972 | 0.974 | 0.976 | 0.977 | 0.979 |
| 83 | 0.959 | 0.962 | 0.964 | 0.966 | 0.968 | 0.970 | 0.971 | 0.973 | 0.975 | 0.976 | 0.978 |
| 84 | 0.957 | 0.960 | 0.962 | 0.965 | 0.966 | 0.968 | 0.970 | 0.972 | 0.974 | 0.975 | 0.977 |
| 85 | 0.956 | 0.958 | 0.960 | 0.963 | 0.965 | 0.967 | 0.969 | 0.971 | 0.972 | 0.974 | 0.976 |
| 86 | 0.954 | 0.956 | 0.959 | 0.961 | 0.964 | 0.966 | 0.967 | 0.969 | 0.971 | 0.973 | 0.975 |
| 87 | 0.952 | 0.955 | 0.957 | 0.960 | 0.962 | 0.964 | 0.966 | 0.968 | 0.970 | 0.972 | 0.974 |
| 88 | 0.950 | 0.953 | 0.955 | 0.958 | 0.961 | 0.963 | 0.965 | 0.967 | 0.969 | 0.971 | 0.973 |
| 89 | 0.948 | 0.951 | 0.954 | 0.957 | 0.959 | 0.962 | 0.964 | 0.966 | 0.968 | 0.970 | 0.972 |
| 90 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.955 | 0.958 | 0.960 | 0.962 | 0.964 | 0.967 | 0.968 | 0.971 |
| 91 | 0.944 | 0.947 | 0.951 | 0.954 | 0.956 | 0.959 | 0.961 | 0.963 | 0.965 | 0.967 | 0.970 |
| 92 | 0.942 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.955 | 0.957 | 0.959 | 0.962 | 0.964 | 0.966 | 0.969 |
| 93 | 0.940 | 0.944 | 0.947 | 0.950 | 0.953 | 0.956 | 0.958 | 0.961 | 0.963 | 0.965 | 0.968 |
| 94 | 0.938 | 0.942 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.954 | 0.957 | 0.959 | 0.962 | 0.964 | 0.967 |
| 95 | 0.937 | 0.940 | 0.944 | 0.947 | 0.950 | 0.953 | 0.956 | 0.958 | 0.961 | 0.963 | 0.966 |
| 96 | 0.935 | 0.939 | 0.942 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.954 | 0.957 | 0.959 | 0.962 | 0.965 |
| 97 | 0.933 | 0.937 | 0.941 | 0.944 | 0.947 | 0.950 | 0.953 | 0.956 | 0.958 | 0.961 | 0.964 |
| 98 | 0.931 | 0.935 | 0.939 | 0.943 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.954 | 0.957 | 0.960 | 0.963 |
| 99 | 0.929 | 0.933 | 0.937 | 0.941 | 0.945 | 0.948 | 0.950 | 0.953 | 0.956 | 0.959 | 0.962 |
| 100 | 0.927 | 0.932 | 0.936 | 0.940 | 0.943 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.954 | 0.958 | 0.961 |
| 101 | 0.925 | 0.930 | 0.934 | 0.938 | 0.941 | 0.945 | 0.948 | 0.951 | 0.953 | 0.957 | 0.960 |
| 102 | 0.923 | 0.928 | 0.932 | 0.936 | 0.940 | 0.943 | 0.947 | 0.950 | 0.952 | 0.956 | 0.959 |
| 103 | 0.921 | 0.927 | 0.931 | 0.935 | 0.938 | 0.942 | 0.945 | 0.948 | 0.951 | 0.954 | 0.958 |
| 104 | 0.919 | 0.925 | 0.929 | 0.933 | 0.937 | 0.940 | 0.944 | 0.947 | 0.950 | 0.953 | 0.957 |
| 105 | 0.917 | 0.923 | 0.927 | 0.931 | 0.935 | 0.939 | 0.943 | 0.946 | 0.949 | 0.952 | 0.956 |
| 106 | 0.915 | 0.921 | 0.925 | 0.929 | 0.933 | 0.938 | 0.942 | 0.945 | 0.948 | 0.951 | 0.955 |
| 107 | 0.913 | 0.919 | 0.923 | 0.928 | 0.932 | 0.936 | 0.940 | 0.943 | 0.947 | 0.950 | 0.954 |
| 108 | 0.911 | 0.917 | 0.922 | 0.926 | 0.930 | 0.935 | 0.939 | 0.942 | 0.945 | 0.949 | 0.953 |
| 109 | 0.909 | 0.915 | 0.920 | 0.925 | 0.929 | 0.933 | 0.937 | 0.940 | 0.944 | 0.948 | 0.952 |
| 110 | 0.907 | 0.913 | 0.918 | 0.923 | 0.927 | 0.932 | 0.936 | 0.939 | 0.943 | 0.947 | 0.951 |
| 111 | 0.905 | 0.911 | 0.916 | 0.921 | 0.926 | 0.931 | 0.935 | 0.938 | 0.942 | 0.946 | 0.950 |
| 112 | 0.903 | 0.909 | 0.914 | 0.920 | 0.924 | 0.929 | 0.934 | 0.937 | 0.941 | 0.945 | 0.949 |
| 113 | 0.901 | 0.908 | 0.913 | 0.918 | 0.923 | 0.928 | 0.932 | 0.935 | 0.939 | 0.943 | 0.948 |
| 114 | 0.899 | 0.906 | 0.911 | 0.917 | 0.921 | 0.926 | 0.931 | 0.934 | 0.938 | 0.942 | 0.947 |
| 115 | 0.897 | 0.904 | 0.909 | 0.915 | 0.920 | 0.925 | 0.930 | 0.933 | 0.937 | 0.941 | 0.946 |
| 116 | 0.895 | 0.902 | 0.907 | 0.913 | 0.918 | 0.924 | 0.929 | 0.932 | 0.936 | 0.940 | 0.945 |
| 117 | 0.893 | 0.900 | 0.905 | 0.912 | 0.917 | 0.922 | 0.927 | 0.931 | 0.935 | 0.939 | 0.944 |
| 118 | 0.891 | 0.898 | 0.904 | 0.910 | 0.915 | 0.921 | 0.926 | 0.929 | 0.933 | 0.938 | 0.943 |
| 119 | 0.889 | 0.896 | 0.902 | 0.909 | 0.914 | 0.919 | 0.924 | 0.928 | 0.932 | 0.937 | 0.942 |
| 120 | 0.887 | 0.894 | 0.900 | 0.907 | 0.912 | 0.918 | 0.923 | 0.927 | 0.931 | 0.936 | 0.941 |

FUENTE: ASTM 1250-80

**ANEXO 7. CÁLCULOS DE PORCENTAJES DE ERROR EN
PLANTAS DE ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE
GLP.**

CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ECOGAS SALCEDO

En primer lugar se describen los datos que se obtuvieron en la planta con los instrumentos de medida correspondientes, para los posteriores cálculos con el método estandarizado en cada uno de los tanques y posteriormente se realiza la comparación con el valor obtenido con el método empleado por la planta, así finalmente se realiza la obtención de los porcentajes de error, este procedimiento se aplicará para las demás plantas, entonces para el caso actual se muestra los datos obtenidos en la planta para los posteriores cálculos como son:

DATOS DEL TANQUE: TE-1

Temperatura en el Tanque = 15°C

Presión en el tanque = 100 psi

%Volumen de Líquido = 84%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,560

Temperatura en el densímetro = 30°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 51727,300 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Ecogas Salcedo = 50872 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|51727,300 \text{ kg} - 50872 \text{ kg}|}{|50872 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 1,68 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TE-2

Temperatura en el Tanque = 15°C

Presión en el tanque = 90 psi

%Volumen de Líquido = 82%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,542

Temperatura en el densímetro = 40°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 17019,570 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Ecogas Salcedo =17114 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|17019,570 \text{ kg} - 17114 \text{ kg}|}{|17114 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,55 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TE-3

Temperatura en el Tanque = 18°C

Presión en el tanque = 85 psi

%Volumen de Líquido = 58%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,540

Temperatura en el densímetro = 44°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 35449,758 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Ecogas Salcedo = 35555 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|35449,758 \text{ kg} - 35555 \text{ kg}|}{|35555 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,29\%$$

DATOS DEL TANQUE: TA-1

Temperatura en el Tanque = 13°C

Presión en el tanque = 100 psi

%Volumen de Líquido= 83%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,545

Temperatura en el densímetro = 38°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 36700,813 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Ecogas Salcedo = 34700 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|36700,813 \text{ kg} - 34700 \text{ kg}|}{|34700 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 5,77 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TA-2

Temperatura en el Tanque = 16°C

Presión en el tanque = 95 psi

%Volumen de Líquido = 78%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,550

Temperatura en el densímetro = 30°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 34314,395 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Ecogas Salcedo= 36562 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|34314,395 \text{ kg} - 36562 \text{ kg}|}{|36562 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 6,15 \%$$

CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA DURAGAS PIFO

Los datos obtenidos en la planta para los respectivos cálculos de error se muestran a continuación:

DATOS DEL TANQUE: D-23

Temperatura en el Tanque = 12°C

Presión en el tanque = 100 psi

%Volumen de Líquido = 79%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,558

Temperatura en el densímetro = 54°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 44424,634 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Duragas Pifo = 44255 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|44424,634 \text{ kg} - 44255 \text{ kg}|}{|44255 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,38 \%$$

DATOS DEL TANQUE: D-19

Temperatura en el Tanque = 16 °C

Presión en el tanque = 95 psi

%Volumen de Líquido = 80%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,559

Temperatura en el densímetro= 61°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 45230,982 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Duragas Pifo = 45106 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|45230,982 \text{ kg} - 45106 \text{ kg}|}{|45106 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,28 \%$$

DATOS DEL TANQUE: D-20

Temperatura en el Tanque = 17 °C

Presión en el tanque = 95 psi

%Volumen de Líquido = 83%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,540

Temperatura en el densímetro = °F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 36135,294 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta Duragas Pifo = 36087 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|36135,294 \text{ kg} - 36087 \text{ kg}|}{|36087 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,13\%$$

CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE ERROR EN PLANTA ENI PIFO

Los datos obtenidos en la planta para los respectivos cálculos de error se muestran a continuación:

DATOS DEL TANQUE: TEP-01

Temperatura en el Tanque = 16 °C

Presión en el tanque = 86 psi

Altura del Líquido = 182 cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,538

Temperatura en el densímetro = 45°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 39605,835 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 39563 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|39605,835 \text{ kg} - 39563 \text{ kg}|}{|39563 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,11 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-02

Temperatura en el Tanque = 15°C

Presión en el tanque = 86 psi

Altura del Líquido= 180 cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,537

Temperatura en el densímetro = 45°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 35185,490 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 35166 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|35185,490 \text{ kg} - 35166 \text{ kg}|}{|35166 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,06 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-03

Temperatura en el Tanque = 16°C

Presión en el tanque = 86 psi

Altura del Líquido = 184 cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,536

Temperatura en el densímetro = 50°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 36071,368 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 36079 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|36071,368 \text{ kg} - 36079 \text{ kg}|}{|36079 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,02\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-04

Temperatura en el Tanque = 14°C

Presión en el tanque = 82 psi

Altura del Líquido = 182 cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,538

Temperatura en el densímetro = 45°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 20686,212 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 22326 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|20686,212 \text{ kg} - 22326 \text{ kg}|}{|22326 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 7,34\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-05

Temperatura en el Tanque = 14°C

Presión en el tanque = 82 psi

Altura del Líquido= 183 cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,535

Temperatura en el densímetro = 50°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 22442,436 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 22459 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{| 22442,436 \text{ kg} - 22459 \text{ kg} |}{| 22459 \text{ kg} |} * 100$$

$$\%error = 0,07 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-06

Temperatura en el Tanque = 16°C

Presión en el tanque = 88psi

Altura del Líquido = 183cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,545

Temperatura en el densímetro = 52°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 35659,286 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 35672 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{| 35659,286 \text{ kg} - 35672 \text{ kg} |}{| 35672 \text{ kg} |} * 100$$

$$\%error = 0,04\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-07

Temperatura en el Tanque=17°C

Presión en el tanque = 86 psi

Altura del Líquido = 183cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,564

Temperatura en el densímetro = 46°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 36511,723 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 36575 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|36511,723 \text{ kg} - 36575 \text{ kg}|}{|36575 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,17\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-08

Temperatura en el Tanque = 18 °C

Presión en el tanque = 88 psi

Altura del Líquido = 181cm

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,570

Temperatura en el densímetro = 45°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 36385,801 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 36366 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|36385,801 \text{ kg} - 36366 \text{ kg}|}{|36366 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,05 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-09

Temperatura en el Tanque = 17°C

Presión en el tanque = 88psi

%Volumen de Líquido= 78%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,550

Temperatura en el densímetro = 54°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 45559,310 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 49161 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|45559,310kg - 49161kg|}{|49161kg|} * 100$$

$$\%error = 7,33 \%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-10

Temperatura en el Tanque = 17°C

Presión en el tanque = 88 psi

%Volumen de Líquido = 84%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,550

Temperatura en el densímetro = 48°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 49407,236 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 52435 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|49407,236 kg - 52435 kg|}{|52435 kg|} * 100$$

$$\%error = 5,77\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-11

Temperatura en el Tanque = 19°C

Presión en el tanque = 90 psi

%Volumen de Líquido = 85%

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,538

Temperatura en el densímetro = 52°F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 51307,462 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 51395 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|51307,462 \text{ kg} - 51395 \text{ kg}|}{|51395 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,17\%$$

DATOS DEL TANQUE: TEP-12

Temperatura en el Tanque = 19°C

Presión en el tanque = 90 psi

%Volumen de Líquido = 83 %

Gravedad específica (con el densímetro) = 0,555

Temperatura en el densímetro = 50 °F

MASA DE GLP EN EL TANQUE:

Masa total en kg de GLP con método estandarizado = 52240,326 kg

Masa total en kg de GLP con método de planta ENI Pifo = 52029 kg

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ERROR:

$$\%error = \frac{|52240,326 \text{ kg} - 52029 \text{ kg}|}{|52029 \text{ kg}|} * 100$$

$$\%error = 0,41\%$$