

ADAPTACIÓN TECNOLÓGICA DE UNA MÁQUINA RECUPERADORA DE GLP RESIDUAL EN TANQUES DOMÉSTICOS APLICACIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN

¹Vargas Adolfo.; ² Barriga A.

¹ Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
adolfovgusvargas@hotmail.com

² Director: Ph.D Profesor Principal CDTs FIMCP - ESPOL abarriga@espol.edu.ec

RESUMEN

El presente trabajo tiene como fin el dimensionamiento de un sistema para la recuperación del GLP residual existente en los cilindros domésticos, con una capacidad de evacuación de 1.200 unidades diarias.

Se inicia el trabajo a partir del análisis de información obtenida de sistemas utilizados en plantas de mantenimiento de cilindros para GLP, mediante la cual se definen los componentes del sistema.

Posteriormente se genera un modelo del comportamiento del fluido al momento de evacuarlo del cilindro para estimar el tiempo que se requiere por unidad y la estimación de las capacidades de cada uno de los elementos constituyentes. Una vez obtenida esta información se procede a la selección de los equipos.

Los objetivos deseados son: presentar una solución que reduzca las emisiones de GLP al medio ambiente, minimizando el riesgo potencial de existencia de áreas explosivas; mejorar las condiciones de trabajo de los operarios, evitando la inhalación de estos vapores; y, realizar un análisis económico que nos permita evaluar los costos y posibles beneficios que puede generar la ejecución de este proyecto.

Abstract

The objective of this paper is the definition of a residual LPG recovery system in domestic containers, with a capacity of 1.200 units per day.

This work begins with the analysis of information obtained from systems used in LPG containers maintenance plants, which is used to define the system components.

Therefore, it presents a model of the fluid displacement during the recovery process to estimate the recovery time per unit and the system elements capacity. Then it shows the equipment selection.

The objectives of this work are: present a solution that resolves the problem of LPG emissions, reducing the potential risk of a dangerous area existence; improve the working conditions of the employees and present an economical analysis that permit us the evaluation of costs and possible benefits that can generate the execution of this project.

Palabras Claves: GLP, evacuación, máquina

Introducción

Normalmente el remanente de GLP en los cilindros domésticos que requieren mantenimiento es liberado mediante la apertura de su válvula con la intención de eliminar la presión en el interior del recipiente; una vez que la presión interna es próxima a la atmosférica se procede al retiro de la válvula. Posteriormente se lavan los cilindros en un banco adecuado para este fin, para evitar que cualquier residuo en el interior alcance su punto de ignición durante la ejecución de trabajos en caliente.

Los GLP al ser más pesados que el aire en condiciones normales, tienden a acumularse en lugares con poca ventilación, lo que aumenta la probabilidad de existencia de una atmósfera inflamable, que en condiciones adversas podría alcanzar su punto de ignición y generar algún accidente con daños a personas y bienes materiales.

Los objetivos deseados son:

1. Presentar una solución que reduzca las emisiones de GLP al medio ambiente, minimizando el riesgo potencial de existencia de áreas explosivas,
2. Mejorar las condiciones de trabajo de los operarios, evitando la inhalación de estos vapores, y
3. Realizar un análisis económico que nos permita evaluar los costos y posibles beneficios que puede generar la ejecución de este proyecto.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN

Para el estudio de la máquina que se desea construir localmente, se obtuvo como referencia información de dos plantas en Chile que realizan mantenimiento de cilindros. En ambos casos los principios de funcionamiento son los mismos; la diferencia radica

en las capacidades de los sistemas de evacuado, y por ende, de los elementos que los conforman.

Los cilindros domésticos para GLP en Chile retornan con aproximadamente 400 gramos de producto en su interior, el cual debe eliminarse para realizar trabajos en caliente de manera segura, necesarios para su reparación.

Los cilindros son colocados en un banco, en el que un cabezal similar al utilizado para el llenado de cilindros se ubica sobre la válvula para liberar el GLP residual. Para lograr este efecto, se mantiene una presión inferior a la del interior del tanque con ayuda de un compresor o bomba de vacío alcanzando una presión igual o menor a 0 PSIG. El control de flujo se lo hace mediante un visor de paletas conectado a la manguera proveniente del cabezal de vaciado, el cual deja de girar en el momento que no existe flujo.

El visor se encuentra conectado a una manguera flexible que a su vez se conecta a una tubería principal que alimenta a un tanque pulmón, el cual está conectado a la succión del equipo de trasvase de vapor (compresor o bomba de vacío), recibiendo el GLP evacuado.

La descarga del equipo de trasvase se conecta a un tanque de almacenamiento temporal, el cual acumula GLP para su posterior envasado o consumo.

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

Evaluación de la demanda del equipo

En la actualidad se tiene la necesidad de cumplir con la demanda de cilindros evacuados y lavados existente en el taller de mantenimiento de cilindros, por lo que en función del mismo se harán las

estimaciones necesarias para el dimensionamiento del sistema.

Requerimientos del sistema

El taller del mantenimiento de cilindros tiene una capacidad instalada de procesamiento de 1200 cilindros por turno, equivalente a 150 cilindros por hora (2,5 cilindros por minuto).

Para estimar el tiempo de evacuado del GLP remanente en los cilindros domésticos es necesario deducir alguna fórmula que nos permite alcanzar este fin.

Consideraremos para el modelo que:

1. Obviando las variaciones de volumen de líquido generadas por el cambio de presión en el interior del tanque, el volumen de GLP líquido que pasa a través de la válvula es el mismo que es reemplazado por el vapor que se genera, por lo que:

$$s_1 v_1 = s_2 v_2$$

2 Existen pérdidas importantes por la existencia de la válvula doméstica, las cuales son mayores a aquellas que podría generar la conducción del GLP por las tuberías del sistema de evacuación, considerando que la viscosidad del fluido en mención es despreciable (Ecuación de Bernoulli con pérdidas en el sistema).

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + \rho h_{loss}$$

3. Consideraremos que la evaporación del GLP líquido necesaria para que este se desplace utiliza una cantidad de energía pequeña (expansión isotérmica).

$$p_o s_1 (H - h_o) = p_1 s_1 (H - h); \Delta U = 0; Q = W$$

$$pV = \text{constante}$$

El enunciado 3 se puede justificar calculando el cambio de temperatura en el GLP líquido, generado por la

entrega de calor necesario para la evaporación del GLP gaseoso que ocupará el volumen de líquido desplazado.

$$Q = m_{liq desp} c \Delta T = m_{liq evap} c_l$$

$$\Delta T = \frac{m_{liq evap} c_l}{m_{liq desp} c} = \frac{(\rho V)_{liq evap} c_l}{(\rho V)_{liq desp} c}$$

$$\Delta T = \frac{(2.01 * 1.293 * .001718) * 87.5}{(0.9953) * 2.47}$$

$$\Delta T = 0.1589^\circ C$$

Una variación de temperatura menor a 1° C puede ser considerada despreciable ya que no incide de una manera crítica en las propiedades físicas del GLP.

De estas ecuaciones podemos advertir que:

o El volumen de GLP líquido que pasa a través de la válvula es igual a la variación de vapor en el cuerpo del cilindro.

o En el cilindro, la presión producida por el vapor es más significativa respecto a la de la altura del líquido y la velocidad del fluido. En la válvula podemos verificar que los aspectos significativos a evaluar son la velocidad del flujo y las pérdidas a través de la válvula.

o Por ser una expansión isotérmica, el producto de presión y volumen del vapor se mantiene constante durante todo el proceso.

De acuerdo a las observaciones hechas en el párrafo anterior, las ecuaciones se simplifican de la siguiente manera:

$$4. s_2 v_2 = \frac{dV}{dt}$$

$$5. p = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \frac{1}{2} \rho k v_2^2 = \frac{1}{2} (1 + k) \rho v_2^2$$

$$6. p_o V_o = pV$$

Derivando (6) en función del tiempo,

$$7. \frac{dV}{dt} = -\frac{p_o V_o}{p^2} \frac{dp}{dt}$$

$$\sqrt{p^3} = \frac{2\sqrt{p_o^3}}{2 - 3At\sqrt{p_o^3}}$$

y reemplazando (4) en (7),

$$8. s_2 v_2 = -\frac{p_o V_o}{p^2} \frac{dp}{dt}$$

$$13. p = \sqrt[3]{\frac{4p_o^3}{\left(2 - 3At\sqrt{p_o^3}\right)^2}}$$

Despejamos v2 de (5), lo sustituimos en (8)

$$9. \frac{dp}{dt} \frac{1}{p^2} = -\frac{s_2}{p_o V_o} \sqrt{\frac{2p}{\rho(1+k)}}$$

Reemplazo A en (13) y obtengo la expresión para la presión en el cilindro en función del tiempo,

$$p = \sqrt[3]{\frac{4p_o^3}{\left(2 + \frac{3s_2}{p_o V_o} \sqrt{\frac{2p_o^3}{\rho(1+k)}} t\right)^2}}$$

Defino el termino A como la parte constante de la expresión, simplificándola como se muestra

$$10. A = -\frac{s_2}{p_o V_o} \sqrt{\frac{2}{\rho(1+k)}};$$

$$11. \frac{dp}{dt} p^{-\frac{5}{2}} = A$$

Procedo a integrar (11) para encontrar el valor de p en función del tiempo,

$$12. p^{-\frac{5}{2}} dp = A dt$$

$$\int_{p_o}^p p^{-\frac{5}{2}} dp = \int_0^t A dt$$

$$\left(\frac{p^{-\frac{3}{2}}}{-\frac{3}{2}} \right)_{p_o}^p = A(t-0)$$

$$\frac{1}{\sqrt{p^3}} - \frac{1}{\sqrt{p_o^3}} = -\frac{3}{2} At$$

$$\frac{1}{\sqrt{p^3}} = \frac{1}{\sqrt{p_o^3}} - \frac{3}{2} At$$

De acuerdo a la teoría de las presiones parciales, los componentes de un gas colaboran proporcionalmente en su cantidad. Como podemos observar en la figura 1, el propano se evapora 7,47 veces mas rápido que el butano, por lo que su porcentaje disminuirá conforme se utilice el combustible. Cuando se llega a los 3,1 kg de producto, la totalidad de la composición es butano. Por tal motivo, para el análisis del evacuado de cilindros, haremos uso de una presión manométrica de 17 psig (figura 2).

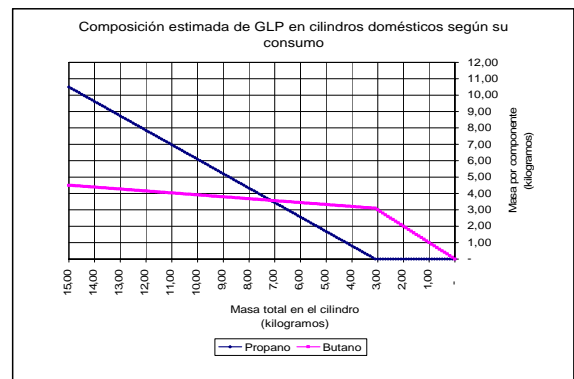


FIGURA 1. COMPOSICION DEL GLP EN CILINDROS DOMESTICOS SEGÚN SU CONSUMO

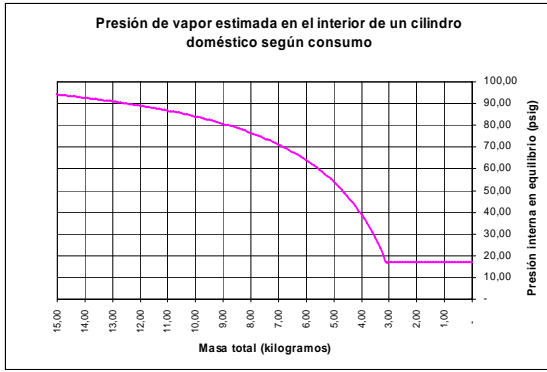


FIGURA 2. PRESION DE VAPOR ESTIMADA EN EL INTERIOR DE UN CILINDRO DOMESTICO SEGÚN CONSUMO

El valor de k correspondiente a las pérdidas menores se lo estima de acuerdo a la relación de las áreas de contracción y/o expansión a través de la válvula (ver figura 3). A la entrada de la válvula se considera la contracción del área de la sección del cilindro a la sección de la válvula, por lo que el valor de AR corresponde a $1,91E-5$, cuyo valor de k es de $0,5$; a la salida de la válvula se considera la expansión de la sección de la válvula a la sección de la manguera, cuya relación AR es $0,0054$, que corresponde a k igual a 1 . Como ambos factores afectan al mismo elemento y para la contracción y expansión se considera la velocidad más alta, se puede usar la suma de los factores en la fórmula deducida para el cálculo de la presión en la descarga.

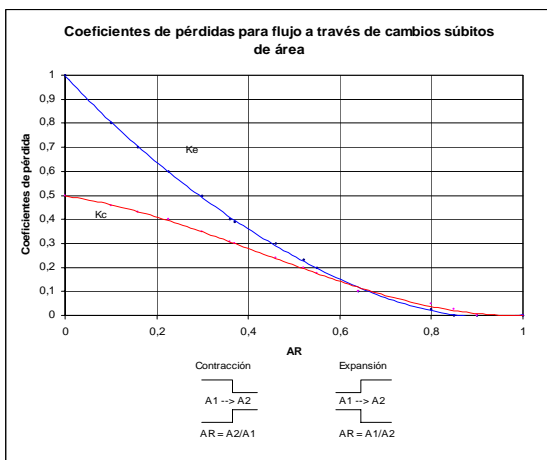


FIGURA 3. COEFICIENTE DE PERDIDA PARA FLUJO A TRAVES DE CAMBIOS SUBITOS DE AREA

El volumen del GLP en el cilindro es de $0,001718 \text{ m}^3$ considerando una densidad de 583 kg/m^3 .

Aplicando la ecuación deducida de la presión en el cilindro, encontraremos el tiempo necesario para evacuar el GLP liquido remanente.

Graficando las curvas correspondientes a la variación de presión y volumen desplazado de GLP líquido respecto al tiempo, podemos observar que a los 90 segundos se alcanza el objetivo deseado de trasegar $0,001718 \text{ m}^3$ de GLP liquido con una variación de casi 1 psig . Cabe anotar que una vez que el GLP liquido es trasvasado, el vapor en el interior del cilindro reducirá su presión hasta la presión de la línea, es decir, 0 psig .

Puede verificarse que a los 90 segundos se ha evacuado todo el GLP liquido del cilindro, por lo que posterior a ello el GLP vapor que se encuentra en el interior igualara su presión a la del existente en el sistema.

Si estimamos que el manejo del cilindro nos tomaría alrededor de 40 segundos, tenemos un total de 2 minutos 10 segundos por cilindro (ciclo de trabajo).

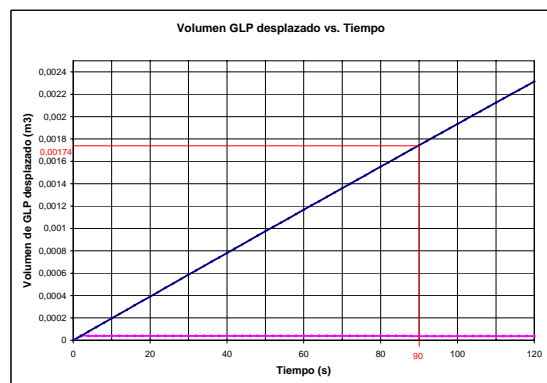


FIGURA 4. VOLUMEN DE GLP LIQUIDO DESPLAZADO EN FUNCION DEL TIEMPO.

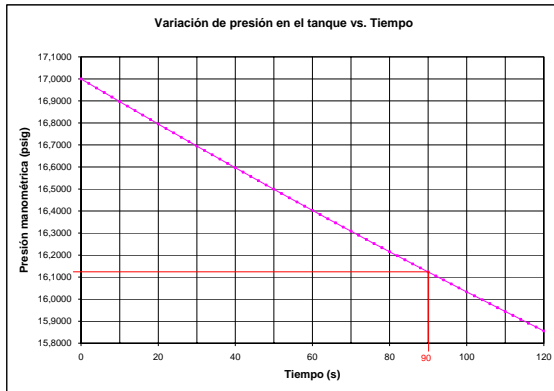


FIGURA 4. VARIACION DE PRESION EN EL TANQUE DURANTE EL TIEMPO DE TRASIEGO

De acuerdo al requerimiento del taller de 2,5 cilindros por minuto, se necesitarán:

$$\frac{2,5 \text{ cilindros}}{\text{minuto}} \times \frac{2,17 \text{ minutos}}{\text{ciclo}} = \frac{5,43 \text{ cilindros}}{\text{ciclo}}$$

Este resultado nos indica que serán necesarios 6 puestos por cada ciclo de trabajo de 2 minutos 10 segundos.

Diseño del banco de vaciado

Como puede observarse en las imágenes tomadas de las máquinas de evacuado, el trasiego de GLP residual de cilindros se puede realizar con la válvula hacia abajo, ya que se logra que la fase líquida sea trasvasada por gravedad, o con la válvula hacia arriba para evacuar el GLP en fase vapor, lo que requeriría mucha más energía para poder evaporar el líquido remanente, aumentando los costos operativos; además, nos encontraremos con problemas de autorefrigeración de los recipientes, lo cual representaría un problema adicional en el proceso de evacuado, a más del consiguiente envejecimiento del material del cilindro por los ciclos térmicos a los que se vería sujeto.

Se debe realizar una modificación en el diseño para colocar al cilindro en posición completamente invertida para facilitar su vaciado.

Si tomamos el modelo de la máquina volteadora para la evacuación de GLP líquido, nos daremos cuenta que para lograr el objetivo es necesario acortar la longitud del brazo neumático que mueve el cabezal que se ajusta sobre la válvula, así como modificar la base de la bancada para que permita la inversión completa del tanque.

Dimensionamiento de tuberías

Para dimensionar las tuberías que transportan el GLP líquido de los tanques a la tubería principal debemos considerar un diámetro que no genera pérdidas importantes. De acuerdo a los datos revisados en el punto 2.1.1 la sección mínima por la que atraviesa el GLP evacuado es de 0,0154 cm² (diámetro 0,7 mm) en la válvula; si consideramos este diámetro para las líneas de evacuación, generaría una restricción importante en la línea y ya no podríamos considerar el supuesto de que las pérdidas mayores son despreciables.

Considerando que a nivel comercial los elementos hidráulicos más comunes son de ½" de diámetro, haremos uso de accesorios y mangueras de esta medida para las líneas en mención.

Manteniendo la concepción de que el valor mínimo de la sección de la tubería colectora debe ser equivalente a la suma de las secciones de las tuberías que recibe, el diámetro interno de la tubería colectora debe ser de 1,23"; por lo general, las conexiones a los tanques son de 2", por lo que usaremos tubería de este diámetro. En función de estos valores, podemos observar que existe un sobre dimensionamiento del 260%, lo que nos permitiría ampliar la instalación hasta en 9 puestos más (15 puestos en total).



FIGURA 5. MÁQUINA VOLTEADORA DE CILINDROS LLENOS CON FUGAS PARA EVACUACIÓN DE GLP LÍQUIDO

Análisis termodinámico

Durante el trasvase del GLP el efecto no deseado es el de autorefrigeración el cual se da en el momento en el que existe un cambio de fase de líquido a vapor por la necesidad de absorción de energía del GLP.

Para evitar este efecto se debe garantizar que en las tuberías no se dará la vaporización de GLP, lo cual se puede hacer evitando que haya puntos bajos en el sistema de tuberías.

Para reducir la evaporación del GLP es factible aislar los elementos que contengan el GLP líquido para reducir la transferencia de calor.

Eliminación de efectos no deseados

Por el motivo mencionado, las tuberías de GLP que van desde las máquinas evacuadoras hasta el tanque colector deben tener pendiente negativa de manera que haya flujo por gravedad, la cual debe ser conectada en la parte superior del tanque colector.

En lo que se refiere a la tubería que va desde el tanque colector al compresor, esta se requiere que se conecte a la parte superior del tanque para evitar el posible ingreso de GLP

líquido a la cámara de compresión lo cual podría provocar la falla del equipo.

Dimensionamiento de tanque colector

El dimensionamiento del tanque colector se hace en función del tiempo de autonomía que se desea en el sistema. Considerando la producción diaria de 1200 cilindros a razón de 1 kilogramo de GLP por recipiente evacuado, es necesario un tanque cuya capacidad mínima sea de 1200 kilogramos de GLP, es decir, 2,1 metros cúbicos de producto. Como la norma exige que los tanques estacionarios no excedan el 85% de su capacidad de agua, el tanque debe tener un volumen interno mínimo de 2.4 metros cúbicos. Para este caso se usará un tanque de 3 metros cúbicos de capacidad de agua.

Cabe considerar que la estimación del volumen del tanque es muy conservadora ya que no se está considerando el volumen de GLP vapor desplazado por el compresor, lo que incrementa de una manera importante la autonomía del sistema.

Selección de equipo de trasvase

Para la selección del equipo de vacío, debemos recordar que el GLP al evaporarse ocupa un espacio aproximado de 200 veces su volumen en estado líquido.

De acuerdo al cálculo efectuado para la obtención del número de puestos necesarios para alcanzar el objetivo de 1200 cilindros diarios, se requieren 90 segundos para evacuar 6 cilindros domésticos (6 kilogramos de GLP líquido), equivalente a 4 kilogramos por minuto. Esto implica un equivalente de 6,86 litros por minuto de GLP líquido (0,412 metros cúbicos por hora).

Consultando la tabla de selección de compresores de la compañía Blackmer, se puede verificar que el compresor de GLP más pequeño que posee es el modelo LB161, acoplado a un motor de 2 KW y 425 RPM, con el cual se pueden transferir 186 litros de GLP líquido por minuto. Su desplazamiento de pistón es de 240 litros por minuto (14,4 metros cúbicos por hora). El diámetro de tubería a su entrada es de 2" y a la salida de 1" (se recomienda que para longitudes superiores a 30 metros se aumente el diámetro de la tubería para reducir las pérdidas de presión).

Se podría considerar que el GLP se evapora en su totalidad, caso en el que requeriría utilizar un compresor con capacidad de 1200 litros por minuto (72 metros cúbicos por hora) de desplazamiento de vapor.

En el mercado son pocos los proveedores que proporcionan equipos con características antideflagrantes, haremos uso del compresor mencionado en el párrafo anterior con la intención de desplazar únicamente el GLP líquido y no de evaporarlo, ya que en el segundo caso tendríamos problemas de autorefrigeración y mayor consumo de energía. Para ello, es necesario instalar un interruptor automático de presión para hacer que el compresor trabaje en un rango de presiones (entre 0 y -5 psig), evitando que trabaje por largos periodos, así como la posible reducción de presión excesiva que causaría la implosión del tanque colector.

ANÁLISIS DE COSTOS

Inversión inicial

Para la instalación del sistema de evacuación de GLP residual en cilindros domésticos debemos considerar los siguientes elementos:

- o Transportadores de cadena,
- o Banco de vaciado
- o Tuberías
- o Tanque de almacenamiento temporal y sus accesorios
- o Instalaciones antideflagrantes

En vista de que no se encuentra definida ninguna ubicación física para este proyecto, se especificaran dimensiones estimadas de acuerdo a los datos existentes.

Estimando un espacio físico de 225 metros cuadrados, necesarios para almacenar 1200 cilindros para una jornada (distribuido en 4 bloques de 15 x 10 x 2 unidades), se requerirán alrededor de 60 metros de transportador de cadena para cilindros.

A partir de esta información, se procede a estimar los valores de los equipos y su instalación, mostrados en la tabla 1.

Resumen de rubros	
Transportador de cadena (por metro lineal)	35.865,60
Banco de evacuado (par de puestos)	4.104,00
Tuberías	775,77
Tanque de almacenamiento temporal y accesorios	5.380,00
Compresor	12.650,00
Instalaciones antideflagrantes	4.200,00
Total inversión inicial	62.975,37

TABLA 1. RESUMEN DE RUBROS

Costos operativos

Los costos operativos se refieren a

todos los gastos incurridos para mantener el funcionamiento del sistema de recuperación de GLP residual:

- ξ Mano de obra
- ξ Mantenimiento del sistema
- ξ Energía eléctrica

Se requerirán dos personas por turno. Si consideramos un costo de US\$ 1,20 por hora-hombre, implicaría un costo de US\$ 2,40 por hora laborada. Asumiendo que se laborara 360 días en el año, en jornadas de 8 horas diarias, se tendría un total de 5760 horas hombre, lo que equivale a un valor de US\$ 6.912,00 anuales.

En lo que se refiere al mantenimiento, todos los elementos, a excepción del compresor, no requieren mayor mantenimiento. Normalmente un compresor con las características seleccionadas requerirá un mantenimiento a las 8.000 horas, lo que correspondería aproximadamente a 3 años. El costo se aproximaría a US\$ 2.000,00. Se puede adicionar un valor de US\$ 500,00 por trabajos de pintura en todo el sistema.

Así mismo, el consumo energético se reduce al compresor, el cual tiene una potencia de 2 kW, por lo que se estima un consumo de 2920 KW-hr al año (funcionamiento de 4 horas por día). Si el valor del KW-hr industrial (para grandes consumidores) es de \$ 0,058, anualmente habrá que pagar un valor de US\$ 169,36. Asumiendo un aumento del 25% por impuestos, la tasa será de US\$ 211,70.

Considerando todos los valores anteriormente mencionados, y asumiendo que el GLP recuperado (316,8 TM) sea vuelto a envasar en cilindros domésticos, con un ingreso de US\$ 0,10 por kilo, se obtiene un flujo de caja cuya Tasa Interna de

Retorno (TIR) resultante para 6 años es del 31%.

Se ha utilizado como período de operación del sistema 6 años, siendo muy conservador el cálculo considerando que el tiempo de vida contemplada para maquinarias es de 10 años.

Como podemos observar, el GLP recuperado y vuelto a envasar genera ingresos superiores a la inversión y los gastos de operación después del primer año, lo que indica que el proyecto es plenamente viable. Sin embargo, hay que considerar que en la actualidad el valor comercial del GLP para uso doméstico se encuentra subsidiado, por lo que las condiciones que se encuentran en este documento pueden variar notablemente.

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Design and Construction of LPG Installations, API Standard 2510, Eighth Edition, May 2001
2. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Electrical Installations in Petroleum Processing Plants, API Recommended Practice 540, Fourth Edition, April 1999
3. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommend Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Division 1 and Division 2, API recommended Practice 500, Second Edition, November 1997, Reaffirmed 11/2002
4. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended Practices for Machinery Installation and Installation Design, API Recommended Practice 686, First Edition, April 1996
5. BECCO J. L. LORENZO, Los G.L.P. (Los gases licuados del petróleo), REPSOL YPF

6. GUERRA CHAVARINO EMILIO,
GUERRA SORIANO EMILIO,
Instalaciones de Depósitos Fijos para
GLP - Manual Práctico, 3ra Edición,
Editorial CONAIF

7. JONES J. B., DUGAN R. E.,
Ingeniería Termodinámica, Primera
Edición
Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

8. NATIONAL FIRE PROTECTION
ASOCIATION, NFPA 58: Código de
Gas LP, Edición 1998

9. OCHOA JOSÉ, "Análisis y diseño del
cambio de un proceso industrial a
Diesel por otro a GLP" (Tesis, Facultad
de Ingeniería en Mecánica y Ciencias
de la Producción, Escuela Superior
Politécnica del Litoral, 2001)