

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL
EN LA EFICIENCIA DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE GLP EN CILINDROS
DE 10 kg Y 45 kg EN LA REGIÓN CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. ANNY EUGENIA GUZMAN COLLANTES

Br. MARI LUZ HERMOZA MAMANI

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO PETROQUÍMICO**

ASESOR:

Dr. ANTONIO RAMIRO JESÚS BUENO LAZO

FINANCIADO POR CONVENIO ARES

CUSCO – PERU

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor**ANTONIO RAMIRO JESÚS BUENO LAZO.....
 quien aplica el software de detección de similitud al
 trabajo de investigación/tesis titulada:
EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL
EN LA EFICIENCIA DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE GLP EN
CILINDROS DE 10 kg Y 45 kg EN LA REGIÓN CUSCO

Presentado por: ANNY EUGENIA GUZMAN COLLANTES DNI N° 77342618;
 presentado por: MARI LUZ HERMOZA MAMANI DNI N°: 71821834
 Para optar el título Profesional/Grado Académico deINGENIERO PETROQUÍMICO.....


Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ...0.1... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de2.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, .1.1. deMAYO..... de 20.26.....



Dr. Antonio Ramiro Jesús Bueno Lazo
 CIP. 46442
 Firma

Post firma..ANTONIO.RAMIRO.JESÚS.BUENO.LAZO

Nro. de DNI.....23878046.....

ORCID del Asesor.....0000-0002-6415-3028.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:**27259:588985496.....

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LA EFICIENCIA DEL CONSUMO ENERGÉTICO...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:588985496

Fecha de entrega

11 may 2026, 9:57 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

11 may 2026, 10:07 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LA EFICIENCIA DEL CONSU....pdf

Tamaño del archivo

1.9 MB

145 páginas

31.003 palabras

156.822 caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Sr. Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos:

En cumplimiento con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos vigente de nuestra Facultad, tenemos el honor de presentar la tesis intitulada **“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LA EFICIENCIA DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE GLP EN CILINDROS DE 10 kg Y 45 kg EN LA REGIÓN CUSCO”** con la finalidad de optar al Título Profesional de Ingeniero Petroquímico.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mi querida madre, Rosa Mamani, y a mi hermana, Judith Hermoza, pilares fundamentales de mi vida, cuya confianza incondicional y apoyo constante hicieron posible alcanzar este logro.

A mis tíos, Nelly, Santos y Helen, y a mi sobrino Sergio, por su cariño y por ser mi soporte emocional en todo momento.

Mari Luz Hermoza Mamani

A Dios, fuente de toda sabiduría, por darnos el don de la ciencia y permitirnos llegar hasta aquí y recordarnos que sus tiempos son perfectos, le dedico esta tesis con el corazón lleno de gratitud.

A mis padres Darhuin y Lucila mi tesoro más preciado, a mi hermana Soybell y sobrina Lucy por ser mis compañeras en este camino, a toda mi familia y amigos, por su apoyo incondicional y aliento para poder culminar este proyecto de tesis.

Anny Eugenia Guzmán Collantes

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que nos acompañaron durante el desarrollo de la presente investigación.

Agradecemos a todos nuestros docentes y, de manera especial, a nuestro asesor, el Dr. Antonio Bueno Lazo, quien estuvo siempre disponible para resolver nuestras dudas y consultas, brindándonos su orientación y apoyo académico a lo largo de este proceso.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a nuestra alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), por habernos acogido en sus aulas y brindarnos valiosas experiencias tanto en el ámbito profesional como personal.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo constante y motivación durante este proceso.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la temperatura ambiental en la capacidad de vaporización del Gas Licuado de Petróleo (GLP) remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg en la región Cusco. El estudio se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, aplicando un análisis termodinámico basado en el balance de energía y los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Se evaluó el contenido de GLP remanente, su composición y la capacidad de vaporización bajo diferentes condiciones ambientales correspondientes a zonas de alta, media y baja altitud de la región Cusco. Los resultados evidencian que en invierno los cilindros de 10 kg presentan un remanente promedio de 0.50 kg y los cilindros de 45 kg presentan un remanente promedio de 4.3 kg. Asimismo, se determinó que el remanente se incrementa en un 54.3 % en invierno con respecto a verano, demostrando la influencia significativa de la temperatura ambiental en el proceso de vaporización del GLP. El análisis cromatográfico identificó una predominancia de butano en el remanente, alcanzando valores de hasta 99.2 %. Adicionalmente, el valor económico de GLP remanente alcanza aproximadamente s/. 1 042 992.00 mensuales que retorna hacia las envasadoras, el cual se traduce en pérdidas económicas para el usuario final. Se concluye que la capacidad de vaporización del GLP remanente está directamente condicionada por la temperatura ambiental y la composición, recomendándose mezclas con mayor proporción de propano (80/20, 90/10 y 100 %) para garantizar una adecuada vaporización en las condiciones climáticas de la región Cusco.

Palabras clave: GLP, Vaporización, Temperatura ambiental, Remanente, Transferencia de calor.

ABSTRACT

The present research aims to determine the influence of ambient temperature on the vaporization capacity of the remaining Liquefied Petroleum Gas (LPG) in 10 kg and 45 kg cylinders in the Cusco region. The study was conducted using a quantitative approach, applying a thermodynamic analysis based on the energy balance and the mechanisms of heat transfer by conduction, convection, and radiation. The remaining LPG content, its composition, and the vaporization capacity were evaluated under different environmental conditions corresponding to high, medium, and low altitude areas of the Cusco region. The results show that in winter, the 10 kg cylinders have an average residual of 0.50 kg and the 45 kg cylinders have an average residual of 4.3 kg. Likewise, it was determined that the remnant increases by 54.3% in winter compared to summer, demonstrating the significant influence of ambient temperature on the LPG vaporization process. The chromatographic analysis identified a predominance of butane in the residue, reaching values of up to 99.2%. Additionally, the economic value of the remaining LPG reaches approximately s/. 1,042,992.00 monthly that returns to the bottling plants, which translates into economic losses for the end user. It is concluded that the vaporization capacity of the remaining LPG is directly conditioned by the ambient temperature and composition, with mixtures having a higher proportion of propane (80/20, 90/10, and 100%) recommended to ensure adequate vaporization under the climatic conditions of the Cusco region.

Keywords: LPG, Vaporization, Ambient temperature, Residual, Heat transfer.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
CONTENIDO	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de tablas	xii
GLOSARIO	xiv
CAPITULO I GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Problema de investigación.....	5
1.3.1 Problema principal	5
1.3.2 Problemas específicos	5
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Justificación e importancia	6
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes.....	7
2.2.1 Internacional.....	7

2.1.2. Nacional	9
2.2. Bases teóricas	9
2.2.1 Gas Licuado de Petróleo (GLP)	9
2.2.2 Propiedades físico-químicas del GLP	10
2.2.3 Poder Calorífico	12
2.2.4 Punto de Ebullición	13
2.2.5 Presión de vapor	13
2.2.6 Calor de Vaporización	14
2.2.7 Factor de Llenado:	14
2.2.8 Consumo	14
2.2.9 Contaminación:	15
2.2.10 Temperatura ambiental	16
2.2.11 Capacidad de vaporización	17
2.2.12 Caudal másico	17
2.2.13 Transferencia de Calor	18
2.2.14 Recipiente Portátil de GLP (Cilindro de GLP)	20
2.2.15 Determinación de la capacidad de vaporización del GLP	21
2.2.16 Transferencia de calor en sistemas cilíndricos y esféricos	28
2.2.17 Relación de Hilpert	33
2.2.18 Numero de Reynold	34
2.3 Marco conceptual	35
2.3.1 Contenido neto de GLP	35
2.3.2 Contenido Nominal del GLP	35

2.3.3 Masa bruta del recipiente	35
2.3.4 Masa del Recipiente	35
2.3.5 Tara del Recipiente	35
2.3.6 Remanente en cilindros de GLP.....	35
2.4 Hipótesis	36
2.4.1 Hipótesis General.....	36
2.4.2 Hipótesis Especificas	36
CAPITULO III MATERIALES Y METODOS	37
3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación.....	37
3.1.1. Tipo de investigación	37
3.1.2. Nivel de la investigación	37
3.1.3. Diseño de investigación	37
3.2. Muestra.....	38
3.3. Materiales y equipos.....	38
3.4. Identificación de variables.....	40
3.4.1 Variable Independiente	40
3.4.2 Variable Dependiente.....	40
3.4.3 Operacionalización de variables	40
3.5. Desarrollo de la investigación	42
3.6 Metodología:.....	43
3.6.1. Recolección de la muestra.....	45
3.6.2. Análisis de remanente de GLP en laboratorio de cromatografía de gases	49
3.6.3. Determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente.....	53

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSION	63
4.1 Contenido remanente promedio de GLP de los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg.	64
4.2 Composición del GLP remanente de los cilindros de retorno	68
4.2.1 Resultados del análisis cromatográfico del GLP remanente.....	68
4.3 Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de retorno.....	70
4.3.1 Calor latente de vaporización.....	73
4.3.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie cilíndrica	76
4.3.3 Coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie esférica	77
4.3.4 Coeficiente de transferencia de calor por radiación	78
4.3.5 Transferencia de calor en la superficie cilíndrica.....	78
4.3.6 Transferencia de calor en la superficie esférica	78
4.3.7 Capacidad de vaporización del remanente de GLP.....	79
4.4 Composición de GLP para tener un consumo energético eficiente en la región Cusco	89
4.4.1 Propuesta de composición de GLP según zona climática en la región Cusco	95
4.5 Análisis de costo.....	99
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	103
ANEXOS.....	108

Lista de Figuras

Figura 1: <i>Intercambio de temperatura entre el medio ambiente y el cilindro con GLP</i>	22
Figura 2: <i>Transferencia de calor para la geometría cilíndrica</i>	31
Figura 3: <i>Transferencia de calor en geometría esférica</i>	32
Figura 4: <i>Diagrama PFD de dispositivo de muestreo de GLP remanente</i>	39
Figura 5: <i>Diagrama de bloques de la metodología de investigación</i>	42
Figura 6: <i>Cilindros de retorno de 10 kg de GLP</i>	47
Figura 7: <i>Pesado de cilindros de retorno de GLP</i>	48
Figura 8: <i>Accesorio adaptado para la toma de muestra de GLP</i>	50
Figura 9: <i>Muestras de GLP en cooler para su respectivo transporte</i>	51
Figura 10: <i>Trasvasado del GLP de los muestreadores a los viales</i>	52
Figura 11: <i>Toma de muestra de los viales que están contenidos con muestras de GLP para pasar al cromatógrafo de gases</i>	53
Figura 12: <i>Diagrama de bloques de la metodología para determinar la capacidad de vaporización del GLP</i>	56
Figura 13: <i>Porcentaje equivalente de GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg según estación</i>	66
Figura 14: <i>Esquema del balance de energía para la determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg</i>	71
Figura 15: <i>Capacidad de vaporización para cilindros de GLP</i>	90
Figura 16: <i>Porcentaje de llenado vs variación de la presión</i>	111
Figura 17: <i>Contenido de remanente GLP promedio en cilindros de 10 kg, en invierno y verano</i>	126

Figura 18: *Contenido de remanente GLP promedio en cilindros de 45 kg, en invierno y verano*

..... 126

Lista de tablas

Tabla 1: <i>Propiedades físico químicas del GLP</i>	12
Tabla 2: <i>Capacidad de consumo de GLP de diversos artefactos</i>	15
Tabla 3: <i>Factor de llenado en función del porcentaje de llenado</i>	25
Tabla 4: <i>Peso atómico, peso molecular, densidad de propano y butano.</i>	26
Tabla 5: <i>Temperatura de ebullición, crítica y calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición del propano y n-butano.</i>	28
Tabla 6: <i>Coeficientes de la correlación de Hilpert.</i>	33
Tabla 7: <i>Operacionalización de variables</i>	41
Tabla 8: <i>Provincias de la región Cusco según altitud y zonificación</i>	44
Tabla 9: <i>Rango de temperatura mensual promedio en la zonas A, M y B de la region Cusco.</i> .	45
Tabla 10: <i>Tamaño de muestra para recipientes portátiles</i>	46
Tabla 11: <i>Secuencia metodológica para la determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente.</i>	54
Tabla 12: <i>Data, variación de la presión en función del porcentaje de llenado</i>	59
Tabla 13: <i>Condiciones atmosféricas para invierno</i>	61
Tabla 14: <i>Condiciones atmosféricas para verano</i>	62
Tabla 15: <i>Contenido de remanente promedio para verano</i>	64
Tabla 16: <i>Contenido de remanente promedio para invierno</i>	65
Tabla 17: <i>Composición del GLP residual de los cilindros de retorno de las diferentes zonas.</i> .	69
Tabla 18: <i>Propiedades del aire para la zona Alta en la temporada de invierno</i>	75
Tabla 19: <i>Características geométricas de los cilindros de 10 kg y 45 kg.</i>	76

Tabla 20: <i>Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de 10 kg según zona, temporada y condición térmica.</i>	83
Tabla 21: <i>Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de 45 kg según zona, temporada y condición térmica.</i>	85
Tabla 22: <i>Escenarios de consumo de GLP, capacidad de vaporización y efecto térmico en cilindros de GLP de 10 kg y 45 kg</i>	87
Tabla 23: <i>Datos termodinámicos de presión de vapor.</i>	96
Tabla 24: <i>Precio reportado por los operadores de los locales de venta GLP</i>	99
Tabla 25: <i>Distribución de GLP líquido (% de llenado y peso)</i>	110
Tabla 26: <i>Variación de la presión en función del porcentaje de llenado de GLP</i>	112

GLOSARIO

AS/NZS: Australian/New Zealand Standard.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CEPSA: Compañía Española de Petróleos S.A.

°C: Grados Celsius.

ERCUE: Encuesta Residencial de Consumo y Usos de Energía.

GC-MS: Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

GLP: Gas Licuado de Petróleo.

kg/h: Kilogramos por hora.

NTP: Norma Técnica Peruana.

OSINERGMIN: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

P-V-T: Relación Presión–Volumen–Temperatura.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El gas licuado de petróleo (GLP) se ha posicionado como una fuente de energía primordial en el Perú, especialmente en regiones como Cusco, donde las condiciones geográficas y climáticas demandan soluciones energéticas versátiles y accesibles. Este combustible, compuesto principalmente por una mezcla de propano y butano. Según la Norma Técnica Peruana (NTP 321.007), el GLP también puede contener trazas de propileno, iso-butano y butileno. La particularidad de estos compuestos radica en su capacidad de mantenerse en estado líquido bajo presión moderada a temperatura ambiente, lo que facilita su almacenamiento y transporte (NTP 321.007, 2002).

Debido a la alta volatilidad de estos componentes, el GLP presenta una variedad de usos en el campo automotor, doméstico e industrial, siendo una fuente de energía versátil y eficiente. Sin embargo, esta volatilidad esta intrínsecamente ligada a su composición y a las condiciones de temperatura ambiental la misma que se ve comprometida cuando las condiciones climáticas no son las óptimas. La NTP 321.007 sugiere que su uso es recomendable cuando las temperaturas ambientales son: muy frío, muy cálido, frío y moderado, pero no detalla los rangos de temperatura a los cuales son aplicables dichas composiciones.

En el Perú, se ha adoptado una composición aproximadamente estándar de GLP comercial consistente en una mezcla de 60% propano y 40% butano, sin considerar las marcadas diferencias climáticas que existen entre las diversas regiones del país. Esta estandarización, si bien simplifica la producción y distribución, ignora los desafíos operativos en zonas de clima frío como Cusco.

En la actualidad, esta situación se traduce en un problema concreto: en la región Cusco, se ha observado que los cilindros de GLP que retornan a las plantas para su posterior envasado contienen GLP remanente no utilizado en su totalidad por los usuarios. Este fenómeno, cada vez más frecuente en la región Cusco, sugiere que el butano, cuyo punto de ebullición se encuentra cercano a los 0 °C, permanece en estado líquido dentro del cilindro debido a las bajas temperaturas ambientales, impidiendo su correcta vaporización y por ende su aprovechamiento energético. Esta ineficiencia no solo representa una pérdida económica para los usuarios, quienes pagan por un combustible que no pueden consumir en su totalidad, también genera potenciales riesgos de seguridad y un impacto ambiental negativo.

Ante este panorama, la presente investigación busca analizar la influencia de la temperatura ambiental en el consumo del GLP en condiciones reales con el fin de ajustar la composición de la mezcla de GLP para optimizar su uso en climas fríos. En este sentido, se propone desarrollar una composición de GLP específica para la región de Cusco, que maximice la eficiencia del consumo, minimice el desperdicio de combustible y contribuya a la mejora de la calidad de vida de los usuarios.

1.2 Planteamiento del problema

Descripción del problema:

El gas licuado de petróleo (GLP) se ha convertido en un elemento indispensable en la vida cotidiana de miles de familias y empresas en la región de Cusco. Sin embargo, su uso eficiente se ve comprometido por una problemática, por la presencia de remanente de GLP en los cilindros de retorno. Este fenómeno, aparentemente simple, esconde una serie de factores técnicos, económicos y sociales que merecen un análisis profundo.

Como se mencionó en la introducción, la composición estándar del GLP comercializado en el Perú no considera las particularidades climáticas de regiones como Cusco. Según la Norma Técnica Peruana (NTP 321-007, 2002), si bien establece pautas generales para el uso de GLP en función de las condiciones climáticas, carece de la precisión necesaria para orientar a los proveedores y envasadoras en la adaptación de la composición del combustible a las condiciones locales.

En ese sentido, la NTP 321-007 hace referencia a la necesidad de ajustar las mezclas de GLP al clima, mencionando de manera general “el mejor” uso de diferentes composiciones (Propano comercial, Butano comercial y mezclas de Propano-Butano), en función de su composición volumétrica; además proporciona pautas referenciales al usuario y a los productores para seleccionar el GLP según el clima donde será utilizado, vinculándolo con la composición y el poder calorífico.

En el anexo 1 “mezclas propano y butano para uso comercial (GLP) concorde al clima”, aborda las referencias para la aplicación en climas a grandes rasgos (Muy frío, Muy Cálido, Frío y Moderado) y presenta una limitación crucial: no especifica altitudes promedio ni rangos de temperatura ambiental promedio por regiones ni por épocas de año. Esta falta de especificidad incide directamente en que los proveedores y las plantas envasadoras no comercialicen una mezcla de GLP adecuada con las condiciones climáticas locales y estacionales.

Según Lopez, (2001) la vaporización de los cilindros de GLP, “dentro de un cilindro de GLP, la fase líquida se encuentra en equilibrio con su fase vapor es decir a cada temperatura le corresponde una presión de equilibrio. Este equilibrio únicamente se altera al variar la temperatura ambiente y/o al realizarse una toma de gas”. Este factor crítico no está contemplado en la selección de la composición del GLP proveniente de las envasadoras de la región Cusco;

por ejemplo la composición de propano y butano es: propano 50% – 90% aproximadamente porcentaje en volumen y butano 10% - 50% aproximadamente porcentaje en volumen como se evidencia en la ficha técnica de Pluspetrol del anexo 7; propano 50% – 70% aproximadamente porcentaje en volumen y butano 50% - 30% aproximadamente porcentaje en volumen para Limagas del Anexo 8, según el anexo 1 estos son los rangos de composición que establece la norma NTP 321.007 pero estas empresas no especifican la composición exacta a la cual expenden el GLP para la región Cusco u otra región, ofreciendo solo información general en sus fichas técnicas.

Según Becco, (1992), el cambio de estado de líquido a gas o vapor (gas mientras es no saturado y vapor cuando es saturado) exige la absorción de una determinada cantidad de calor, llamado calor latente de vaporización y es variable con la temperatura. De esta manera la evaporación se hace de forma tumultuosa desde el mismo seno del líquido al que se llama ebullición y se hace para cada temperatura de líquido según la propiedades fisicoquímicas el butano ebulle a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el propano a $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ y según SENAMHI la temperatura ambiental promedio más baja en la región de Cusco llega a los $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ siendo los meses más críticos junio y julio, consecuentemente si la temperatura ambiental es baja menor será el intercambio de temperatura con el GLP, por tanto menor será la capacidad de vaporización del cilindro es por ello que a esta temperatura se produce la ebullición del propano mas no del butano, consumiéndose más propano en lugar de la mezcla de GLP; debido a lo expuesto se tiene como consecuencia que en algunas zonas de la región de Cusco no se realice el uso eficiente de GLP contenido en los cilindros de 10 kg y 45 kg, quedando contenido de GLP en los cilindros de retorno. Por otra parte, los aparatos (cocinas de 2 y 4 hornillas) que funcionan con GLP presentan en sus fichas técnicas (como se muestra en los anexos 11, 12 y 13) un mínimo

requerido de consumo energético para su funcionamiento, a lo cual se presume que el remanente de GLP no cumple con este requerimiento, por tal motivo los aparatos dejan de funcionar, siendo requerido un cambio de cilindro y esto se traduce en pérdidas económicas para los hogares, dado que se estaría devolviendo parte del GLP no utilizado a las envasadoras.

1.3 Problema de investigación

1.3.1 Problema principal

- ¿Cómo influye la temperatura ambiental en la capacidad de vaporización del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg de acuerdo con las provincias de la región Cusco?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cuánto contenido de remanente queda en los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg de GLP de acuerdo con las provincias de la región Cusco?
- ¿Cuál es la composición del remanente de los cilindros de retorno de GLP de 10 kg y 45 kg de acuerdo con las provincias de la región Cusco?
- ¿Cuál sería la composición ideal de GLP, para cumplir con el consumo total por los aparatos de GLP de acuerdo con las provincias de la región Cusco?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Determinar la influencia de la temperatura ambiental en la capacidad de vaporización del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg de acuerdo con las provincias de la región Cusco.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el contenido de remanente en los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg de acuerdo con las provincias de origen de la región Cusco.
- Determinar la composición del remanente de los cilindros de retorno de GLP de acuerdo con las provincias de origen de la región Cusco mediante cromatografía de gases.

- Determinar la composición ideal de GLP para cumplir con el consumo total por los aparatos de GLP de acuerdo con las provincias de la región Cusco.

1.5 Justificación e importancia

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es un combustible versátil utilizado en diversas aplicaciones, incluyendo cocinas, calefacción y generación de energía. En la región Cusco, el GLP es una fuente de energía importante, especialmente porque la red de gas natural no está disponible. Es por ello que el acceso a la energía en la región Cusco puede ser costosa y limitada.

En la región Cusco existen cinco plantas envasadoras autorizadas: Solgas S.A., Llamagas S.A. – planta Cusco, Oxisol S.A.C., Lima gas S.A., VJ gas S.A.C., como se muestra en el registro de hidrocarburos de la página oficial Osinergmin (Osinergmin, 2025).

Este estudio técnico es relevante debido a que tiene como finalidad demostrar como la temperatura ambiental afecta significativamente en la capacidad de vaporización del GLP en los cilindros domésticos, lo que genera un aumento en los costos de energía para los hogares, especialmente durante las temporadas frías. Por ello es requerido el análisis de la influencia de la temperatura ambiental en la capacidad de vaporización del GLP en la región Cusco.

Los resultados de la investigación pueden contribuir a mejorar las prácticas y normas en la industria debido a que las normas vigentes no especifican la composición (propano/butano) a la cual se debe seleccionar la mezcla de GLP para las distintas temperaturas ambientales promedio de las provincias de la región y menos a nivel nacional.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.2.1 Internacional

Venegas & Ayabaca, (2019) en el artículo “Análisis del almacenamiento en sistemas de gas licuado de petróleo: tanques estacionarios vs. cilindros” realizaron un estudio sobre el GLP remanente en cilindros devueltos por usuarios comerciales e industriales en Ecuador y verifica la seguridad de las instalaciones según la norma técnica vigente. Los resultados muestran que el GLP remanente en cilindros de 15 kg: es 3.82 kg/cilindro (25.49%) y en cilindros de 45 kg: es 9.69 kg/cilindro (21.54%), teniendo como conclusión que la devolución de GLP remanente en cilindros es significativa, lo que puede indicar un desperdicio de recursos, la seguridad en las instalaciones de GLP es un tema importante, y algunos usuarios no cumplen con los parámetros establecidos y que los tanques estacionarios pueden ser una opción más segura y económica que los cilindros para almacenar GLP.

Zainal & Azeman, (2010) en el artículo “Efecto de la temperatura ambiente sobre el comportamiento del gas licuado de petróleo durante el proceso de agotamiento” realizaron un estudio sobre cómo la temperatura circundante afecta la cantidad de residuos de GLP en cilindros de almacenamiento. Realizaron experimentos a temperaturas circundantes de 10 °C a 35 °C y analizaron la distribución térmica radial y axial dentro del cilindro teniendo como resultados que la operación de agotamiento de GLP a 25 °C o superior reduce significativamente los residuos de GLP también determinaron que el calor sensible necesario para la evaporación se deriva principalmente en la dirección axial en las regiones adyacentes a la pared interna del cilindro

Concluyendo que la temperatura circundante es un factor que influye en la reducción de residuos de GLP en cilindros de almacenamiento. Lo que incide en la mejora de la eficiencia del uso de GLP en sectores domésticos y residenciales. El objetivo de este estudio es proporcionar una perspectiva exhaustiva sobre el tema, de manera similar a la mitigación del impacto ambiental vinculado a los residuos de gas licuado de petróleo (GLP) y la optimización del diseño y funcionamiento de sistemas de almacenamiento de este gas.

Por consiguiente, se recomiendan tener en cuenta la temperatura adyacente en el diseño y el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP); realizar estudios adicionales para explorar otros factores que influyen en los residuos de GLP y desarrollar estrategias para minimizar los residuos de GLP en diferentes condiciones climáticas.

Vargas, (2008) en su tesis titulada "Adaptación tecnológica de una máquina recuperadora GLP residual en tanques domésticos" diseñó una máquina que recupera el GLP residual de los cilindros domésticos, esta medida contribuye a la reducción de las emisiones de gas licuado de petróleo (GLP) al medio ambiente y minimiza la probabilidad de accidentes debido a atmósferas explosivas.

La composición del gas licuado de petróleo (GLP) en los cilindros domésticos se muestra, a medida que se consume el propano se evapora 7.47 veces más rápido que el butano lo que implica que, con el uso del combustible el porcentaje de propano decrece y el de butano se incrementa. Al alcanzar los 3.1 kg de producto, la composición total del producto es butano. Además, se examina la presión de vapor en el interior de un cilindro doméstico en relación con la masa total del gas licuado de petróleo (GLP), observándose que la presión interna experimenta una disminución conforme se consume el gas GLP, alcanzando un equilibrio a medida que el contenido de propano disminuye y el butano se convierte en el componente principal. Los

resultados muestran que la implementación del sistema de recuperación de GLP es viable y puede generar ingresos a mediano plazo, además de mejorar las condiciones laborales y minimizar los riesgos de accidentes.

2.1.2. Nacional

Portales, (2020) en su tesis “Diseño de un regulador de baja presión para determinar el peso exacto de gas en los cilindros de uso doméstico de 10 kg”, elaboró un regulador de baja presión equipado con un sistema de medición para cuantificar el peso exacto del gas que las distribuidoras suministran a los usuarios que utilizan Gas Licuado de Petróleo (GLP) en cilindros de 10 kg.

La concepción del regulador se fundamenta en las directrices de la Norma Técnica Peruana 350.074, que estipula los elementos, materiales y presiones de trabajo. Se empleó el método de diseño VDI 2221, examinando los reguladores vigentes en el mercado y proponiendo mejoras para la creación de un producto innovador. Las propuestas fueron objeto de evaluación técnica y económica, y se llevaron a cabo cálculos y simulaciones con el objetivo de validar el diseño propuesto.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es un combustible conformado por una mezcla de propano comercial y butano comercial, cuya volatilidad depende directamente de su composición. De acuerdo con la Norma Técnica Peruana NTP 321.007 (2002), su uso resulta más recomendable en condiciones de temperatura ambiental intermedia, ya que estas favorecen su adecuada vaporización.

2.2.1.1 Propano comercial

El propano comercial es un combustible gaseoso compuesto mayoritariamente por propano (C_3H_8) y, en menor proporción, por propileno (C_3H_6), dependiendo de su origen y proceso de refinación. Se caracteriza por poseer una alta presión de vapor y una elevada volatilidad, lo que le permite vaporizarse eficientemente a bajas temperaturas ambientales. Esta propiedad hace que el propano sea especialmente adecuado para su uso en regiones con climas fríos, donde la vaporización del combustible puede verse limitada por condiciones térmicas adversas, (NTP 321.007, 2002).

2.2.1.2 Butano comercial

El butano comercial está conformado por una mezcla de butano (C_4H_{10}), isobutano (C_4H_{10}) y butileno (C_4H_8), cuyas proporciones varían según la fuente de producción. A diferencia del propano, el butano presenta una menor presión de vapor y, por tanto, una volatilidad reducida, lo que limita su capacidad de vaporización a bajas temperaturas, (NTP 321.007, 2002).

En consecuencia, el uso del butano comercial es más recomendable en condiciones de temperatura ambiental elevada, donde la energía térmica disponible favorece su cambio de fase de líquido a gas. En ambientes fríos, una elevada proporción de butano en el GLP puede generar deficiencias en la vaporización, afectando negativamente la estabilidad del suministro y la eficiencia del consumo energético.

2.2.2 Propiedades físico-químicas del GLP

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), en condiciones ambientales normales de presión y temperatura, se encuentra en estado gaseoso. Es un combustible más pesado que el aire, por lo que, en caso de fuga, tiende a acumularse en zonas bajas, lo que representa un riesgo potencial si no se cuenta con una adecuada ventilación. Asimismo, el GLP es incoloro e inodoro, razón por la

cual se le adiciona un odorante a base de mercaptanos, con el fin de facilitar la detección de fugas por el sentido del olfato.

Para efectos de almacenamiento, transporte y distribución, el GLP se mantiene en estado líquido mediante la aplicación de presión, licuándose aproximadamente en un rango de 60 a 120 psi, dependiendo de su composición y de la temperatura ambiental. Al pasar del estado líquido al estado gaseoso, el GLP experimenta una expansión volumétrica de aproximadamente 270 veces, característica que resulta fundamental para el análisis de su comportamiento durante el proceso de vaporización y consumo energético (Osinergmin, 2011).

En la Tabla 1 se presentan las principales propiedades físico-químicas del propano y del butano, componentes del GLP, las cuales influyen directamente en su presión de vapor, capacidad de vaporización y desempeño energético en función de la temperatura ambiental.

Tabla 1:*Propiedades físico químicas del GLP*

PROPIEDADES	PROPANO COMERCIAL	BUTANO COMERCIAL
Gravedad específica a 15.56 °C	0.504	0.582
Punto de ebullición inicial a 1 atm, (°C)	-42	-1
Peso por metro cubico de líquido, (kg/m ³)	504	582
Calor específico de líquido a 15.56 °C, (kJ/kg)	1.464	1.276
Peso por metro cubico de vapor, (kg/m ³)	1.5	2.01
Temperatura de ignición en el aire, (°C)	493-549	482-538
Límite de inflamabilidad inferior, (%)	2.15	1.55
Límite de inflamabilidad superior, (%)	9.6	8.6
Calor latente de vaporización, (kJ/kg)	428	388
Poder calorífico, (kJ/m ³)	92430	121280

Nota. Adaptado de (Lopez, 2001).

2.2.3 Poder Calorífico

El poder calorífico de combustible es una medida del calor que se emite cuando un combustible se quema completamente y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente, (Cengel, 2007). El GLP presenta un elevado poder calorífico en comparación con otros combustibles gaseosos, lo que explica su amplio uso en aplicaciones domésticas, comerciales e industriales. Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de esta energía depende de una vaporización adecuada del combustible, la cual está condicionada por la temperatura ambiental y la composición del GLP (NTP 321.007, 2002).

2.2.4 Punto de Ebullición

El punto de ebullición es la temperatura a la cual el GLP pasa de la fase líquida a la fase gaseosa cuando la presión de vapor del combustible se iguala a la presión atmosférica. En el caso del GLP, este valor varía en función de su composición, siendo el punto de ebullición de los GLP más bajo que el del agua. A la presión atmosférica, el propano puro hierve a unos -42°C y el butano puro aproximadamente a -1°C (Lopez, 2001). Este factor en climas realmente fríos obliga a usar mezclas con porcentajes de propano bastante elevados, con el fin de favorecer la gasificación (Achille, 2014).

2.2.5 Presión de vapor

Es la presión a la que está en equilibrio la fase vapor y la fase líquida a una determinada temperatura. Su valor es independiente a las cantidades de líquido y vapor presentes mientras ambas existan. Si se varía los porcentajes de propano y butano, hay variaciones muy notorias de presión de la mezcla. Dicha presión aumenta también al aumentar la temperatura, esto significa que hay variaciones muy notorias del gas licuado de petróleo líquido. Por tal razón, si un cilindro está absolutamente lleno de gas licuado de petróleo (GLP) en estado líquido y la temperatura aumenta, se incrementará rápidamente la presión pudiendo incluso explotar éste (Fisher, 2021). Es conveniente no llenar el recipiente nunca del todo con GLP líquido, según Decreto Supremo 027-94-EM en su art. 142 en concordancia con la norma NFPA-58 (OSINERGMIN, 1994) detalla "...porcentaje máximo de la capacidad del contenedor que puede ser llenado con GLP líquido para contenedores con capacidad de 0 a 1050 galones es de 80% y para mayores de 1050 galones debe ser llenado al 85% ...", el porcentaje en volumen máximo que puede contener un cilindro de GLP es 80 % líquido y 20 % gas (NTP. 321.121, 2018).

2.2.6 Calor de Vaporización

Al calentar un líquido, eleva su temperatura hasta entrar en ebullición y a partir de ese instante seguirá ebullendo sin aumento adicional de la temperatura hasta que se produzca la vaporización. En general para los diferentes líquidos se precisará diferentes cantidades de calor por tener diferentes calores específicos, así como la temperatura de ebullición y el calor de vaporización (Becco, 1992).

2.2.7 Factor de Llenado:

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) en fase líquida presenta la capacidad de volatilizarse y expandirse cuando experimenta incrementos de temperatura. Debido a esta característica, los recipientes destinados a su almacenamiento no deben ser llenados al 100 % de su capacidad, ya que la expansión volumétrica del combustible podría generar condiciones de sobrepresión no deseables, comprometiendo la seguridad del sistema.

Con el fin de prevenir estos riesgos, la normativa técnica establece un grado máximo de llenado del 80 % a una temperatura de 20 °C, dejando un volumen libre que permite la expansión del GLP en función de las variaciones térmicas. Este criterio se encuentra establecido en la Norma Técnica Peruana NTP 321.121 y es coherente con lo reportado por López (2001).

2.2.8 Consumo

Es la cantidad de gas licuado de petróleo que un artefacto requiere por unidad de tiempo para satisfacer una determinada demanda energética, la cual depende de su potencia térmica nominal y del poder calorífico del combustible. El consumo puede expresarse en términos de flujo másico (kg/h) o flujo volumétrico (m³/h) y se determina a partir de la relación entre la energía requerida por el artefacto y el poder calorífico superior del GLP (NTP. 321.121, 2018).

$$Q = \frac{P}{PCS} \quad (1)$$

Donde:

Q: Consumo (kg/h)

P: Potencia del aparato (BTU/h)

PCS: Poder calífico superior (BTU/m³)

Se muestra en la tabla 2 las capacidades de consumo promedio de GLP de diversos artefactos obtenido de la NTP 321.121 – 2018 y fichas técnicas de cocinas de 2 y 4 quemadores (anexos 11,12 y 13).

Tabla 2:

Capacidad de consumo de GLP de diversos artefactos

Cocina	Capacidad de consumo (kg/h)
2 quemadores	0.18
4 quemadores	0.36
4 quemadores con horno	0.55
4 quemadores semi industrial	1.66

Nota: Adaptado de (NTP. 321.121, 2018; Solgas, 2025)

2.2.9 Contaminación:

El GLP es un combustible amigable con el medio ambiente pues su combustión no contamina la atmósfera. Ya que no tiene contenido de azufre, plomo y óxidos, la combustión es limpia, por lo que no produce olores y no deja residuos. Los productos de la combustión (PDC) son CO₂ y H₂O. El GLP no se disuelven en el agua asimismo no la contamina (Lopez, 2001).

Durante el proceso de recarga de cilindros de Gas Licuado de Petróleo (GLP), el sistema de

llenado puede presentar liberaciones mínimas y momentáneas de gas, principalmente durante las operaciones de conexión y desconexión del cilindro. Estas liberaciones no corresponden a fugas permanentes, sino a eventos operativos puntuales, cuya magnitud se encuentra limitada por los requisitos de diseño, fabricación y funcionamiento de los cilindros y sus válvulas, establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 350.011-1.

2.2.10 Temperatura ambiental

La región Cusco presenta una marcada variabilidad térmica asociada a su compleja topografía y a las diferencias altitudinales entre sus provincias, como se observa en el anexo 18. Estas condiciones generan rangos amplios de temperatura ambiental, con valores mínimos y máximos diferenciados según la altitud y la época del año (Red de Salud Canas Canchis Espinar, 2024).

En el contexto climático de la región, se distinguen principalmente dos estaciones: invierno y verano. El invierno se caracteriza por la presencia de temperaturas más bajas, mientras que el verano se registra temperaturas relativamente más elevadas y mayor presencia de precipitaciones (Red de Salud Canas Canchis Espinar, 2024); siendo esta diferenciación la más representativa para el análisis térmico en la región Cusco.

Desde un enfoque termodinámico, dichas variaciones térmicas influyen directamente en la transferencia de calor hacia el Gas Licuado de Petróleo (GLP) contenido en cilindros, condicionando su presión de vapor y su capacidad de vaporización. En particular, los períodos de menor temperatura ambiental pueden generar limitaciones en el proceso de vaporización del GLP, afectando la eficiencia del consumo energético, aspecto relevante para el análisis desarrollado en la presente investigación.

2.2.11 Capacidad de vaporización

La capacidad de vaporización del Gas Licuado de Petróleo (GLP) se define como la cantidad de combustible que puede pasar de la fase líquida a la fase gaseosa en un intervalo de tiempo determinado, bajo condiciones específicas de temperatura y presión. Este proceso depende fundamentalmente del suministro de energía térmica desde el entorno hacia el GLP contenido en el cilindro.

En cilindros de GLP, la vaporización ocurre cuando el calor transferido desde el ambiente permite cubrir el calor latente de vaporización del combustible. La capacidad de vaporización está influenciada por diversos factores, entre los que destacan la temperatura ambiental, la composición del GLP (proporción de propano y butano), el área de intercambio térmico del cilindro y su capacidad nominal (Lopez, 2001).

2.2.12 Caudal másico

El caudal másico representa la cantidad de GLP en fase gaseosa que fluye hacia el aparato de consumo por unidad de tiempo; es decir dimensiona el consumo de GLP de los aparatos (Lopez, 2001). El caudal másico se obtiene a partir del caudal volumétrico y la densidad del gas. El caudal volumétrico expresa el volumen transportado por unidad de tiempo, mientras que la densidad se define como la relación entre la masa y el volumen. En consecuencia, el caudal másico corresponde a la masa de fluido que fluye por unidad de tiempo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{V} \times \rho \\ \dot{m} &= \frac{m}{t} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

V: Volumen (m³)

t: Tiempo (s)

ρ : Densidad (kg/m³)

m: masa (kg)

2.2.13 Transferencia de Calor

La termodinámica establece que esta transferencia de calor se le conoce como calor o energía en tránsito a consecuencia de la variación de temperatura. La física de transferencia de calor no sólo procura explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también pretende predecir a que ritmo tendrá lugar dicho intercambio en condiciones determinadas (Holman, 1999).

El calor se puede transferir mediante distintos tipos de procesos; conducción, convección y radiación.

2.2.13.1 Transferencia de calor por conducción

Proceso de transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de un material debido a las interacciones entre estas. La experiencia ha demostrado que a partir de que hay un gradiente de temperatura en un material, hay transferencia de energía de la más alta temperatura a la de baja temperatura (Incropera & Dewitt, 1999).

$$\dot{Q}_{cond} = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (3)$$

Por eso, la conducción de calor a través de una capa plana está relacionado con la diferencia de temperatura a través de ella y con el área de transferencia de calor, pero esta

inversamente relacionada al espesor de aquella capa de manera que aparece en la ecuación antes mencionada, en el que K significa constante de conductividad térmica del material ello implica la capacidad de un material para conducir calor. La ecuación mencionada es conocida como ley de Fourier. (Cengel, 2007)

2.2.13.2 Transferencia de calor por convección

La convección es el proceso de transferencia de energía interna entre una superficie sólida y líquido o gas adyacente que está en movimiento y cuando más dinámico sea el movimiento del fluido, más alta es la transferencia de calor con convección. El desplazamiento del fluido está relacionado con que, en cualquier instante hay números muy altos de moléculas que están en movimiento colectivamente o como agregados de manera que dicho movimiento frente a un gradiente de temperatura ayuda a la transferencia de calor.

Para expresar el efecto total de la convección, se utiliza la ley de enfriamiento de Newton (Incropera & Dewitt, 1999). En la ecuación 4 se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura:

$$\dot{Q}_{conv} = h \times A_s (T_s - T_\infty) \quad [W] \quad (4)$$

Donde

- h , es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2\text{°C}$
- A_s , es el área superficial a través del cual tiene lugar la transferencia de calor por convección.
- T_s , es la temperatura de la superficie
- T_∞ , es temperatura del ambiente

2.2.13.3 Transferencia de calor por radiación

Diferentemente con los mecanismos de conducción y convección, en que está incluida la transferencia de energía a través de un medio material, la transferencia de calor mediante radiación no tiene necesidad de la presencia de un medio interventor y, por ello este es el más veloz y no atenúa en el espacio. Todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados (Incropera & Dewitt, 1999).

La radiación es expresada mediante la ley de Stefan – Boltzmann

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad [\text{W}] \quad (5)$$

En donde:

- T_s , es la temperatura de la superficie
- T_∞ , es temperatura del ambiente
- σ : es la constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- ε : emisividad de la superficie $0 \leq \varepsilon \leq 1$

2.2.14 Recipiente Portátil de GLP (Cilindro de GLP)

Es un recipiente metálico diseñado para el almacenamiento y transporte de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en estado líquido, cuyas características de peso y dimensiones permiten su manipulación y traslado seguro. El cilindro está conformado estructuralmente por un cuerpo compuesto por dos casquetes (elipsoidal o esférico) y una sección cilíndrica, una base de apoyo, una porta válvula y un protector de válvula, elementos que garantizan su resistencia mecánica, estabilidad y seguridad durante las operaciones de llenado, transporte y uso (NTP 350.011-1, 2004).

2.2.15 Determinación de la capacidad de vaporización del GLP

Para el presente estudio se aplica un análisis termodinámico basado en procedimientos descritos en manuales técnicos y literatura especializada, tales como CEPSA y REGO (López, 2001; REGO, 2019), así como en el libro Los gases licuados de petróleo de Becco (1992). Dichos criterios son sistematizados con el fin de estimar la capacidad de vaporización natural del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg.

Para el cálculo de la vaporización natural en los cilindros de GLP se realiza un balance de energía considerando como volumen de control al cilindro, en el cual el calor requerido para el cambio de fase de líquido a gas corresponde al calor latente de vaporización del GLP. Este calor es suministrado por el entorno mediante los mecanismos de transferencia de calor desde el aire (ambiente) hacia el GLP contenido en el recipiente.

En el presente estudio, con el objetivo de estimar la capacidad de vaporización del GLP remanente, se adopta un modelo geométrico equivalente, en el cual el cuerpo principal del cilindro se modela como un sistema cilíndrico y los casquetes extremos se aproximan mediante sistemas esféricos equivalentes. Esta aproximación permite analizar que el flujo de calor se pierde de manera continua hacia afuera a través de la pared por eso se puede considerar que el calor fluye de manera radial, y que el único espacio que se requeriría para situar el sistema es la coordenada r .

El proceso de vaporización del GLP se analiza bajo un régimen transitorio cuasi-estacionario, en el cual para un nivel de llenado y una composición de GLP determinados el flujo de calor puede aproximarse como constante durante intervalos de tiempo pequeños. En este contexto, se asume que la temperatura del GLP líquido es aproximadamente igual a la

temperatura de la superficie interna del cilindro, por lo que la resistencia térmica por convección interna resulta despreciable frente a las resistencias externas.

La condición de análisis se define para valores específicos del porcentaje de llenado del cilindro (nivel de remanente) y de la composición del GLP, los cuales fueron obtenidos mediante análisis cromatográfico de gases (GC-MS) aplicado a cilindros de retorno. Bajo estas condiciones, se aplica el principio de conservación de la energía al volumen de control, considerando que el calor transferido desde el ambiente es igual al calor requerido para la vaporización del GLP remanente, tal como se ilustra en la Figura 1 y se expresa mediante la ecuación (6).

Figura 1:

Intercambio de temperatura entre el medio ambiente y el cilindro con GLP



$$Q_2 = Q_1 \quad (6)$$

- **En el interior del volumen de control:**

$$Q_1 = \dot{m} \times h_{GLP} \quad (7)$$

Donde:

Q_1 : Calor requerido para la vaporización (W)

\dot{m} : Flujo másico de vapor de GLP (kg/h)

h_{GLP} : Calor latente de vaporización del GLP (kJ/kg)

- **El calor transferido del exterior hacia el GLP líquido**

Se determina mediante la transferencia de calor por los distintos mecanismos de transferencia de calor como son; por convección, conducción y radiación en la sección cilíndrica y esférica del cilindro de GLP. Por tanto;

$$Q_2 = Q_C + Q_E \quad (8)$$

Donde:

Q_2 : Calor total transferido desde el exterior al GLP líquido (W)

Q_C : Calor transferido por la sección cilíndrica al GLP líquido (W)

Q_E : Calor transferido por la sección esférica al GLP líquido (W)

Por consiguiente, aplicando el principio de conservación de energía al volumen de control se igualan las ecuaciones (7) y (8) para obtener el flujo masico de vapor del GLP generado mediante la vaporización natural del remanente de GLP en el cilindro de retorno para cubrir la demanda mínima de los equipos de consumo en un hogar en general, ecuación 8.

$$Q_1 = Q_2$$

$$\dot{m} \times h_{GLP} = P \times (Q_C + Q_E)$$

$$\dot{m} = \frac{P \times (Q_C + Q_E)}{h_{GLP}} \quad (9)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico de vapor de GLP (kg/h)

P: Factor de llenado

Q_C : Calor transferido por la sección cilíndrica al GLP líquido (W)

Q_E : Calor transferido por la sección esférica al GLP líquido (W)

h_{GLP} : Calor latente de vaporización del GLP (kJ/kg)

- **Factor de llenado (P)**

Para la ecuación del balance de energía, es necesario introducir un factor de llenado P el cual es un número adimensional que permite ajustar los cálculos para estimar la capacidad de vaporización del GLP y determinar aproximadamente la superficie mojada por el GLP líquido en función del porcentaje de llenado en el interior del cilindro (Lopez, 2001).

Tabla 3:

Factor de llenado en función del porcentaje de llenado

% de llenado	P
10	0.14
20	0.27
30	0.41
40	0.55
50	0.68
60	0.82
70	0.96
80	1.10

Nota: Obtenido del manual de instalaciones de GLP (Lopez, 2001)

- Cálculo del poder calorífico superior

El poder calorífico superior (BTU/h), es una unidad que se utiliza para determinar el caudal de cada equipo de consumo, por ello es necesario trabajar con las fracciones molares de propano y butano en la mezcla GLP.

$$PCS_{GLP} = (X_{propano} * PCS_{propano}) + (X_{butano} * PCS_{butano}) \quad (10)$$

La cantidad de moles presentes en una determinada cantidad de masa de propano y butano se establece mediante la siguiente relación:

$$n = \frac{m}{M} \quad (11)$$

Donde:

n: número de moles

M: masa molecular

m: masa

La ecuación (11) tiene una relación con la densidad:

$$m = \rho \times V \quad (12)$$

Tabla 4:

Peso atómico, peso molecular, densidad de propano y butano.

Elemento	Peso atómico (g/mol)	Fórmula molecular	Peso molecular (g/mol)	Densidad (g/m ³)
C	12	C ₃ H ₈	44	504
H	1	C ₄ H ₁₀	58	582

Nota: (Cengel, 2007)

A partir de la ecuación (11) y (12) se calcula el número de moles del GLP, con los valores de la tabla 4.

$$n = \frac{\rho \times V}{M} \quad (13)$$

- Cálculo del calor latente de vaporización

La cantidad de calor ligado al cambio de fase se le denomina calor latente y para determinar el calor latente de vaporización se hará uso de la correlación de Watson debido a que esta correlación permite determinar el calor latente a cualquier temperatura conociendo un valor de calor latente a una temperatura fija

$$\frac{h_{v2}}{h_{v1}} = \left(\frac{1 - T_{r2}}{1 - T_{r1}} \right)^{0.38} \quad (14)$$

Donde:

T_r : Es la temperatura reducida

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (15)$$

T_c : Es la temperatura critica

La temperatura reducida se define como la temperatura actual dividida por la temperatura critica, utilizando estas dos ecuaciones se procede a calcular el calor latente de vaporización a la temperatura de equilibrio liquido-vapor, tomando como referencia el calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición del propano y butano.

$$h_{v2} = \left(\frac{T_c - T_2}{T_c - T_1} \right)^{0.38} * h_{v1} \quad (16)$$

h_{v2} : Calor latente de vaporización a T_2

h_{v1} : Calor latente de vaporización a temperatura de ebullición

T_c : Temperatura critica

T_1 : Temperatura de la sustancia pura en ebullición

T_2 : Temperatura de la sustancia pura en equilibrio

El calor latente de vaporización del GLP es la suma del calor latente del propano más calor latente de butano multiplicado por su respectiva fracción molar a la temperatura de equilibrio.

Haciendo uso de la ecuación (16) se determina el calor latente para el propano y para el butano teniendo las siguientes consideraciones:

Tabla 5:

Temperatura de ebullición, crítica y calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición del propano y n-butano.

Elemento	T ₁ (ebullición)		T _c (crítica)		h _v (kJ/kg) (ebullición)
Propano	-42 °C	231.15 K	96.8°C	369.95 K	428
Butano	-1 °C	272.15 K	152°C	425.15 K	388

Nota: Datos obtenidos de la fichas técnicas (Linde, 2022b, 2022a; Lopez, 2001).

2.2.16 Transferencia de calor en sistemas cilíndricos y esféricos

De acuerdo a la configuración geométrica del cilindro descrita, la transferencia de calor hacia el GLP se produce desde el ambiente hacia el interior del cilindro debido a la diferencia de temperatura existente entre ambos medios, siendo función de la temperatura ambiental promedio de cada zona (alta, media y baja), de las propiedades térmicas del material del recipiente y de las características termodinámicas del GLP remanente. Este modelo permite evaluar de forma comparativa la influencia de la temperatura ambiental en la capacidad de vaporización del combustible no consumido.

Las expresiones de la transferencia de calor en relación con la resistencia térmica en geometrías cilíndrica y esférica se exponen de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{total}} \quad [\text{W}] \quad (17)$$

- **Resistencia térmica conductiva en superficie cilíndrica**

$$R_{cil} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times L \times k} \quad (18)$$

- **Resistencia térmica conductiva en superficie esférica**

$$R_{esf} = \frac{r_2 - r_1}{4 \times \pi \times r_2 \times r_1 \times k} \quad (19)$$

Donde:

r_2 : radio exterior

r_1 : radio interior

- **Resistencia térmica por radiación**

Cuando una superficie está rodeada por gas, los efectos de la radiación son significativos y es requerido incluirlo, por lo que se puede utilizar la ecuación de la ley de Stefan Boltzmann, expresada de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{rad}} \quad [\text{W}] \quad (20)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \times A_s} \quad [\text{K/W}] \quad (21)$$

Esta ecuación simboliza la resistencia térmica de una superficie frente a la radiación, de la cual se deduce que el coeficiente de transferencia de calor por radiación se expresa de la manera siguiente:

$$h_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{A_s(T_s - T_\infty)}$$

$$h_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^2 + T_\infty^2) \times (T_s + T_\infty) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (22)$$

En las ecuaciones cabe aclarar que A (área) en la relación de las resistencias es; $A = 2\pi L$ para superficie cilíndrica, y $A = 4\pi r^2$ para una superficie esférica de radio r.

Para cuando las resistencias de calor se encuentren en serie, la resistencia de calor total será la suma de todas las resistencias. En caso de que las resistencias de calor se encuentren en paralelo, la resistencia de calor total será la suma de las inversas de dichas resistencias (Cengel, 2007).

$$R_{total} = R_i + R_1 + R_{equi.} \quad (23)$$

$$\frac{1}{R_{equi.}} = \frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_0} \quad (24)$$

Donde:

R_i , es resistencia térmica por convección

R_1 , es resistencia térmica por conducción (material)

$R_{rad.}$, es resistencia térmica por radiación

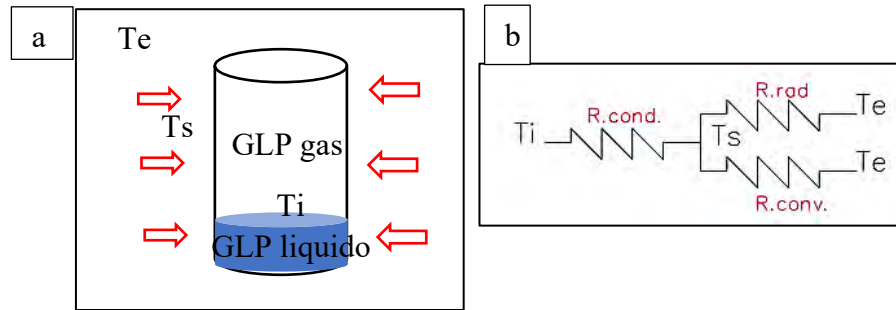
R_0 , es resistencia térmica por convección en el exterior

2.2.16.1 Transferencia de calor para geometría cilíndrica

La transferencia de calor en la geometría cilíndrica estará dada por la ecuación descrita en la ecuación 25, en la figura 2 sección a, se puede observar el diagrama de transferencia de calor.

Figura 2:

Transferencia de calor para la geometría cilíndrica



El análisis de la resistencia térmica del material del cilindro se observa en la sección “b” de la figura 2.

Te: Temperatura del aire exterior

Ts: Temperatura de superficie

Ti: Temperatura de equilibrio de GLP líquido

La transferencia de calor en la superficie cilíndrica se calcula a partir de la ecuación 17, a esta ecuación se reemplaza las ecuaciones 18 y 21 que son: Resistencia térmica por convección, resistencia térmica por radiación y resistencia térmica por conducción en superficie cilíndrica.

De aquí se tiene que el calor transferido por la sección cilíndrica es:

$$Q_c = \frac{T_i - T_e}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L} + \frac{1}{2 \times \pi \times r_2 \times L \times (h_{rad} + h_{conv})}} \quad [\text{W}] \quad (25)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del material (acero) (W/m.k)

h_{rad} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²K)

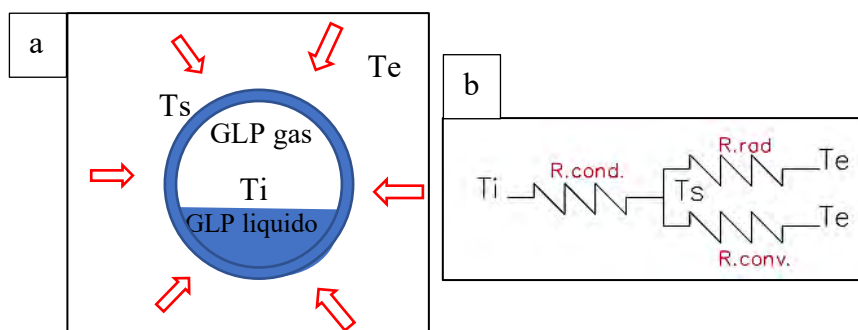
h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²K)

2.2.16.2 Transferencia de calor para geometría esférica

El calor transferido por la sección esférica (la parte superior e inferior del cilindro) se puede apreciar gráficamente en el siguiente diagrama de transferencia de calor (figura 3, sección a):

Figura 3:

Transferencia de calor en geometria esferica



El análisis de la resistencia térmica del material del cilindro en la superficie esférica se observa en la sección b de la figura 3.

La transferencia de calor en la superficie cilíndrica se calcula a partir de la ecuación 17, a esta ecuación se reemplaza las ecuaciones 19 y 21 que son: Resistencia térmica por convección, resistencia térmica por radiación y resistencia térmica por conducción en superficie esférica. De aquí se tiene que el calor transferido por la sección cilíndrica es:

$$Q_E = \frac{T_i - T_e}{\frac{r_2 - r_1}{4 \times \pi \times k \times r_2 \times r_1} + \frac{1}{4 \times \pi \times r_2^2 \times (h_{rad} + h_{conv})}} \quad [\text{W}] \quad (26)$$

r_2 : radio exterior (m)

r_1 : radio interior (m)

2.2.17 Relación de Hilpert

Permite determinar la cantidad de calor que se transfiere por convección cuando un fluido (como un gas o un líquido) fluye alrededor de un cilindro. Su objetivo principal es calcular el número de Nusselt para estimar el coeficiente de transferencia de calor en un cilindro.

$$Nu_D = \frac{h_2 * D}{K} \quad (27)$$

$$Nu_D = C * Re^m * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (27.a)$$

Nu_D : Numero de Nusselt

h_2 : Coeficiente de convección del aire en la pared [W/m²K]

Re : Numero de Reynold

C, m: constantes en función del número de Reynold

Tabla 6:

Coeficientes de la correlación de Hilpert

Re	C	m
0.4 – 4	1.103	0.330
4 – 40	1.016	0.385
40 – 4000	0.762	0.466
4000 – 40000	0.215	0.618
40000 – 400000	0.027	0.805

Nota: (Incropera & Dewitt, 1999)

2.2.18 Numero de Reynold

La transición de flujo laminar a turbulento se caracteriza por factores como la configuración geométrica de la superficie, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y tipo de fluido. La determinación del régimen de un flujo se fundamenta primordialmente en la relación entre las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido, el cual se clasifica en laminar para Reynold menor a 2300, transitorio para Reynold entre 2300 - 4000 y turbulento para Reynold mayor a 4000. El número de Reynold es una magnitud de naturaleza adimensional (*Cengel, 2007*):

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (28)$$

Donde:

ρ , densidad del fluido (kg/m³)

V, velocidad del flujo (m/s)

D, diámetro (m)

μ , viscosidad dinámica (kg/m.s)

Para el caso particular del flujo de gases sobre una superficie esférica, Whitaker propone la correlación:

$$Nu_D = 2 + 0.6 * Re^{0.5} * Pr^{\frac{1}{3}}; \quad Re < 325 \quad (29)$$

$$Nu_D = 0.46 * Re^{0.6} * Pr^{\frac{1}{3}}; \quad 325 < Re < 70000 \quad (30)$$

2.3 Marco conceptual

Se pueden encontrar los siguientes conceptos en esta tesis:

2.3.1 Contenido neto de GLP

“Es el contenido en masa de GLP en un recipiente que corresponde a la diferencia entre la masa bruta y la tara del recipiente” (NTP 350.011-1, 2004).

2.3.2 Contenido Nominal del GLP

“Es el contenido característico del recipiente, que va registrado en la estructura protectora de la válvula” (NTP 350.011-1, 2004).

2.3.3 Masa bruta del recipiente

“Es la cantidad en masa, que equivale al contenido neto de GLP más la tara del recipiente, que se encuentra registrado en la estructura protectora de la válvula” (NTP 350.011-1, 2004).

2.3.4 Masa del Recipiente

“Corresponde al recipiente vacío sin válvula aun sin pintar” (NTP 350.011-1, 2004).

2.3.5 Tara del Recipiente

“Es el peso del recipiente vacío con válvula y pintado con una aproximación peso de +- 100g” (NTP 350.011-1, 2004).

2.3.6 Remanente en cilindros de GLP

Se refiere a la cantidad de GLP contenida en el recipiente después de su uso.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

La temperatura ambiental influye en la capacidad de vaporización del GLP en cilindros de 10 kg y 45 kg, quedando un contenido remanente no consumido en los cilindros de retorno.

2.4.2 Hipótesis Específicas

H1. El contenido de remanente en los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg varía según la temperatura ambiental promedio de la zona de altitud de procedencia.

H2. La composición de remanente de los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg es butano.

H3. La composición ideal del GLP en la región del Cusco deberá ser determinada para la temperatura ambiental promedio de cada zona.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en el taller de mantenimiento y recalificado de cilindros de GLP. Con acceso a cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg provenientes de diferentes provincias de la región del Cusco.

3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicativo, porque se utilizarán conocimientos científicos y herramientas estadísticas para analizar datos y obtener resultados que se puedan aplicar directamente en la práctica para mejorar el consumo energético del GLP y reducir el contenido de remanente de este hidrocarburo en los cilindros de retorno. Asimismo, la investigación es de tipo cuantitativo, debido a que en esta investigación se realizará la medición numérica y recolección de datos para realizar el análisis estadístico. (Hernandez, 2014)

3.1.2. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación es correlacional debido a que se describirá la relación entre la temperatura ambiental y el remanente de GLP, así como la composición del GLP y la capacidad de vaporización del remanente contenido en los cilindros de retorno; como también se buscará identificar la correlación o relación estadística entre las variables. (Hernandez, 2014).

3.1.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación será no experimental puesto que se basa en la observación de los datos asimismo en el análisis de las relaciones entre las variables, sin manipularlas de forma deliberada; es decir, se tiene un enfoque relacional – causal debido a que se analiza cómo la temperatura ambiental y la composición influye en el uso eficiente de GLP, asimismo se

considera longitudinal parcial debido a que se realiza un seguimiento temporal en dos temporadas (invierno/verano). (Hernandez, 2014).

3.2. Muestra

La muestra está constituida por los cilindros de retorno de GLP de 10 kg y 45 kg que llegaron de diferentes zonas (alto, medio y bajo) de la región Cusco para su mantenimiento, recalificado y pintado.

3.3. Materiales y equipos

Materiales

- Cilindros de GLP de 10 kg y 45 kg
- Cuadernillo para apuntes y registros

Equipos

- 01 cromatógrafo de gases GC-MS marca Agilent 6890N acoplado al detector espectrómetro de masas Agilent 5975B (ubicado en el pabellón de control de calidad de la facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco)

Condiciones de operación de cromatógrafo de gases GC-MS

- Temperatura del horno inicial: 40 °C
- Tiempo de análisis: 15 minutos

Condiciones del Puerto de Inyección en cromatógrafo de gases GC-MS

- Temperatura inicial: 100 °C
- Modo: Split (división)
- Relación de split: 1:1
- Flujo: 0.2 ml/minuto

- Tipo de gas: Helio
- Modo de inyección: Manual con la jeringa Syringe Agilent 50uL FN NP 5182-9619, Lote E10-B9365
- Volumen de Inyección: 50.0 ul permitiendo obtener la composición del GLP contenido en los cilindros de retorno.

Instrumento

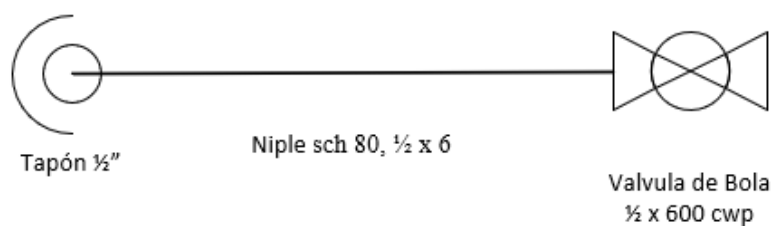
- 01 balanza digital industrial con plataforma, marca Patriks.

Accesorios para la toma de muestra según ISO 4257, (2001)

- 3 válvulas tipo bola Bonomi ½ x 600 cwp
- 3 niple de acero, sch 80, ½ x 6
- 3 tapones de acero ½"
- 01 Cooler

Figura 4:

Diagrama PFD de dispositivo de muestreo de GLP remanente



Nota. Elaboración propia

3.4. Identificación de variables

3.4.1 Variable Independiente

- Zona Geográfica
- Temperatura Ambiental (mensual promedio)

3.4.2 Variable Dependiente

- Cantidad remanente de GLP
- Composición de remanente
- Capacidad de vaporización del remanente de GLP

3.4.3 Operacionalización de variables

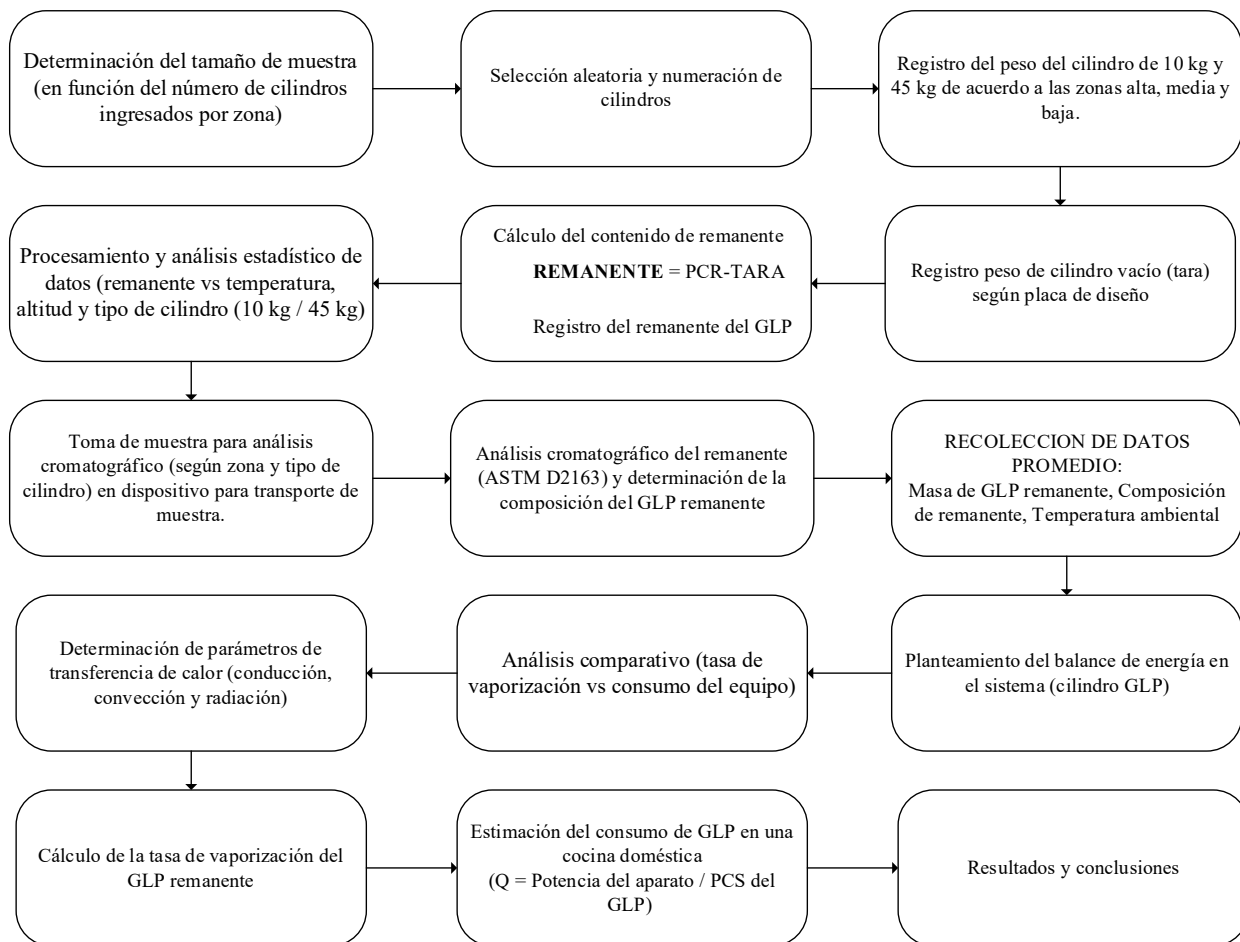
Tabla 7:*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	METODO DE MEDICION
INDEPENDIENTE					
Zona Geográfica	Áreas con características de altitud similares	Clasificación de Provincias de acuerdo con rangos de altitud	Zona alta (A) Zona media (M) Zona baja (B)	Metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)	Datos de SENAMHI
Temperatura Ambiental	Temperatura ambiental mensual promedio	Medición de la temperatura ambiental en las diferentes provincias de la región Cusco	Temperatura mínima promedio mensual	Grados Celsius (°C)	Datos promedio de SENAMHI
DEPENDIENTE					
Cantidad Remanente en los Cilindros	Cantidad de GLP que queda en los cilindros después de su uso	Medición del peso del GLP residual (en kilogramos) en los cilindros de 10 kg y 45 kg, después de su uso segregado en diferentes provincias de la región Cusco	Peso de GLP remanente en relación con la tara del peso del cilindro de 10 kg y 45 kg	Kilogramos de GLP (kg)	Balanza de pie digital calibrada
Composición del remanente de GLP	Proporción de propano y butano en el GLP contenido en los cilindros de retorno	Análisis de la composición volumétrica del GLP (porcentaje de propano y butano) en cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg	Composición de componentes	Porcentaje (%) de propano y butano	Cromatógrafo de gases
Capacidad de vaporización del remanente de GLP	Máxima tasa de cambio de fase de GLP de líquido a vapor.	Determinación de la capacidad de vaporización del remanente de GLP en los cilindros de 10 kg y 45 kg, para comparar con el flujo masico de vapor requerido en una cocina de hogar.	Capacidad de vaporización	(kg/h)	Calculo termodinámico y de transferencia de calor

3.5. Desarrollo de la investigación

Figura 5:

Diagrama de bloques de la metodología de investigación



Nota: Elaboración propia.

3.6 Metodología:

Para un mejor análisis del presente estudio, la región Cusco fue zonificada en función de la altitud (como se observa en la tabla 8) ya que influye directamente en la variación de la temperatura ambiental, generando gradientes térmicos que condicionan diversos procesos físicos (Barry & Chorley, 2017), clasificándose en zona alta (3500–4000 m s. n. m.), zona media (3000–3499 m s. n. m.) y zona baja (1000–2999 m s. n. m.). Esta clasificación fue establecida como criterio metodológico y se fundamenta en principios termodinámicos, considerando que la temperatura del entorno condiciona la transferencia de calor hacia el Gas Licuado de Petróleo (GLP) contenido en los cilindros, influyendo en su presión de vapor y en su capacidad de vaporización.

Los cilindros de GLP analizados corresponden a cilindros de retorno provenientes principalmente de las capitales de provincia de la región Cusco, los cuales fueron evaluados en la ciudad de Cusco debido a la disponibilidad de volúmenes. En casos específicos, se consideraron ciudades con elevado consumo que no corresponden a capitales provinciales, lo cual se detalla en el capítulo de resultados y discusiones. La zonificación altitudinal permitió un manejo ordenado de los datos y facilitó el análisis comparativo del comportamiento del remanente de GLP.

Tabla 8:*Provincias de la región Cusco según altitud y zonificación*

Provincias	Altitud (msnm)	Zonas
La Convención		
Urubamba	1000 - 2999	Bajo (B)
Paucartambo		
Calca		
Paruro		
Quispicanchi		
Acomayo	3000 - 3499	Media (M)
Anta		
Cusco		
Canchis		
Chumbivilcas	3500 - 4000	Alta (A)
Canas		
Espinar		

Nota: Obtenido de (INEI, 2001)

Para la caracterización de la temperatura ambiental de la región Cusco, se consideró la información climática proveniente de estaciones meteorológicas representativas de las distintas zonas altitudinales. La estación Santa Ana, ubicada en la provincia de La Convención, fue utilizada como referencia para la zona baja; las estaciones de Cusco y Ccatca, correspondientes a las provincias de Cusco y Quispicanchi, representaron la zona media; mientras que la estación Coporaque, ubicada en la provincia de Espinar, fue considerada representativa de la zona alta.

A partir de los registros de temperatura máxima y mínima, se identificaron los meses más fríos (junio y julio) y los meses más cálidos (enero y febrero) del anexo 18, los cuales fueron

seleccionados para el análisis, por representar condiciones térmicas extremas relevantes desde el punto de vista termodinámico. El anexo 18 muestra la variación promedio de la temperatura ambiental en la región Cusco, mientras que la Tabla 9 presenta los rangos de temperatura correspondientes a las zonas alta, media y baja.

Tabla 9:

Rango de temperatura mensual promedio en la zonas A, M y B de la region Cusco.

Tem. (°C)	Enero y Febrero			Junio y Julio		
	Tem. Max	Tem. Min	Tem. Media	Tem. Max	Tem. Min	Tem. Media
Zona Alta	17	5	11	16	-6	5
Zona Media	15	6	10	16	-1	7.5
Zona Baja	28	19	23	29	13	21

Nota: Adaptado de (Weather Spark, 2025).

La Tabla 9 presenta los rangos de temperatura ambiental mensual promedio correspondientes a las zonas alta, media y baja de la región Cusco, utilizados exclusivamente como referencia para la selección de condiciones térmicas representativas del análisis. Estos valores no se consideran constantes, sino que responden a una variación estacional, por lo que se emplean las temperaturas medias de los meses más fríos (junio y julio) y más cálidos (enero y febrero) como escenarios térmicos característicos para la evaluación del comportamiento del remanente de GLP.

3.6.1. Recolección de la muestra

En el taller de mantenimiento y recalificado de cilindros, se seleccionó los cilindros de manera aleatoria de los distintos distribuidores que transportan los cilindros de 10 kg y 45 kg en

camiones de las diferentes zonas (alto, medio y bajo) del Cusco los cuales llegan al taller para su mantenimiento, recalificado y pintado (ver figura 6).

Se determino el tamaño de muestra en función al número de cilindros que ingresa, por zonas (alto, medio y bajo) cada dos semanas, al taller; la muestra se determinó según la norma NTP 321.007 de acuerdo con la tabla 10 en la cual se define el muestreo de recipientes portátiles relacionando el tamaño del lote (se definió en función al tamaño de camión que ingreso al taller) y el tamaño de muestra (por cada camión), se utilizó la tabla 10 para seleccionar el tamaño de muestra.

Tabla 10:

Tamaño de muestra para recipientes portátiles

TAMANO DEL LOTE (recipientes portátiles)	TAMAÑO DE LA MUESTRA (recipientes portátiles)
2 a 50	2
51 a 500	3

Nota: Según (NTP 321.007, 2002)

Los camiones que ingresan al taller de mantenimiento y recalificado de cilindros de GLP, son camiones que transportan entre 480 a 500 cilindros de 10 kg de GLP y camiones que transportan entre 65 a 160 cilindros de 45 kg de GLP por ello observando la tabla 10 se puede evidenciar que corresponde al rango de 51 a 500 recipientes portátiles siendo este el caso; se seleccionó como muestra para la toma de datos de sus pesos respectivos de 3 recipientes portátiles por cada camión que ingresaba, la capacidad de trabajo máximo del taller para mantenimiento, recalificado y pintado era de 2500 unidades de cilindros por día con ello se evidencio que al día ingresaba de 4 a 5 camiones es por tal motivo que se tomó como muestra

diaria de 12 a 15 unidades de cilindros escogidos al azar durante dos meses temporada con temperatura ambiental 10°C promedio (enero y febrero) y temporada con temperatura ambiental 7.5°C promedio (junio y julio) de forma inter diaria (lunes, miércoles y viernes). Durante la toma de datos se seleccionaba los datos mediante una encuesta a los conductores de las unidades para ubicar los datos tomados en las zonas respectivas que se considera en la tabla 8.

Figura 6:

Cilindros de retorno de 10 kg de GLP



Nota: Área de granallado de recipientes para pasar al área de pintado, cilindros de 10 kg de GLP.

Para la recolección de datos se llenaron hojas de registro en el que se consignaron la fecha, el origen de los cilindros según zona, la TARA que viene grabada en el protector de válvula de cada cilindro, peso del cilindro con remanente (PCR) y la diferencia entre el PCR y TARA.

Figura 7:*Pesado de cilindros de retorno de GLP*

Nota: a. Se observa el peso de un recipiente de retorno de 10 kg de GLP y su respectiva tara, b. Peso tara de un recipiente de 45 kg de GLP, c. Peso de un recipiente de retorno de 45 kg de GLP.

Para pesar los recipientes de retorno de GLP se calibro la balanza digital, y se realizó en una superficie a nivel. Se colocó el recipiente en el centro de la plataforma de la balanza como se observa en la figura 7 y se tomó apuntes del peso de la pantalla digital de la balanza. Para determinar la cantidad de GLP, se hizo la diferencia del peso en vacío del recipiente (TARA) con el peso total (PCR), y el resultado fue la cantidad de GLP contenida en el cilindro.

Los datos recolectados fueron transcritos y organizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, lo que permitió una adecuada sistematización, depuración y verificación de la información (Anexo 14).

El análisis de los resultados se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un nivel correlacional. Es cuantitativo, ya que se basa en la medición y análisis de datos numéricos relacionados con el contenido de GLP remanente, la temperatura ambiental y la altitud. Asimismo, es correlacional, debido a que se evaluó la relación entre la temperatura ambiental y la cantidad de remanente de GLP, así como su influencia en la capacidad de vaporización.

En este contexto, el estudio es de diseño no experimental ya que no se manipularon las variables, sino que se observaron en su entorno natural, sin control de variables externas como hábitos de consumo, tipo de artefacto, exposición ambiental o frecuencia de uso.

Se empleó estadística descriptiva para caracterizar el contenido de GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg, determinando medidas de tendencia central y dispersión tales como media, mediana, valores mínimos y máximos. Los resultados fueron agrupados según estación climática (verano e invierno), zona altitudinal (alta, media y baja) y tipo de cilindro, permitiendo identificar patrones de comportamiento del remanente de GLP bajo diferentes condiciones ambientales.

3.6.2. Análisis de remanente de GLP en laboratorio de cromatografía de gases

Se tomó muestras de remanente de GLP por cada zona (alta, medio y bajo). Fueron almacenados en recipientes de acero inoxidable como lo señala la (ISO 4257, 2001) “método de muestreo para gases licuados de petróleo”, como se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 8:

Accesorio adaptado para la toma de muestra de GLP.



Nota: Tapón galvanizado de ½”, niple de acero, sch 80, ½ x 6”, válvula tipo bola Bonomi ½ x 600 cwp diseñada para presión de trabajo en frío de 600 PSI. Se adecuo con estos accesorios para la toma de 3 muestras de GLP residual.

Para mantener las muestras de GLP residual en estado líquido durante su transporte del taller de mantenimiento y recalificado al laboratorio de cromatografía de gases ubicado en el pabellón de control de calidad, facultad de ciencias de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco, se mantuvo en un cooler con hielo durante su transporte como se muestra en la figura 9. En el laboratorio se almacenó a -20°C para estabilizar las muestras y poder manipularlo.

Figura 9:

Muestras de GLP en cooler para su respectivo transporte.



Nota: Las muestras fueron tomadas en estado líquido, previo enfriamiento de los muestreadores acoplados con niple, tapón y válvula de acero de ½". Los cuales fueron cubiertos con cubos de hielo para mantener estable y en estado líquido el GLP residual.

Estas muestras que se observa en la figura 9 fueron sometidas a análisis por cromatografía de gases GC-MS teniendo como guía el método de prueba estándar para la determinación de hidrocarburos en gases licuados de petróleo (GLP) y mezclas de propano/propeno mediante cromatografía de gases del ASTM D2163, 2023, se adaptó al cromatógrafo GC-MS del laboratorio de la UNSAAC anexo 16.

3.6.2.1 Procedimiento del análisis cromatográfico del remanente de GLP

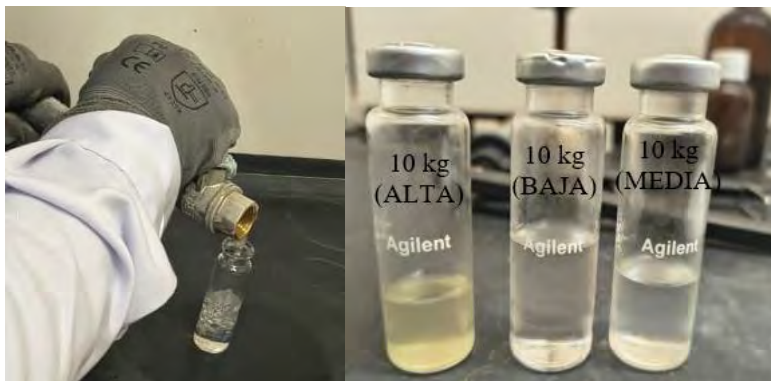
El análisis cromatográfico se empleó exclusivamente para determinar la composición del remanente de las muestras con GLP sacados de los cilindros de retorno; se realizó como se describe a continuación:

a. Las muestras contenidas en los muestreadores (figura 9) son retirados del congelador, que se encuentra a -20 °C, y puestos en una cabina de seguridad biológica. En la cabina de

seguridad biológica son trasvasados a viales los cuales son sellados a presión como se muestra en la siguiente figura:

Figura 10:

Trasvasado del GLP de los muestreadores a los viales.



Nota: Proceso de trasvasado de las muestras de GLP, viales con las 3 muestras llevadas a laboratorio.

b. Posterior a ello se deja los viales fuera del congelador por el lapso de 1 minuto para que intercambien calor con la temperatura del ambiente y los compuestos volátiles contenidos en la muestra líquida se vaporicen (punto de ebullición de propano $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, n-butano $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Luego se procedió a tomar la muestra con una jeringa para cromatografía de gases de 50 μl (solo se extrae la fase vapor de la muestra, figura 11).

Figura 11:

Toma de muestra de los viales que están contenidos con muestras de GLP para pasar al cromatógrafo de gases



Nota: Con la jeringa para muestras gaseosa se toma la muestra introduciendo por la tapa del vial la aguja de la jeringa hasta la fase gaseosa y por presión sube la fase gaseosa a la jeringa.

c. Inmediatamente, la muestra se inyecta en el cromatógrafo de gases mediante una jeringa en el puerto de inyección, el cual se mantiene a una temperatura de 100 °C para su vaporización instantánea. La columna se programó para un análisis isotérmico de 15 minutos a 40 °C usando helio como gas portador a 0.2 ml/min.

3.6.3. Determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente

La determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg se realizó mediante un balance de energía entre el ambiente y el sistema (cilindro de GLP), considerando un periodo de análisis de una hora. Para ello, se tomó como base el remanente promedio de GLP determinado estadísticamente para cada tipo de cilindro, estación del año y zona altitudinal.

De acuerdo con la normativa vigente DS 027-94-EM y NFPA 58 (OSINERGMIN, 1994), se consideró que el porcentaje máximo de llenado de los cilindros es del 80 % de su volumen, mientras que la relación volumen - masa del GLP se obtuvo de la NTP 350.011-1, que establece una equivalencia promedio de 0,41 kg/l, es decir que 0.41 kg equivale a 1 litro de volumen del cilindro. A partir de estos criterios normativos se definieron las capacidades geométricas mínimas de los recipientes analizados.

Para la determinación de la capacidad de vaporización del contenido remanente de GLP en los cilindros de retorno, se siguió la secuencia metodológica que se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11:

Secuencia metodológica para la determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente.

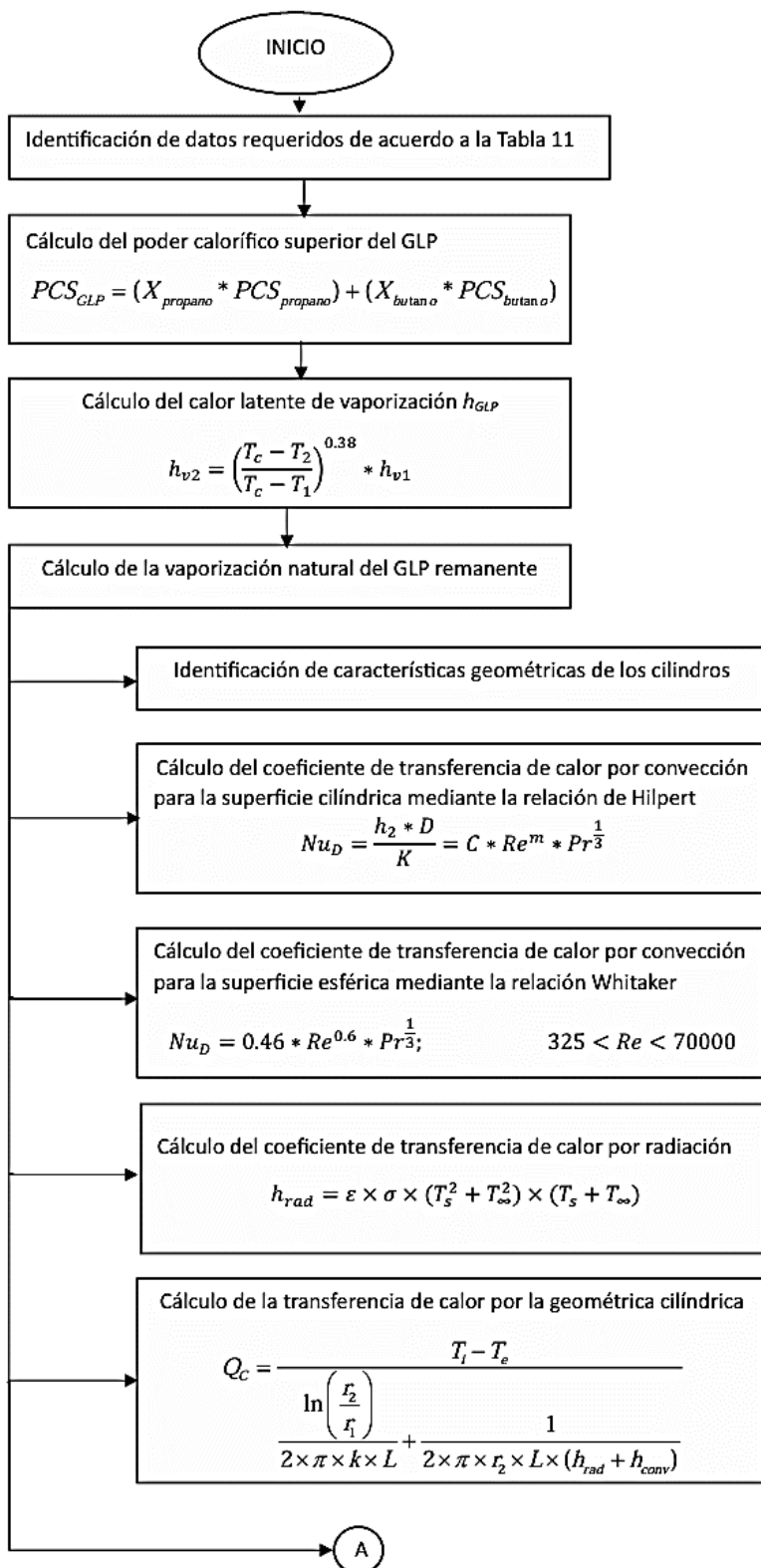
Pasos	Desarrollo
Identificación de datos requeridos	<ul style="list-style-type: none"> -Remanente promedio de los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg (obtenido por estadística para invierno, verano y zonas) -Promedio de remanente de GLP (tabla 15 y 16) -Factor de llenado “P” en función al porcentaje de remanente (cte), tabla 3 - Presión (kg/cm^2) para el porcentaje de remanente (tabla 26) - Composición del remanente de GLP para las zonas (Alta, Media, Baja) ver tabla 17 - Temperatura de equilibrio en el cilindro obtenido de anexo 2

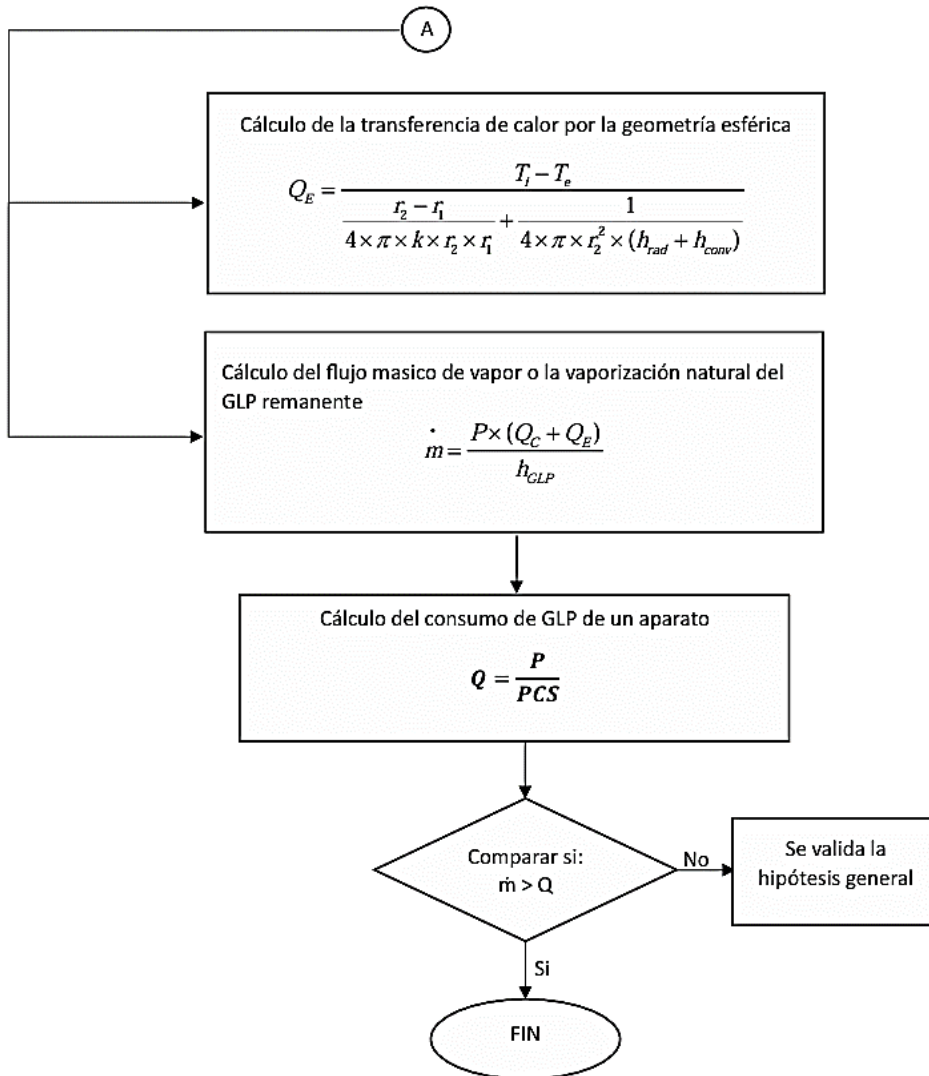
Parámetros atmosféricos	Condiciones atmosféricas de las zonas Alta, Media y Baja (tabla 13 y 14)
Cálculo del poder calorífico superior del GLP	-Mediante la ecuación (10) calculado en el anexo 6.
Cálculo del calor latente de vaporización h_{GLP}	-Mediante la ecuación (16)
Cálculo de la vaporización natural del GLP remanente	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de características geométricas de los cilindros tabla 19 -Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección para la superficie cilíndrica mediante la relación de Hilpert ec. (27) - Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección para la superficie esférica mediante la relación Whitaker ec. (30) - Calculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación ecuación (22) -Cálculo de la transferencia de calor por la geométrica cilíndrica, ecuación (25) -Cálculo de la transferencia de calor por la geometría esférica, ecuación (26) - Calculo del flujo masico de vapor o la vaporización natural del GLP remanente mediante la ecuación (9)
Cálculo del consumo de GLP de un aparato	-Calculo mediante la ecuación (1)

Nota: Elaboracion propia.

Figura 12:

Diagrama de bloques de la metodología para determinar la capacidad de vaporización del GLP.





Nota: Elaboracion propia.

Como datos de partida se consideró el contenido promedio de GLP remanente presente en los cilindros de retorno al momento de su ingreso al taller de inspección y mantenimiento (en la tabla 25 del anexo 3 se detalla la equivalencia del nivel de llenado de GLP en función al peso de GLP en los cilindros de 10 kg y 45 kg), así como la composición del GLP residual (análisis cromatográfico de tres muestras, una por zona A, M, B). Asimismo, se incorporaron las condiciones atmosféricas promedio correspondientes a las zonas altitudinales alta, media y baja

de la región Cusco, siendo la presión atmosférica y la temperatura ambiental variables fundamentales para el correcto desarrollo de los cálculos termodinámicos.

Debido a que no fue posible realizar mediciones directas en el interior de los cilindros (perforaciones o modificaciones), la temperatura de equilibrio del GLP se determinó de manera analítica.

En primer lugar, se estimó la presión interna del cilindro en función del porcentaje de llenado del remanente promedio, utilizando como referencia la relación presión interna - porcentaje de llenado reportada en la investigación de Tintaya (2024), correspondiente a un tanque aéreo de GLP ubicado en la ciudad de Cusco, cuyos valores se presentan en la Tabla 12, con estos datos se ajustan a una ecuación polinómica de segundo grado como se muestra en la figura 16 del anexo 4. A partir de este ajuste, se elaboró la tabla 26 del anexo 5 que describe la variación de la presión en función del porcentaje de llenado de GLP permitiendo determinar la presión interna del GLP en los cilindros para distintos porcentajes de llenado o niveles de remanente.

Tabla 12:*Data, variación de la presión en función del porcentaje de llenado*

N°	Porcentaje de llenado %	Presión (psi)	Presión (bar)
1	83	63	4.3
2	77	60	4.1
3	72	54	3.7
4	65	46	3.2
5	61	42	2.9
6	54	38	2.6
7	50	36	2.5
8	45	34	2.3
9	39	28	1.9
10	35	25	1.7

Nota: Datos reales obtenidos para tanque de GLP en la región Cusco obtenidos de (Tintaya, 2024)

La metodología se basó en la relación presión–porcentaje de llenado reportada por Tintaya (2024), debido a que sus datos corresponden a condiciones reales de la ciudad de Cusco, siendo más representativos para el estudio. En contraste, los datos de Portales (2020) si bien establece una relación entre presión interna y temperatura para cilindros de 10 kg fueron descartados por haber sido obtenidos en condiciones climáticas de Chiclayo, no comparable con las condiciones climáticas de Cusco. Adicionalmente, los valores de presión empleados se encuentran dentro del rango establecido por la NTP 350.074-1 (1995), la cual especifica que los

recipientes portátiles de GLP deben operar con válvulas capaces de reducir presiones máximas de hasta 20 bares a presiones de servicio del orden de 0.05 bar, garantizando así la coherencia normativa de los datos utilizados.

Una vez determinada la presión interna del cilindro y conocida la composición del GLP remanente (fracciones de propano y n-butano), la temperatura de equilibrio del sistema se obtuvo a partir de la relación presión interna - composición propano/butano - temperatura presentada en el diagrama del Anexo 2. Esta relación permite establecer la temperatura de equilibrio del GLP en el interior del cilindro bajo condiciones de equilibrio líquido-vapor, considerando simultáneamente la presión interna y la composición del GLP.

A partir de la temperatura de equilibrio determinada y de las fracciones molares de la composición del GLP remanente, se procedió al cálculo del calor latente de vaporización y del poder calorífico superior del GLP, empleando las ecuaciones definidas en el Capítulo II.

Para el cálculo de la capacidad de vaporización natural del GLP remanente, se consideraron las características geométricas de los cilindros y las condiciones atmosféricas correspondientes a cada zona altitudinal. En primer lugar, se determinaron los coeficientes de transferencia de calor por convección para las superficies cilíndrica y esférica del recipiente, así como el coeficiente de transferencia de calor por radiación. Posteriormente, se calculó la transferencia total de calor hacia el cilindro mediante las ecuaciones correspondientes a ambas geometrías.

Finalmente, los valores de transferencia de calor obtenidos fueron incorporados en la ecuación de balance de energía para determinar el flujo másico de vapor generado, el cual representa la capacidad de vaporización del GLP remanente en los cilindros de retorno. Como

referencia comparativa, se calculó el consumo de GLP de un artefacto mediante la ecuación 1, con el fin de evaluar la suficiencia del flujo de vaporización disponible frente a la demanda energética del equipo.

-Parámetros atmosféricos locales

Se determinaron los parámetros atmosféricos necesarios para el análisis termodinámico del sistema, tales como la presión atmosférica y la densidad del aire, empleando condiciones representativas del lugar de origen de los cilindros según su zonificación altitudinal (zona alta, zona media y zona baja). Para los cálculos principales se utilizaron las temperaturas ambientales medias de cada zona, por constituir valores representativos y adecuados para un análisis cuasi-estacionario de la transferencia de calor. Adicionalmente, las temperaturas mínimas registradas fueron consideradas como un escenario térmico crítico, con el fin de evaluar la disminución de la capacidad de vaporización del GLP remanente bajo condiciones ambientales desfavorables. Los valores utilizados se presentan en la tabla 13 y 14.

Tabla 13:

Condiciones atmosféricas para invierno

CARACTERISTICAS	Zona alta	Zona media	Zona Baja
Altitud (m.s.n.m.)	3915	3400	2850
Presión atmosférica (kPa)	62.35	66.52	70.98
Velocidad del viento (m/s)	3.34	3	2.5
Temperatura media (°C)	5	7.5	21
Temperatura mínima (°C)	-6	-1	13
Densidad del aire (kg/m ³)	0.873	0.864	0.923

Nota: La presión atmosférica y la densidad del aire fueron determinadas mediante interpolación en función de la altitud a partir del anexo 9 (Cengel, 2007). La temperatura ambiental y la velocidad del viento fueron obtenidas de Weather Spark (2025).

Tabla 14:

Condiciones atmosféricas para verano

CARACTERISTICAS	Zona alta	Zona media	Zona Baja
Altitud (m.s.n.m.)	3915	3400	2850
Presión atmosférica (kPa)	62.35	66.52	70.98
Velocidad del viento (m/s)	2.1	2.3	1.9
Temperatura media (°C)	10	11	23
Temperatura mínima (°C)	5	6	19
Densidad del aire (kg/m ³)	0.873	0.864	0.923

Nota: La presión atmosférica y la densidad del aire fueron determinadas mediante interpolación en función de la altitud a del anexo 9 (Cengel, 2007). La temperatura ambiental y la velocidad del viento fueron obtenidas de Weather Spark (2025).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

La presente investigación se desarrolló en la región Cusco, considerando como población de referencia a los cilindros de GLP de uso doméstico e industrial que retornan al taller de mantenimiento y recalificado de cilindros de GLP luego de su utilización por parte de los usuarios finales.

De acuerdo con información estadística de la encuesta residencial de consumo y usos de energía (ERCUE, 2021), la región Cusco consume un total de 387 636 cilindros de 10 kg por mes y 4 884 cilindros de 45 kg de GLP por mes los cuales constituyen un sector relevante del consumo regional de GLP.

El periodo de recolección de datos comprendió los meses de enero y febrero, considerados representativos de la temporada de verano, y los meses de junio y julio, representativos de la temporada de invierno, permitiendo evaluar el efecto de la variabilidad estacional sobre el contenido de GLP remanente. La muestra analizada estuvo conformada por un total de 600 cilindros de GLP, de los cuales 480 correspondieron a cilindros de 10 kg y 120 a cilindros de 45 kg, recolectados en un taller de mantenimiento que recibe aproximadamente 2 500 cilindros diarios provenientes de diversas provincias de la región Cusco.

Los cilindros seleccionados corresponden a retornos reales de uso, sin intervención ni manipulación experimental, y fueron clasificados según su zona de origen (zona alta, media y baja) y estación climática, permitiendo una caracterización representativa del comportamiento del remanente de GLP bajo condiciones reales de operación y consumo.

4.1 Contenido remanente promedio de GLP de los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg

En esta sección se presentan los resultados del contenido promedio de GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg, obtenidos a partir del pesaje de los cilindros de retorno recolectados en diferentes provincias de la región Cusco. Los resultados se agrupan según la zonificación altitudinal (zona alta, zona media y zona baja) y la temporada climática.

Para cada grupo se determinaron el tamaño de muestra (n), la media, la mediana, así como los valores mínimos y máximos, con el objetivo de describir la tendencia central y la dispersión del remanente de GLP. La mediana fue considerada como una medida complementaria debido a la presencia de asimetría en los datos y valores extremos, especialmente en los cilindros de 45 kg.

Tabla 15:

Contenido de remanente promedio para verano

Cilindro (kg)	zona	n	media (kg)	mínimo (kg)	máximo (kg)	mediana (kg)
10	Alta	63	0.49	0.32	1.28	0.46
	Media	80	0.26	0.04	1.32	0.24
	Baja	97	0.13	0.00	0.90	0.12
45	Alta	15	5.71	1.96	11.15	5.16
	Media	21	2.27	1.11	3.70	2.20
	Baja	24	0.75	0.05	1.90	0.75

Nota: Contenido de remanente promedio de GLP según zona, donde “n” es el tamaño de muestra (número de cilindros), en la columna de valores mínimos, los registros de 0.00 kg corresponden a cilindros que no presentaron remanente de GLP al momento de la medición, evidenciando casos puntuales de consumo total dentro de la muestra.

En la tabla 15 se observa que, en la temporada de verano, los cilindros de 10 kg presentan un incremento progresivo del contenido de remanente conforme aumenta la altitud. En la zona alta se registra una media de 0.49 kg, mientras que en la zona media y baja los valores disminuyen a 0.26 kg y 0.13 kg, respectivamente. Este comportamiento evidencia que, incluso en condiciones de mayor temperatura ambiental, la altitud continúa influyendo en la capacidad de vaporización del GLP.

En el caso de los cilindros de 45 kg, el efecto altitudinal es aún más marcado. La zona alta presenta una media de 5.71 kg, significativamente superior a la observada en la zona media (2.27 kg) y baja (0.75 kg). La diferencia entre la media y la mediana en la zona alta sugiere la presencia de valores extremos asociados a consumos parciales o limitaciones en la vaporización del combustible.

Tabla 16:

Contenido de remanente promedio para invierno

cilindro	zona	n	media (kg)	mínimo (kg)	máximo (kg)	mediana (kg)
10	Alta	63	0.93	0.45	2.86	0.77
	Media	80	0.41	0.00	1.00	0.32
	Baja	97	0.18	0.00	0.45	0.15
45	Alta	15	8.11	3.20	14.60	8.05
	Media	21	3.33	1.00	5.00	3.77
	Baja	24	1.46	0.40	3.30	1.38

Nota: Contenido de remanente promedio de GLP según zona, donde “n” es el tamaño de muestra (número de cilindros), en la columna de valores mínimos, los registros de 0.00 kg

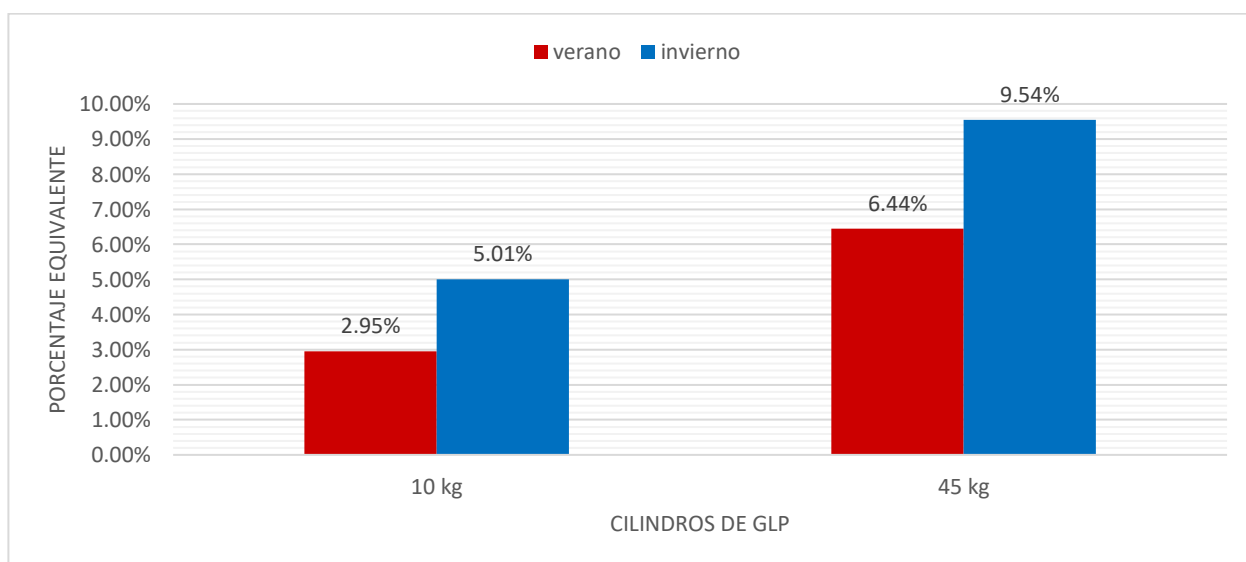
corresponden a cilindros que no presentaron remanente de GLP al momento de la medición, evidenciando casos puntuales de consumo total dentro de la muestra.

En la tabla 16 se observa que, en la temporada de invierno, el contenido remanente de GLP se incrementa en todas las zonas altitudinales y para ambos tipos de cilindro, en comparación con la temporada de verano (tabla 15). En los cilindros de 10 kg, la zona alta alcanza una media de 0.93 kg, casi el doble del valor observado en verano, mientras que la zona media y baja registran 0.41 kg y 0.18 kg, respectivamente.

En los cilindros de 45 kg, el incremento es aún más pronunciado. La zona alta presenta una media de 8.11 kg, con valores máximos que alcanzan los 14.60 kg, lo que evidencia una limitación severa en la vaporización del GLP bajo condiciones de baja temperatura. Este comportamiento confirma que la combinación de baja temperatura y alta altitud amplifica significativamente en la cantidad de remanente de GLP.

Figura 13:

Porcentaje equivalente de GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg según estación



Nota: Porcentaje calculado a partir de la masa promedio de GLP remanente (kg) y la capacidad nominal del cilindro (10 kg o 45 kg).

En la Figura 13, el contenido remanente de GLP en los cilindros de retorno en la región Cusco se encuentra fuertemente condicionado por la estación climática, el tipo de cilindro y la altitud de la zona de origen, evidenciando que este fenómeno no responde a una única causa, sino a la interacción de factores ambientales y operativos propios del contexto geográfico regional.

El análisis descriptivo muestra que, tanto en los cilindros de 10 kg como en los de 45 kg, el porcentaje de remanente equivalente es mayor durante la temporada de invierno. En particular, los cilindros de 45 kg presentan los valores más elevados, alcanzando porcentajes cercanos al 9.54% en invierno, mientras que los cilindros de 10 kg registran valores inferiores al 3% en verano. Esta diferencia confirma que la disminución de la temperatura ambiental reduce la capacidad de vaporización del GLP, afectando de manera más severa a los cilindros de mayor capacidad y a contextos de uso prolongado, como los asociados a establecimientos comerciales.

Venegas y Ayabaca (2019), en Ecuador, reportaron remanentes de 3.82 kg de GLP en cilindros de 15 kg y 9.69 kg de GLP en cilindros de 45 kg, valores superiores a los obtenidos en el presente estudio, donde se determinó un remanente promedio de 0.5 kg en invierno para cilindros de 10 kg y 4.3 kg en invierno para cilindros de 45 kg, calculados respecto al contenido nominal.

La mayor cantidad de remanente reportada en el estudio de Venegas y Ayabaca (2019) en Ecuador puede explicarse por diferencias en las condiciones de uso y en las características operativas del consumo de GLP. En dicho estudio, los cilindros se emplean principalmente en actividades comerciales e industriales, donde los consumos son más continuos y de mayor

demanda energética, lo que puede generar mayores volúmenes de GLP no aprovechado al final del ciclo de uso. En contraste, el presente estudio está centrado en uso domiciliario, el consumo es más intermitente y suele prolongarse hasta niveles más bajos de contenido, lo que reduce el remanente final.

Por otro lado, si bien la región Cusco presenta condiciones térmicas más desfavorables que limitan la vaporización del GLP, los resultados indican que el remanente depende no solo de factores termodinámicos, sino también del comportamiento de consumo y del contexto de uso del combustible.

4.2 Composición del GLP remanente de los cilindros de retorno

Para el presente trabajo se adaptaron accesorios para la toma de muestras como se describió en el capítulo III, estas muestras pasaron por un análisis cromatográfico.

4.2.1 Resultados del análisis cromatográfico del GLP remanente.

En esta sección se presentan los resultados del análisis de la composición del GLP remanente contenido en los cilindros de retorno de 10 kg y 45 kg, determinado mediante cromatografía de gases conforme a la norma ASTM D2163. Las muestras fueron recolectadas siguiendo el procedimiento establecido en la norma ISO 4257, y analizadas en el cromatógrafo de gases del laboratorio de cromatografía de gases GC-MS de la UNSAAC.

Los resultados se expresan en términos de fracción porcentual de propano y n-butano, y se agrupan según la zonificación altitudinal (zona alta, zona media y zona baja).

Tabla 17:

Composición del GLP residual de los cilindros de retorno de las diferentes zonas.

ZONA	Composición de GLP cilindro de retorno	
	% propano	% butano
ALTA	0.8	99.2
MEDIA	4.2	95.8
BAJA	8.1	91.9
PROMEDIO	4.4	95.6

Nota: Resultados obtenidos del laboratorio de cromatografía de gases GC-MS de la UNSAAC. (ver anexo 17)

Los resultados del análisis cromatográfico, presentados en la Tabla 17, indican que el GLP remanente está compuesto predominantemente por butano comercial 95.6%, debido a que el propano se consume de manera preferencial durante el consumo del GLP, como consecuencia del punto de ebullición ($-42\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este comportamiento concuerda con lo señalado por Vargas (2008), quien indica que *“a medida que se consume el propano, este se evapora más rápido que el butano, lo que implica que, conforme avanza el consumo del combustible, el porcentaje de propano disminuye mientras que el de butano se incrementa. Al alcanzar aproximadamente 3,1 kg de producto, la composición total del remanente corresponde principalmente a butano”*.

Con los resultados obtenidos del análisis cromatográfico, se evidencia que el comportamiento del GLP en el interior del cilindro no es homogéneo, sino que está influenciado por la presencia de un gradiente térmico interno y procesos de estratificación. Durante el consumo, el propano, al ser el componente más volátil, se vaporiza preferencialmente, enriqueciendo progresivamente el líquido remanente en butano. Este cambio composicional,

reduce la presión de vapor del sistema y limita la capacidad de vaporización en las etapas finales de uso, explicando por qué el GLP residual no puede ser aprovechado en su totalidad.

En consecuencia, la composición del remanente observada en los cilindros de retorno es consistente con las propiedades fisicoquímicas de los componentes del GLP, y explica la presencia de un combustible residual con menor capacidad de vaporización, especialmente bajo condiciones de baja temperatura ambiental.

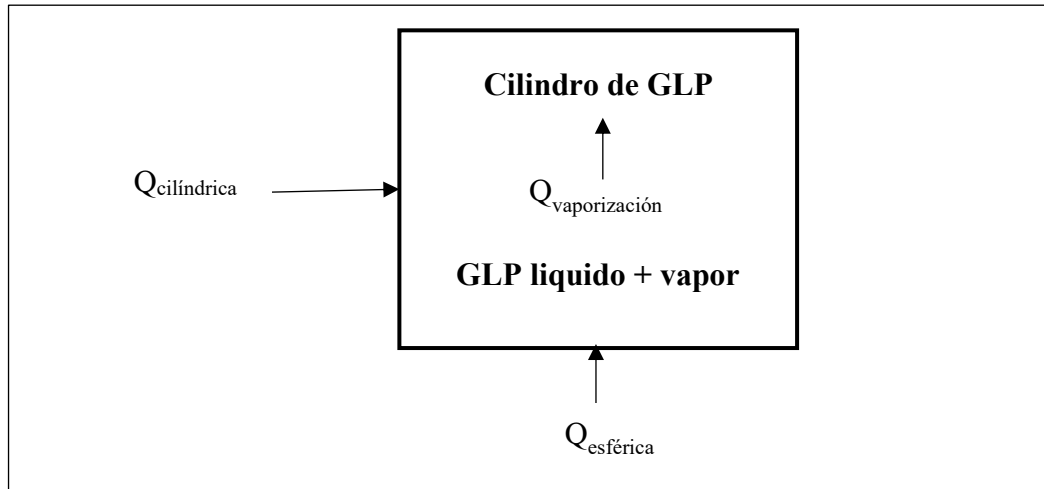
El análisis cromatográfico del GLP remanente evidenció variaciones en la fracción de propano entre las zonas alta, media y baja; sin embargo, en todos los casos la mezcla estuvo compuesta predominantemente por n-butano, con contenidos de propano inferiores al 10 % en volumen. Dado que la aplicación de las composiciones de GLP correspondientes a las zonas alta, media y baja en los cálculos de capacidad de vaporización produce resultados similares, sin diferencias significativas, se adoptó una composición promedio del remanente (4.4 % propano y 95.6 % n-butano), para el desarrollo de los cálculos de capacidad de vaporización.

4.3 Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de retorno

No se desarrolló un balance de masa independiente, debido a que el sistema analizado corresponde a un recipiente cerrado sin ingreso ni salida continua de GLP, donde el único fenómeno relevante es el cambio de fase líquido - vapor. En estas condiciones, la capacidad de vaporización se determina a partir del balance de energía.

Figura 14:

Esquema del balance de energía para la determinación de la capacidad de vaporización del GLP remanente en cilindros de 10 kg y 45 kg.



Nota: Donde $Q_{cilíndrica}$, es calor transferido por la sección cilíndrica al GLP líquido (W),

$Q_{esférica}$ es calor transferido por la sección esférica al GLP líquido (W) y $Q_{vaporización}$ es calor utilizado para la vaporización del GLP líquido.

De la ecuación 6 se tiene que:

$$Q_{vap.} = Q_C + Q_E$$

Del cual el flujo masico de vapor de GLP o la capacidad de vaporización se ve representada por la ecuación 8:

$$\dot{m} = \frac{P \times (Q_C + Q_E)}{h_{GLP}}$$

Donde:

\dot{m} : Flujo masico de vapor de GLP (kg/h)

P: Factor de llenado

Q_C : Calor transferido por la sección cilíndrica al GLP líquido (W)

Q_E : Calor transferido por la sección esférica al GLP líquido (W)

h_{GLP} : Calor latente de vaporización del GLP (kJ/kg)

La figura 14 muestra el esquema del balance de energía aplicado al cilindro de GLP, considerado como un sistema cerrado. El calor es transferido desde el ambiente hacia el cilindro mediante los mecanismos de convección y radiación, atravesando la pared metálica del recipiente. La energía térmica transferida se emplea exclusivamente en el cambio de fase del GLP líquido a vapor, sin realizar trabajo mecánico ni intercambio de masa con el entorno. Bajo estas condiciones, el flujo másico de vapor generado se determina a partir de la igualdad entre la transferencia total de calor y la energía requerida para la vaporización del GLP remanente.

Con base en el análisis estadístico de los cilindros retornados durante la temporada de invierno de la zona Alta, se determinó que el remanente promedio corresponde a 0.93 kg (7.4 % de llenado) para cilindros de 10 kg y 8.11 kg (14.42 % de llenado) para cilindros de 45 kg. Estos valores fueron seleccionados por representar la condición más desfavorable desde el punto de vista termodinámico.

La presión interna del cilindro asociada a dichos niveles de llenado fue determinada a partir de la relación presión - porcentaje de llenado (Anexo 5), para 7.4% de llenado corresponde una presión de 0.88 kg/cm² y para 14.42 % de llenado una presión interna de 1.07 kg/cm² y con la composición promedio del remanente (4.4 % propano y 95.6 % butano). Posteriormente, se utiliza la gráfica presión – temperatura- composición presentada en el Anexo 2, se obtuvo la temperatura de equilibrio del GLP remanente, resultando -12 °C para el cilindro de 10 kg y -10 °C para el cilindro de 45 kg.

A partir de la temperatura de equilibrio, se determinó el calor latente de vaporización de la mezcla y se evaluó la transferencia de calor desde el ambiente hacia el GLP, considerando los mecanismos de conducción, convección y radiación en geometrías cilíndrica y esférica.

4.3.1 Calor latente de vaporización

A partir de la ecuación (16) se determina el calor latente de vaporización para el propano con el dato de la temperatura de equilibrio en cilindros de 10 kg proveniente de la zona alta en temporada de invierno cuyo valor es $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (los cálculos serán desarrollados para un cilindro de 10 kg) como se describió en párrafos anteriores y considerando los valores de la tabla 5:

h_{v2} : Calor latente de vaporización a T_2

h_{v1} : Calor latente de vaporización a temperatura de ebullición 428 kJ/kg

T_c : Temperatura crítica 369.95 k

T_1 : Temperatura de la sustancia pura en ebullición 231.15 k

T_2 : Temperatura de la sustancia pura en equilibrio $-12\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 261.15\text{ K}$

$$h_{v(\text{propano})} = \left(\frac{T_c - T_2}{T_c - T_1} \right)^{0.38} * h_{v1}$$

$$h_{v(\text{propano})} = \left(\frac{369.95 - 261.15}{369.95 - 231.15} \right)^{0.38} * 428$$

$$h_{v(\text{propano})} = 390.17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para el butano se sigue el mismo orden:

h_{v2} : Calor latente de vaporización a T_2

h_{v1} : Calor latente de vaporización a temperatura de ebullición 388 kJ/kg

T_c : Temperatura critica 425.15 k

T_1 : Temperatura de la sustancia pura en ebullición 272.15 k

T_2 : Temperatura de la sustancia pura en equilibrio $-12\text{ }^\circ\text{C} \sim 261.15\text{ K}$

$$h_{v(\text{butano})} = \left(\frac{T_c - T_2}{T_c - T_1} \right)^{0.38} * h_{v1}$$

$$h_{v(\text{butano})} = \left(\frac{425.15 - 261.15}{425.15 - 272.15} \right)^{0.38} * 388$$

$$h_{v(\text{butano})} = 398.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor latente del GLP:

$$h_{GLP} = (X_{\text{propano}} * h_{v(\text{propano})} + X_{\text{butano}} * h_{v(\text{butano})}) \quad (31)$$

$$h_{GLP} = (0.05 * 391.53 + 0.95 * 399.79)$$

$$h_{GLP} = 399.79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Este valor será utilizado al finalizar los cálculos siguientes en la ecuación 9.

Temperaturas para determinar el coeficiente de convección

Para el cálculo del coeficiente de convección es requerido ciertas temperaturas locales como son la temperatura de película, temperatura de superficie exterior; temperatura del exterior (ambiental) los cuales se escriben en la tabla 18, para los cálculos de transferencia de calor se tomó los valores de la tabla 13 que corresponde a las propiedades climáticas de cada zona (para el desarrollo de los cálculos se trabajara con los valores de la zona alta en invierno, para los valores de la zona Media y Baja los resultados de los cálculos se muestra en tablas 20 y 21).

Tabla 18:

Propiedades del aire para la zona Alta en la temporada de invierno

Condición	T (°C)	T (°K)	K (w/m ^{°k})	$\mu * 10^{-5}$ (kg/ms)	Pr
Temp. Eq. GLP	-12	261.15	0.023	1.655	0.739
Temp. Aire (Te)	5	278.15	0.025	1.737	0.735
Temp. Super (Ts)	-3.50	269.92	0.024	1.698	0.734
Temp. Película	0.75	273.90	0.024	1.717	0.730

Nota: Propiedades del aire calculadas para las temperaturas correspondientes mediante interpolación lineal obtenidas del libro (Cengel, 2007).

Datos geométricos de los cilindros analizados

Se muestra las características geométricas de los cilindros de 10 kg y 45 kg.

Tabla 19:

Características geométricas de los cilindros de 10 kg y 45 kg.

Características geométricas del cilindro	10 kg	45 kg
Diámetro exterior (m)**	0.31	0.37
Diámetro interior (m)**	0.30050	0.36525
Espesor de la plancha (m)*	0.00475	0.00475
Longitud del cilindro (m)**	0.34	1.05
Conductividad térmica K (w/m°K)***	61	61
Emisividad de superficie, ϵ ***	0.93	0.93
Constante de Stefan Boltzman, σ ***	5.67×10^{-8}	5.67×10^{-8}

Nota: Datos obtenidos de (NTP 341-088, 2017)*, (NTP 350.011-1, 2004)** y del anexo 10 (Cengel, 2007)***

4.3.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie cilíndrica

El coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie cilíndrica (h_{conv}), se determina a partir de las ecuaciones 27 y 28:

Re_D : Numero de Reynold

ρ : Densidad del aire (kg/m³)

V : Velocidad del aire en la zona alta en invierno (m/s)

μ : Viscosidad dinámica del aire (kg/ms)

D : Diámetro (m)

$$Re_D = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re_D = \frac{0.827 * 3.34 * 0.31}{1.717 * 10^{-5}}$$

$$Re_D = 49843$$

Este valor es reemplazado en la ecuación 27 y 27.a para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie cilíndrica:

$$h_{conv} = \frac{c \times Re^m \times Pr^{1/3} \times K}{D}$$

$$h_{conv} = \frac{0.027 * 49843^{0.805} * 0.730^{\frac{1}{3}} * 0.024}{0.31}$$

$$h_{conv} = 11.382 \frac{W}{m^2k}$$

4.3.3 Coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie esférica

El coeficiente de transferencia de calor por convección en superficie esférica (h_{conv}), se determina a partir de la ecuación 30:

$$Nu_D = 0.46 * 49843^{0.6} * 0.730^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_D = 272.73$$

El coeficiente de convección para la superficie esférica a partir de la ecuación 27:

$$h_2 = \frac{Nu_D * K}{D}$$

$$h_2 = \frac{272.73 * 0.024}{0.31}$$

$$h_2 = 21.11 \frac{W}{m^2k}$$

4.3.4 Coeficiente de transferencia de calor por radiación

El coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad}), se determina a partir de la ecuación 22:

La emisividad de la superficie del cilindro es $\varepsilon = 0.93$ y la constante de boltzmann es

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2k^4}$$

Entonces:

$$h_{rad} = 0.93 * 5.67 * 10^{-8} * (269.65 + 278.15) * (269.65^2 + 278.15^2)$$

$$h_{rad} = 4.335 \frac{W}{m^2k}$$

Una vez calculado los coeficientes de transferencia de calor, se procede a reemplazar en las siguientes ecuaciones (25 y 26):

4.3.5 Transferencia de calor en la superficie cilíndrica

$$Q_c = \frac{T_e - T_{glp}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k * L} + \frac{1}{2 * \pi * r_2 * L * (h_{rad} + h_{conv})}}$$

$$Q_c = \frac{278.15 - 261.15}{\frac{\ln\left(\frac{0.155}{0.15025}\right)}{2 * \pi * 61 * 0.34} + \frac{1}{2 * \pi * 0.155 * 0.34 * (4.33 + 11.38)}}$$

$$Q_c = 88.36 W$$

4.3.6 Transferencia de calor en la superficie esférica

$$Q_E = \frac{T_e - T_{glp}}{\frac{r_2 - r_1}{4 * \pi * k * r_2 * r_1} + \frac{1}{4 * \pi * r_2^2 * (h_{rad} + h_{conv})}}$$

$$Q_E = \frac{278.15 - 261.15}{\frac{0.155 - 0.15025}{4 * \pi * 61 * 0.155 * 0.15025} + \frac{1}{4 * \pi * 0.155^2 * (4.33 + 21.11)}}$$

$$Q_E = 130.35 \text{ W}$$

4.3.7 Capacidad de vaporización del remanente de GLP.

Por lo tanto, la transferencia de calor total en la geometría del cilindro de GLP es la suma de la transferencia de calor por la superficie cilíndrica y esférica como se menciona en la ecuación (8)

$$Q_2 = 88.36 + 130.35 = 137.11 \text{ W}$$

Con la ecuación (9) se determina el flujo masico de vapor para un porcentaje de llenado de 7.4% el cual equivale a un factor de llenado P de 0.11 obtenido de la tabla 3:

$$\dot{m} = \frac{P * (Q_C + Q_E)}{h_{GLP}}$$

$$\dot{m} = \frac{0.11 * (88.36 + 130.35)}{397.62}$$

$$\dot{m} = 0.058 \text{ W} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kJ}}$$

$$\dot{m} = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Los resultados obtenidos muestran que la capacidad de vaporización del GLP remanente promedio en un cilindro de 10 kg, para la zona alta de la región Cusco durante la temporada de invierno, calculada a temperatura ambiental media, es de 0.20 kg/h. Al comparar este valor con las capacidades de consumo de cocinas domésticas presentadas en la Tabla 2, se observa que dicha capacidad de vaporización solo es comparable al consumo de una cocina de dos

quemadores (0.18 kg/h), mientras que resulta claramente insuficiente para abastecer cocinas de cuatro quemadores (0.36 kg/h) o cocinas con horno (0.55 kg/h).

Es importante señalar que este valor corresponde a condiciones ambientales medias; por lo tanto, bajo temperaturas mínimas características de la zona alta durante el invierno, la capacidad de vaporización del GLP remanente se vería aún más reducida. Esto explica que, en condiciones reales de uso, el remanente de GLP no permita un funcionamiento estable de los artefactos domésticos.

Determinación de la capacidad de vaporización de GLP para un cilindro de 45 kg con remanente

Con el anterior procedimiento se determina los cálculos de capacidad de vaporización para cilindros de 45 kg, con variación en el porcentaje de llenado debido a que en los cilindros de 45 kg el remanente promedio que retorna en invierno de la zona Alta en la región Cusco es de 8.11 kg (tabla 16) y corresponde a un porcentaje de llenado del 14.42% (tabla 25) y una presión de 1.07 kg/cm² (tabla 26), este valor en el diagrama del anexo 2 se ubica para un porcentaje de mezcla en volumen propano/butano (4.4% / 95.6%) obtenido mediante cromatografía de gases para remanente de GLP en la región Cusco (tabla 17), con estas consideraciones se tiene que la temperatura de equilibrio es -10°C.

-Transferencia de calor en la superficie cilíndrica

$$Q_c = \frac{T_e - T_{glp}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k * L} + \frac{1}{2 * \pi * r_2 * L * (h_{rad} + h_{conv})}}$$

$$Q_C = \frac{278.15 - 263.15}{\frac{\ln\left(\frac{0.185}{0.1826}\right)}{2 * \pi * 61 * 1.05} + \frac{1}{2 * \pi * 0.185 * 1.05 * (4.35 + 10.98)}}$$

$$Q_C = 280.67 \text{ W}$$

-Transferencia de calor en la superficie esférica

$$Q_E = \frac{T_e - T_{glp}}{\frac{r_2 - r_1}{4 * \pi * k * r_2 * r_1} + \frac{1}{4 * \pi * r_2^2 * (h_{rad} + h_{conv})}}$$

$$Q_E = \frac{278.15 - 263.15}{\frac{0.185 - 0.1826}{4 * \pi * 61 * 0.185 * 0.1826} + \frac{1}{4 * \pi * 0.185^2 * (4.35 + 19.65)}}$$

$$Q_E = 154.75 \text{ W}$$

Por lo tanto, la capacidad de vaporización se determina con la ecuación (9) el cual está en función al calor latente de vaporización a la temperatura de equilibrio para un porcentaje de llenado de 14.42%, de la tabla 3 el valor de P es 0.2.

$$\dot{m} = \frac{P * (Q_C + Q_E)}{h_{GLP}}$$

$$\dot{m} = \frac{0.2 * (280.67 + 154.75)}{396.53}$$

$$\dot{m} = 0.21 \text{ W} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kJ}}$$

$$\dot{m} = 0.78 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Los cilindros de GLP de 45 kg son comúnmente empleados en aplicaciones de mayor demanda térmica, tales como cocinas industriales, hornos, quemadores y otros equipos

industriales que requieren un suministro continuo de GLP. No obstante, los resultados obtenidos muestran que, bajo condiciones de invierno en la zona alta y para una composición del remanente predominantemente rica en butano (95.6 %), la capacidad de vaporización disponible del cilindro (0.78 kg/h bajo temperatura media invernal en la zona alta) resulta limitada frente a los consumos típicos de estos equipos. Esta condición puede generar restricciones operativas, aun cuando el cilindro contenga una cantidad apreciable de GLP líquido.

Al comparar este valor con las capacidades de consumo presentadas en la Tabla 2, se evidencia que la capacidad de vaporización del remanente es insuficiente para cubrir la demanda de equipos industriales y semiindustriales, siendo adecuada únicamente para aplicaciones de menor consumo.

Tabla 20:

Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de 10 kg según zona, temporada y condición térmica.

ZONA	Temporada	Cilindro	Temperatura media (°C)	Capacidad de vap. (kg/h)	Temperatura mínima (°C)	Capacidad de vap. (kg/h)
ALTA	Invierno	10 kg	5	0.20	-6	0.070
	Verano	10 kg	10	0.23	5	0.16
MEDIA	Invierno	10 kg	7.5	0.13	-1	0.074
	Verano	10 kg	11	0.08	6	0.06
BAJA	Invierno	10 kg	21	0.10	13	0.078
	Verano	10 kg	23	0.08	19	0.07

Nota: Calculado con el valor remanente promedio en la temporada de invierno y verano para los cilindros de 10 kg: invierno en la zona alta 0.93 kg, zona media 0.41 kg, zona baja 0.18 kg, en verano en la zona alta 0.49 kg, en la zona media 0.26 kg, en la zona baja 0.13 kg. Para una composición promedio del remanente de GLP 4.4 % propano y 95.6 % n-butano.

De la tabla 20, en la zona alta se obtienen los mayores valores de capacidad de vaporización tanto en invierno como en verano, alcanzando 0.20 kg/h y 0.23 kg/h respectivamente bajo temperaturas medias. Este comportamiento se explica por la mayor cantidad de remanente promedio registrada en esta zona, lo que incrementa el área efectiva de transferencia de calor y favorece el proceso de vaporización. No obstante, al considerar las temperaturas mínimas, la capacidad de vaporización se reduce significativamente hasta 0.070

kg/h en invierno, lo que representa una disminución superior al 60 %, evidenciando la fuerte influencia de las condiciones térmicas desfavorables.

Asimismo, la reducción de la capacidad de vaporización observada bajo condiciones de temperatura mínima, especialmente en la zona alta durante la temporada de invierno, está directamente relacionada con la composición del GLP remanente, predominantemente butano. El n-butano presenta un punto de ebullición cercano a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que a temperaturas ambientales bajo cero su presión de vapor disminuye considerablemente, limitando su capacidad de pasar a fase gaseosa. Dado que el remanente analizado contiene en promedio más del 95 % de n-butano, la vaporización natural del GLP se ve severamente restringida en escenarios térmicos desfavorables, aun cuando exista un gradiente de temperatura entre el ambiente y el fluido. Esta condición explica los bajos valores de flujo másico de vapor obtenidos en invierno y confirma que, en cilindros de 10 kg con bajo nivel de llenado, la vaporización está controlada principalmente por las limitaciones termodinámicas del butano a bajas temperaturas, más que por la disponibilidad de área de transferencia de calor.

En la zona media, la capacidad de vaporización presenta valores intermedios, con 0.13 kg/h en invierno y 0.08 kg/h en verano a temperatura media. A pesar de que las temperaturas ambientales son más favorables que en la zona alta, la menor cantidad de remanente disponible limita el flujo másico de vapor generado. Bajo condiciones de temperatura mínima, los valores se reducen hasta 0.074 kg/h en invierno, confirmando que, a bajos niveles de llenado, la vaporización se encuentra restringida incluso en zonas de altitud media.

En la zona baja, se observan las menores capacidades de vaporización, con valores cercanos a 0.10 kg/h en invierno y 0.08 kg/h en verano a temperatura media. En este caso, aunque las temperaturas ambientales son más elevadas, la reducida cantidad de remanente

promedio (0.18 kg en invierno y 0.13 kg en verano) limita el aporte energético necesario para sostener una vaporización continua. Este comportamiento explica por qué algunos valores de capacidad de vaporización resultan similares entre zonas y temporadas, ya que el efecto favorable de la temperatura se ve compensado por la menor masa de GLP remanente.

Tabla 21:

Capacidad de vaporización de GLP remanente en cilindros de 45 kg según zona, temporada y condición térmica.

ZONA	Temporada	Cilindro	Temperatura media (°C)	Capacidad de vap. (kg/h)	Temperatura mínima (°C)	Capacidad de vap. (kg/h)
ALTA	Invierno	45 kg	5	0.78	-6	0.21
	Verano	45 kg	10	0.65	5	0.46
MEDIA	Invierno	45 kg	7.5	0.43	-1	0.24
	Verano	45 kg	11	0.30	6	0.25
BAJA	Invierno	45 kg	21	0.36	13	0.28
	Verano	45 kg	23	0.20	19	0.18

Nota: Calculado con el valor remanente promedio en la temporada de invierno y verano para los cilindros de 45 kg: invierno en la zona alta 8.11 kg, zona media 3.33 kg, zona baja 1.46 kg, en verano en la zona alta 5.71 kg, en la zona media 2.27 kg, en la zona baja 0.75 kg. Para una composición promedio del remanente de GLP 4.4 % propano y 95.6 % n-butano.

Los resultados obtenidos para los cilindros de 45 kg (tabla 21) muestran una capacidad de vaporización significativamente mayor en comparación con los cilindros de 10 kg, lo cual se explica por la mayor superficie de transferencia de calor disponible y por el mayor volumen de

GLP remanente presente en estos recipientes. En condiciones de temperatura media, la capacidad de vaporización varía entre 0.20 y 0.78 kg/h, mientras que bajo temperaturas mínimas se reduce a un rango de 0.18 a 0.46 kg/h, evidenciando la fuerte dependencia del proceso con la temperatura ambiental.

Cabe señalar que los cilindros de 45 kg no están destinados principalmente al uso doméstico, sino que se emplean en cocinas industriales, equipos de procesamiento térmico, hornos, calderos de pequeña escala y otros sistemas de consumo continuo de GLP. Por ello, la evaluación de la capacidad de vaporización del remanente en este tipo de cilindros resulta relevante para analizar posibles limitaciones operativas en aplicaciones de mayor demanda energética, especialmente bajo condiciones climáticas adversas.

En la zona alta, durante la temporada de invierno, se obtuvo la mayor capacidad de vaporización a temperatura media (0.78 kg/h), asociada al mayor remanente promedio registrado en esta zona. Sin embargo, cuando se consideran temperaturas mínimas, la capacidad se reduce hasta 0.21 kg/h, lo que representa una disminución superior al 70 %, confirmando que el proceso de vaporización del GLP remanente se encuentra limitado por la disponibilidad de calor del entorno.

Sin embargo, también es importante considerar el efecto de la tasa de consumo en el análisis del remanente del GLP, se elaboró una tabla de escenarios de uso que relaciona la tasa de consumo de una cocina, el tiempo de consumo y la capacidad de vaporización del cilindro. Esta aproximación permite evaluar condiciones operativas reales tanto en aplicaciones domésticas como comerciales.

Tabla 22:

Escenarios de consumo de GLP, capacidad de vaporización y efecto térmico en cilindros de GLP de 10 kg y 45 kg

Tipo de uso	Tipo de cilindro	Tiempo de uso continuo	Consumo estimado (kg/h)	Capacidad vaporización referencial (kg/h)	Relación consumo/vaporización	Efecto térmico esperado en el cilindro	Riesgo de congelamiento	Impacto en remanente	Recomendación técnica
Doméstico bajo	10 kg	15 - 30 min	0.2 - 0.3	> 1.0	Muy inferior	Temperatura estable	Bajo	Bajo	Uso normal
Doméstico medio	10 kg	1 h	0.3 - 0.5	~1.0	Inferior	Enfriamiento leve	Bajo	Moderado	Uso normal
Doméstico intensivo	10 kg	2 h - 3 h	0.5 - 0.8	~0.8	Cercano al límite	Enfriamiento moderado	Medio	Alto	Evitar uso prolongado continuo
Comercial moderado	45 kg	2 h - 4 h	1.0 - 1.5	1.5 - 2.5	Cercano al límite	Enfriamiento significativo	Alto	Alto	Uso controlado
Comercial intenso	45 kg	4 h - 8 h	2.0 - 3.0	< 2.0	Supera capacidad	Enfriamiento extremo (escarcha)	Muy alto	Muy alto	Uso de sistema manifold (≥ 2 cilindros de 45 kg)

Nota: Elaboración propia basada en la interpretación de la curva de capacidad de vaporización del GLP en función de la temperatura y el tiempo de uso (figura 15 y anexo 11, 12 y 13), así como en los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación.

La tabla 22 fue elaborada a partir de la interpretación de curvas de vaporización del GLP (figura 15) en función de la temperatura ambiente y el tiempo de uso. Se consideraron condiciones representativas de operación en la región Cusco, tomando como referencia un rango de temperatura ambiental entre 0 °C y 10 °C, así como periodo de consumo continuo aproximado de una hora.

Asimismo, se evaluaron distintos escenarios de uso representativos (doméstico y comercial), considerando consumos que varían entre 0.2 kg/h y 3 kg/h, asociados al funcionamiento de equipos como cocinas de dos y cuatro hornillas, así como cocinas domésticas y semi industriales.

En escenarios de consumo doméstico, típicamente asociados al uso de cilindros de 10 kg y demandas moderadas (0.2-0.5 kg/h), la extracción de gas ocurre de manera progresiva, permitiendo que el calor ambiental compense la energía requerida para la vaporización del GLP. En estas condiciones el enfriamiento del cilindro es limitado y la generación de remanente resulta menor.

Sin embargo, en aplicaciones comerciales o de alta demanda, como el uso de cilindros de 45 kg conectados a cocinas semiindustriales o múltiples quemadores, la tasa de consumo puede superar 1.5 – 2.0 kg/h durante periodos prolongados. Bajo estas condiciones, la vaporización del GLP se intensifica, generando un enfriamiento progresivo que puede alcanzar temperaturas por debajo del punto de rocío del aire (debido al carácter endotérmico del proceso de cambio de fase), originando la formación de escarcha o el denominado “congelamiento” del cilindro. Este fenómeno reduce la presión interna y limita aún más la vaporización, generando un efecto acumulativo que favorece la aparición de remanente.

En este sentido, el problema del remanente no solo depende de la temperatura ambiental, sino también del régimen de consumo, siendo más crítico en aplicaciones comerciales o industriales donde la demanda de gas es continua y elevada.

A partir de este análisis, se propone como alternativa técnica el uso de sistemas de cilindros múltiples conectados en paralelo (manifold), especialmente en aplicaciones comerciales o en zonas de baja temperatura. Esta configuración permite distribuir la demanda de gas entre dos o más cilindros, reduciendo la tasa de extracción individual, mitigando el enfriamiento excesivo y mejorando la estabilidad del suministro.

4.4 Composición de GLP para tener un consumo energético eficiente en la región Cusco

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que uno de los factores que limita el aprovechamiento total del GLP en la región Cusco es la composición del GLP, particularmente el alto contenido de n-butano en los remanentes.

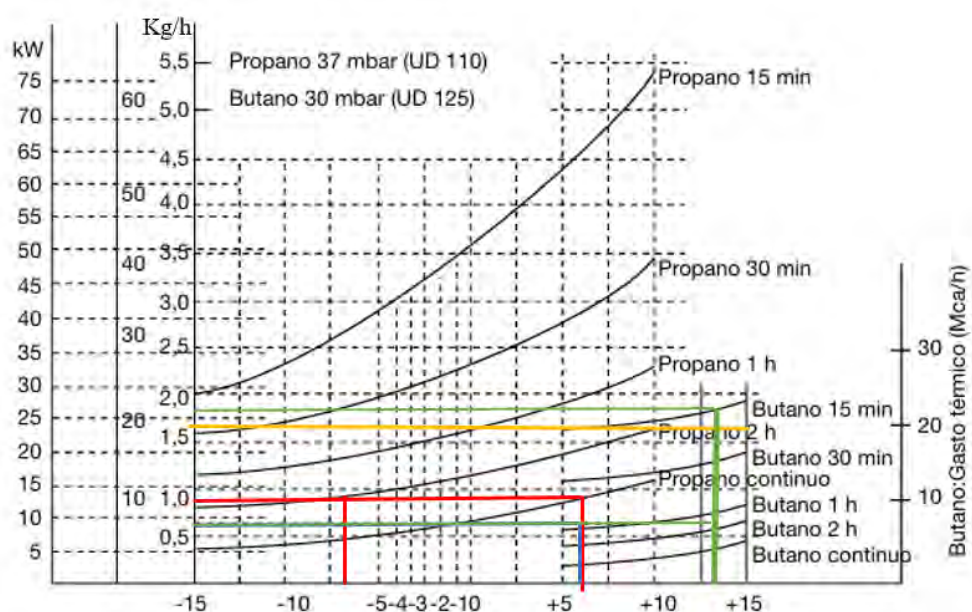
En este contexto, la definición de una composición referencial de GLP se fundamentó en tres criterios técnicos. En primer lugar, se realizaron cálculos de capacidad de vaporización, verificando que una composición con mayor proporción de propano, e incluso 100 % propano, permite alcanzar un flujo de vaporización superior a la demanda energética de los equipos de consumo de GLP. A continuación, se evaluó el comportamiento termodinámico de los componentes del GLP, analizado a partir de la relación entre la capacidad de vaporización, el tiempo de consumo y la temperatura ambiental (Figura 15), donde se evidencia que el propano presenta un mejor desempeño en condiciones de baja temperatura en comparación con el butano. Finalmente, se tomó como referencia normativa y práctica internacional el caso de Australia AS/NZS 1596 (Council of Standards Australia, 2002), donde el GLP de uso residencial está

compuesto predominantemente por propano, debido a su mayor eficiencia de vaporización en climas fríos.

En la siguiente figura se muestra la capacidad de vaporización del propano y del butano en función a la temperatura del ambiente y tiempo de consumo.

Figura 15:

Capacidad de vaporización para cilindros de GLP



Nota: Capacidad de vaporización referencial para un nivel de llenado del 30 %, condición representativa del régimen crítico de vaporización del GLP remanente en cilindros próximos al retorno (Lopez, 2001).

En la figura 15 se puede observar gráficamente el comportamiento del propano y butano en función a la temperatura ambiental y el periodo de consumo. Cabe señalar que el 30 % de la capacidad de llenado no representa una condición fija ni constante en la operación real de los cilindros, sino que se adopta como un escenario conservador y representativo del estado crítico

del cilindro cuando el contenido de GLP es bajo y comienzan a manifestarse limitaciones de vaporización, situación que coincide con el objetivo del presente estudio, enfocado en el análisis del GLP remanente.

Analizando para las condiciones de las zonas altas (Canchis, Chumbivilcas, Canas, Espinar y distrito de Ocongate) donde la temperatura ambiental mínima promedio es de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno y considerando un periodo de consumo de 2 horas (en la mañana y en la noche) el gas propano tiene una capacidad de vaporización de 0.8 kg/h (línea roja) siendo este valor suficiente para una cocina de 4 quemadores más horno.

Para la temperatura media promedio de las zonas altas en la temporada de invierno, que es de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (línea roja), en la figura 15 se observa que el gas butano inicia su proceso de vaporización a partir de esta temperatura; sin embargo, para alcanzar una capacidad de vaporización mayor a 0.55 kg/h , requerida por los artefactos de uso doméstico, es necesario limitar el periodo de consumo a aproximadamente 1 hora.

En contraste, el propano presenta un comportamiento más favorable, ya que para la misma temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ es capaz de generar una capacidad de vaporización del orden de 0.8 kg/h bajo condiciones de consumo continuo, además de iniciar su vaporización a temperaturas ambientales inferiores.

Este comportamiento evidencia que, bajo las condiciones térmicas características de las zonas altas en invierno, resulta necesario incrementar la proporción de propano en la mezcla de GLP a fin de garantizar un suministro adecuado y continuo del GLP.

En consecuencia, un cilindro que contenga gas propano puro resulta el más adecuado para las zonas altas, ya que, para una temperatura mínima promedio de aproximadamente $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$

durante la temporada de invierno, el propano es capaz de proporcionar una capacidad de vaporización suficiente para satisfacer los requerimientos de los artefactos domésticos.

En dichas condiciones térmicas, la capacidad de vaporización del propano puede variar desde aproximadamente 0.5 kg/h, valor mínimo requerido por una cocina promedio de uso doméstico, hasta 0.8 kg/h para un periodo de consumo de 2 horas, 1.3 kg/h para un periodo de consumo de 1 hora y hasta 1.8 kg/h para un periodo de consumo de 30 minutos. Estos resultados evidencian que el propano mantiene un desempeño adecuado incluso bajo condiciones ambientales desfavorables.

Para las provincias de la zona media, que incluyen Paruro, Quispicanchi, Acomayo, Anta y Cusco, la temperatura media promedio durante la temporada de invierno es de aproximadamente 7.5 °C, mientras que la temperatura mínima promedio alcanza valores cercanos a -1 °C.

Para este rango de temperaturas, en la figura 17 (línea verde) se observa que, a la temperatura media promedio (7.5 °C), el butano puede alcanzar capacidades de vaporización comprendidas entre 0.55 kg/h y 1.8 kg/h, dependiendo del periodo de consumo, valores que resultan suficientes para abastecer los requerimientos de los artefactos domésticos típicos.

Sin embargo, a medida que la temperatura ambiental disminuye, particularmente en condiciones cercanas a la temperatura mínima promedio (-1 °C), se evidencia que el butano presenta una marcada reducción en su capacidad de vaporización, mientras que el propano mantiene un desempeño superior, permitiendo alcanzar capacidades de vaporización iguales o mayores a 0.55 kg/h. Esto se debe a que el butano presenta limitaciones significativas de vaporización a temperaturas inferiores a aproximadamente 5 °C.

En función de este comportamiento, para la zona media se recomienda una composición de GLP con una mayor proporción de propano, del orden de 80 % propano y 20 % butano, o alternativamente 90 % propano y 10 % butano. Estas mezclas presentan una curva de presión de vapor intermedia, más cercana a la del propano puro, lo que permite asegurar una capacidad de vaporización adecuada bajo las variaciones térmicas características de esta zona.

Para las provincias de la zona baja, que comprenden La Convención, Urubamba, Paucartambo y Calca, la temperatura media promedio durante la temporada de invierno es de 21 °C, mientras que la temperatura mínima promedio se sitúa alrededor de 13 °C.

Para este rango térmico, en la figura 15 se observa que, a temperaturas superiores a 15 °C, el butano es capaz de generar capacidades de vaporización mayores a 0.50 kg/h, incluso bajo condiciones de consumo continuo, valores suficientes para satisfacer los requerimientos de los artefactos domésticos convencionales.

No obstante, a pesar de estas condiciones térmicas favorables, se identificó que los cilindros provenientes de la zona baja aún retornan con contenido remanente de GLP, lo que sugiere que la composición del GLP también desempeña un papel relevante en la generación de remanentes. En este contexto, se recomienda para la zona baja una composición de GLP de aproximadamente 80 % propano y 20 % butano, con el objetivo de mejorar la estabilidad de la vaporización y reducir la probabilidad de remanentes, manteniendo al mismo tiempo un desempeño adecuado bajo las condiciones climáticas de la zona.

En el caso de los cilindros de 45 kg, los cuales son utilizados predominantemente en establecimientos comerciales tales como restaurantes, hostales, hoteles y otros negocios, estos

suelen estar conectados a cocinas semiindustriales cuya capacidad de consumo de GLP es de 1.66 kg/h a más (tabla 2).

De acuerdo con la figura 15 (línea amarilla), se observa que el propano es capaz de satisfacer este nivel de consumo en un amplio rango de temperaturas ambientales, comprendido aproximadamente entre $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir de temperaturas superiores a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, el butano también presenta una capacidad de vaporización suficiente para abastecer los requerimientos de estos artefactos.

En consecuencia, y considerando las condiciones térmicas de cada zona, se propone que la composición del GLP en cilindros de 45 kg siga el mismo criterio establecido para los cilindros de 10 kg, recomendándose: 100 % propano para la zona alta, 90 % propano y 10 % butano para la zona media, y 80 % propano y 20 % butano para la zona baja.

El análisis de los datos obtenidos evidencia que, durante la temporada de invierno, debido a la menor temperatura ambiental, se reduce significativamente la capacidad de vaporización del GLP, especialmente del butano. Esta condición se refleja en los mayores volúmenes de GLP remanente retornados al taller de mantenimiento, observándose que en los cilindros de 10 kg provenientes de la zona alta retorna en promedio 0.93 kg de GLP, mientras que en los cilindros de 45 kg retorna un promedio de 8.11 kg de GLP.

Estos resultados confirman que, bajo condiciones de baja temperatura, la energía disponible para la vaporización del combustible es insuficiente para satisfacer la demanda de los artefactos de uso doméstico y semi industrial, reforzando la necesidad de ajustar la composición del GLP distribuido en las provincias de la región Cusco, incrementando la proporción de propano para mejorar la vaporización del GLP en zonas altas.

Este enfoque se encuentra respaldado por normativas internacionales, como la AS/NZS 1596 (Council of Standards Australia, 2002), aplicada en Australia, la cual establece lineamientos para la instalación de sistemas de GLP, incluyendo el uso de múltiples cilindros en paralelo. Cabe señalar que las condiciones climáticas de algunas regiones de Australia, como Melbourne, presentan temperaturas mínimas promedio entre 6 °C (junio y julio) y 14 °C (enero y febrero) (Weather Spark, 2026), comparables con las condiciones térmicas de la región Cusco. Asimismo, en Australia el GLP utilizado en aplicaciones residenciales está compuesto principalmente por propano, debido a su mejor desempeño en condiciones de baja temperatura, lo que favorece su vaporización (Hahn, 2025; Hardie & Co Plumbing, 2026).

4.4.1 Propuesta de composición de GLP según zona climática en la región Cusco

De acuerdo con la NTP 350.011, la presión de diseño de los recipientes portátiles de GLP es del orden de 1.70 MPa (\approx 17 bar), valor que representa el límite máximo seguro de operación del cilindro.

Dado que la presión del GLP depende considerablemente de la temperatura, se evaluó el efecto del calentamiento por radiación solar (“sol directo”), considerando temperaturas superficiales del cilindro entre 25°C y 30°C, condiciones representativas máximas de exposición a la radiación solar en la región Cusco (Weather Spark, 2025).

Tabla 23:*Datos termodinámicos de presión de vapor.*

Componente	Presión (bar) a $T_{\text{prom.}} 15^{\circ}\text{C}$	Presión (bar) a $T_{\text{max.}} 37.8^{\circ}\text{C}$
Propano	8	14.3
Butano	2	4.8
Mezcla 80/20	~6.5-7.0	~11 - 12

Nota: Obtenido de (NTP 321.007, 2002)

Sin embargo, incluso bajo condiciones de calentamiento por radiación solar (tabla 23), las presiones generadas por mezclas típicas de GLP (incluyendo 80/20) se mantienen por debajo del límite de diseño de 17 bar, lo que confirma la viabilidad de su uso desde el punto de vista de seguridad.

Adicionalmente, según la normativa técnica (NTP 350.074-1, 1995) las válvulas de alivio están diseñadas para actuar ante sobrepresiones máximas de 20 bares a presiones de servicio del orden de 0.05 bar, reforzando el margen de seguridad del sistema.

La propuesta se fundamenta en que la presión de vapor y la capacidad de vaporización del propano son significativamente superiores a las del butano a bajas temperaturas, condición característica de las zonas altoandinas, mientras que en zonas de menor altitud el butano puede vaporizar de manera adecuada.

Zona alta (> 3500 m.s.n.m.)

Provincias: Canchis, Canas, Chumbivilcas, Espinar, distrito de Ocongate

Temperatura mínima promedio: $\approx -6^{\circ}\text{C}$

Composición propuesta: 100 % propano

Justificación:

El butano no vaporiza de manera efectiva por debajo de 5 °C.

El propano garantiza capacidades de vaporización ≥ 0.5 kg/h incluso a -6 °C.

Reduciría el retorno de cilindros aparentemente llenos y evitaria prácticas inseguras por parte del usuario.

Zona media (3000 – 3500 m.s.n.m.)

Provincias: Cusco, Paruro, Anta, Acomayo, Quispicanchi

Temperatura mínima promedio: ≈ -1 °C

Composición propuesta: 90 % propano – 10 % butano (alternativamente 80%/20%, propano/butano)

Justificación:

A temperaturas cercanas a 0 °C el butano presenta vaporización limitada.

El aumento de propano desplaza la curva de presión de vapor hacia valores adecuados para su consumo.

Permite abastecer cocinas domésticas y semi industriales sin generar remanentes significativos.

Zona baja (1000 – 2999 m.s.n.m.)

Provincias: La Convención, Urubamba, Calca, Paucartambo

Temperatura mínima promedio: ≈ 13 °C

Composición propuesta: 80 % propano – 20 % butano

Justificación:

A temperaturas mayores a 15 °C el butano vaporiza adecuadamente.

La inclusión de butano reduce costos sin comprometer la capacidad de vaporización.

Se minimiza la presencia de remanentes observados en los cilindros retornados.

En este contexto, el incremento en la proporción de propano, propuesto para mejorar la vaporización en zonas de baja temperatura, resulta técnicamente viable, siempre que se mantenga dentro de rangos controlados (por ejemplo, mezclas 80/20 y 90/10), ya que permite un equilibrio adecuado entre eficiencia operativa y seguridad.

A partir del análisis de la capacidad de vaporización del GLP remanente, de las condiciones climáticas de la región Cusco y del comportamiento termodinámico del propano y el butano (figura 15), se propone una composición referencial de GLP diferenciada por zona climática y altitud, con el objetivo de minimizar la generación de remanentes y garantizar el suministro adecuado de energía a los artefactos domésticos y semi industriales.

Estos resultados se corroboran con el (ASTM D1835, 2022), especificación estándar para gases licuados de petróleo (GLP), en el que especifican que el Propano comercial es adecuado para uso doméstico, comercial e industrial, especialmente en zonas geográficas y épocas del año donde las bajas temperaturas ambientales son frecuentes y donde la uniformidad del combustible es un factor importante. Asimismo, las mezclas comerciales de PROPANO-BUTANO, al abarcar

una amplia gama de mezclas, permite adaptarlo a necesidades específicas, refiriendo a que estas diversas mezclas se utilizan como combustible doméstico, comercial e industrial en zonas y momentos en que no se presentan bajas temperaturas ambientales.

4.5 Análisis de costo

Las pérdidas económicas asociadas al remanente de GLP fueron estimadas considerando un valor referencial de S/ 49.00 por cilindro de 10 kg y S/ 200.00 por cilindro de 45 kg, precios correspondientes al periodo de análisis, aun cuando a la fecha dichos valores han experimentado variaciones.

Tabla 24:

Precio reportado por los operadores de los locales de venta GLP

Cilindro de GLP	Precio
5 kg	25.00
10 kg	49.00
15 kg	71.00
45 kg	200.00

Nota: Los precios de venta al público de los cilindros de GLP fueron obtenidos del aplicativo Facilito de Osinergmin. Los valores mostrados en la tabla 24 corresponden al mes de diciembre de 2025 en la región Cusco. Se considera que la variación de precios a lo largo del año y entre las temporadas de invierno y verano no presenta cambios significativos que alteren de manera sustancial las estimaciones económicas realizadas.

Según lo mostrado en la Figura 17 (Anexo15), durante la temporada de invierno los cilindros de 10 kg retornan con un remanente promedio de 0.50 kg, lo que equivale a un valor

monetario aproximado de S/ 2.45 por cilindro, si según (ERCUE, 2021) en la región Cusco se consume 387 636 cilindros por mes representa un monto estimado de S/ 949 708.00 mensuales asociados a GLP no consumido a nivel domiciliario en la región Cusco.

En el caso de los cilindros de 45 kg, el remanente promedio observado en invierno es de 4.3 kg por cilindro, equivalente a S/ 19.10 y el consumo total de estos cilindros en la región Cusco es de 4 884 por mes. Considerando una reposición mensual por establecimiento, el valor monetario del remanente asciende aproximadamente a S/ 93 248.00 mensuales.

En conjunto, el valor económico del GLP remanente retornado hacia las plantas envasadoras alcanza aproximadamente S/ 1 042 992.00 mensuales. Estos resultados evidencian que el fenómeno del remanente de GLP no solo constituye una limitación técnica asociada a la capacidad de vaporización del GLP, sino que también genera un impacto económico significativo para los usuarios finales en la región Cusco.

Entendiendo que no se puede petitionar que las envasadoras cambien la composición del GLP para cada zona y para cada temporada (invierno o verano) se puede concluir y recomendar un rango de composición GLP para la región Cusco y sus correspondientes provincias que comprende desde los 1050 m.s.n.m. hasta los 4000 m.s.n.m. cuyas temperaturas ambientales promedio varían desde los -6 °C hasta los 21 °C, la composición del GLP deba mantenerse en un rango de propano/butano (80%/20%, 90%/10% hasta 100% propano).

En ese sentido, este trabajo propone una modificación directa de la composición comercial del GLP, y aporta evidencia técnica que explica el origen del remanente, cuantifica su impacto energético y económico, y demuestra que el fenómeno observado es consecuencia directa de las condiciones climáticas y altitudinales de la región Cusco.

CONCLUSIONES

1. Se concluye que la temperatura ambiental influye significativamente en la capacidad de vaporización del GLP, evidenciándose un incremento del 54.3 % en el contenido de remanente durante la temporada de invierno en comparación con el verano, debido a la reducción de la eficiencia de vaporización en condiciones de baja temperatura.
2. Se determinó que los cilindros de 10 kg presentan un remanente promedio de 0.359 kg, mientras que los cilindros de 45 kg alcanzan un promedio de 3.135 kg, evidenciando que el tamaño del cilindro y las condiciones térmicas influyen directamente en la cantidad de GLP no aprovechado.
3. Se concluye, mediante análisis cromatográfico, que el GLP remanente presenta una alta concentración de butano comercial, alcanzando hasta 95.6 % y propano comercial 4.4 %, lo cual limita su capacidad de vaporización en condiciones de baja temperatura, debido a su menor volatilidad respecto al propano comercial.
4. Se concluye que la composición del GLP influye directamente en su desempeño, determinándose que mezclas con mayor proporción de propano (80/20, 90/10 y 100 % propano) permiten mejorar la vaporización y garantizar un consumo más eficiente en condiciones de baja temperatura.
5. Se concluye que la optimización del aprovechamiento del GLP en la región Cusco requiere no solo el ajuste de la composición de la mezcla de GLP, sino también la consideración de las condiciones de uso, como la tasa de consumo y la temperatura ambiental, a fin de minimizar pérdidas económicas y mejorar la eficiencia del sistema.

RECOMENDACIONES

1. Ajustar la composición del GLP en función de la temperatura ambiental en la norma NTP 321.007, incrementando el porcentaje de propano en mezclas destinadas a condiciones de baja temperatura, a fin de mejorar la capacidad de vaporización.
2. Optimizar el sistema de suministro de GLP en aplicaciones de alta demanda, promoviendo el uso de configuraciones que mejoren la transferencia de calor, como el empleo de múltiples cilindros en paralelo (manifold), sistemas estacionarios o cilindros de mayor diámetro con el fin de incrementar el área de transferencia térmica y reducir la generación de remanente.
3. Evaluar la necesidad de complementar la normativa técnica vigente con criterios relacionados a condiciones de temperatura ambiental en la especificación de mezclas de GLP, a fin de mejorar su desempeño en distintas condiciones operativas.
4. Promover la difusión de información técnica a los usuarios sobre la influencia de la temperatura en el consumo de GLP, así como el uso adecuado de mezclas según condiciones ambientales.
5. Desarrollar futuras investigaciones orientadas a evaluar el comportamiento del GLP en otras regiones con condiciones climáticas similares, así como el impacto económico asociado al remanente en diferentes escenarios de consumo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Achille, T. (2014). Manual de instalacion de GLP. *Shopping S.A.*

<https://es.scribd.com/document/646669197/Manual-de-instalacion-GLP>

ASTM D1835. (2022). *Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases.*

<https://store.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/workitem-wk91297>

ASTM D2163. (2023). *Metodo de prueba estandar para la determinacion de hidrocarburos en gases licuados de petroleo y mezclas de propano/propeno mediante cromatografia de gases.* 1–15. <https://doi.org/10.1520/D216>

Barry, R., & Chorley, R. (2017). *Atmósfera, tiempo y clima* (Omega (ed.); 4th ed.). Methuen & Co, Ltd. <https://doi.org/10.31876/SL.VIII.3>

Becco, L. (1992). *Los gases licuados de petroleo* (Repsol-butano (ed.)).

Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. In *Biotechnology Letters* (Tercera, Vol. 18, Issue 12). McGraw Hill Book Company, INC. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>

Council of Standards Australia. (2002, May). *The storage and handling of LP gas. 1.*

ERCUE. (2021). Informe de Resultados Hidrocarburos Líquidos y GLP. *Osinermin.*

<https://www.gob.pe/institucion/osinermin/informes-publicaciones/2507564-encuesta-residencial-de-consumo-y-usos-de-energia-ercue-2019-2020>

Fisher. (2021). *Manual de Servicio de Gas-LP-10.*

<https://www.emerson.com/documents/automation/product-brochure-lp-10-lp-gas-serviceman-s-handbook-fisher-es-es-7116388.pdf>

- Hernandez, R. (2014). Metodología de la investigación. In *Sustainability (Switzerland)* (sexta, Vol. 11, Issue 1). McGraw Hill Book Company, INC.
http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Holman, J. P. (1999). Transferencia de calor por Radiación. In *Transferencia de calor*. McGraw Hill Book Company, INC.
<https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/10/transferencia-de-calor-holman.pdf>
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. In Copyright (Ed.), *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ta ed.). https://nodo.ugto.mx/wp-content/uploads/2018/07/INCROPERA_-_Transferencia_de_calor.pdf
- INEI. (2001). Conociendo Cusco. *Inei*, 53(1), 165.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib0426/Libro.pdf
- ISO 4257. (2001). *Liquefied petroleum gases - Method of sampling* (2nd ed.). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23699/14558b2644dd4c17ac63448295e8d552/ISO-4257-2001.pdf>
- Limagas. (2018). *HOJA DE DATOS DE seguridad del GLP* (Vol. 704).
- Linde. (2022a). *Butano, Hoja de datos de seguridad P-4572*. 1–7.
https://static.pr.dchannel.linde.com/wcsstore/MX_LINDE_CatalogueAS/Attachment/Hoja

s-de-seguridad/MXPR2.0FX.pdf

Linde. (2022b). *Propano, Hoja de datos de seguridad P-4646*. 1–8.

https://static.prn.echannel.linde.com/wcsstore/MX_LINDE_CatalogueAS/Attachment/Hojas-de-seguridad/MXPR2.0FX.pdf

Lopez, J. (2001). *Manual de instalaciones de GLP*.

NTP. 321.121. (2018). *Instalaciones internas de GLP para consumidores directos y redes de distribución. Lima 27*.

NTP 321.007. (2002). *Gas licuado de petróleo*.

NTP 341-088. (2017). *Planchas delgadas de acero al carbono para la fabricación de recipientes portátiles para gases licuados de petróleo*. <https://es.scribd.com/doc/88378102/NTP-341-088-Planchas-delgadas>

NTP 350.011-1. (2004). *Recipientes Portátiles de 3 kg, 5kg, 10 kg, 15 kg y 45 kg de capacidad para gases licuados de petróleo. Requisitos de fabricación*. (Vol. 1). https://studylib.net/doc/26218881/ntp-350.011-1-2004#google_vignette

NTP 350.074-1. (1995). *Recipientes portátiles para gases licuados de petróleo. Reguladores de baja presión*. (p. 6). <https://es.scribd.com/document/543563841/NTP-350-074-1-Recipientes-portatil-para-gases-licuados-de-petroleo-Reguladores-de-baja-presion-para-uso-domestico-Parte-1>

Osinermin. (2011, September). *Propiedades y características del GLP*.

<https://es.scribd.com/document/386974268/Propiedades-y-Caracteristicas-Del-GLP>

Osinermin. (2025, March). *Registro de Hidrocarburos Hábiles*.

<http://srvtest03.osinerg.gob.pe:23314/msfh5/registroHidrocarburos.xhtml?method=excel#>

OSINERGMIN. (1994, May 17). *Decreto Supremo N° 27-94-EM Reglamento de Seguridad para Instalaciones y Transportes de Gas Licuado de Petróleo.*

<https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/728454-027-94-em>

Pluspetrol. (2018). *Hoja de datos de seguridad de materiales.*

<https://es.scribd.com/document/582478746/HDSM-0181-E-GAS-LICUADO-DE-PETROLEO-GLP-01-07-2018-pluspetrol>

Portales, C. (2020). *Diseño de un regulador de baja presión para determinar el peso exacto de gas, en los cilindros de uso doméstico de 10 kg* [Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <https://orcid.org/0000-0003-3941-9581>

Red de Salud Canas Canchis Espinar. (2024). *Análisis de la situación de salud provincia Espinar.* 19.

https://www.redsaludcce.gob.pe/Modernidad/archivos/epidemiologia/ASIS/ASIS_Espinar_2024.pdf

Solgas. (2014). *Ficha técnica cocina solgas.*

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fsolgas.pe%2Fwp-content%2Fuploads%2F2023%2F02%2FFICHA-TECNICA-COCINA-NASCA-DE-4.pdf&psig=AOvVaw1RXVq4CUK6Q0Cc3i76H6um&ust=1740686530759000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAQQn5wMahcKEwjwp9TkkOKLAXUA>

Solgas. (2025). *Ficha técnica cocina rumi solgas.* <https://solgas.pe/rumi/>

Tintaya, E. (2024). *Diseño e instalación de un sistema GLP de 12 000 galones de capacidad,*

bajo los estándares de calidad de la unidad minera Angloamerican Quellaveco en la ciudad de Moquegua [Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco].

<http://hdl.handle.net/20.500.12918/8476>

Vargas, A. (2008). *Adaptación tecnológica de una máquina recuperadora de GLP residual en tanques domesticos* [Escuela superior politecnica del litoral].

https://www.researchgate.net/publication/46395857_Adaptacion_tecnologica_de_una_maquina_recuperadora_de_glp_residual_en_tanques_domesticos

Venegas, D., & Ayabaca, C. (2019). Análisis del almacenamiento en sistemas de gas licuado de petróleo: tanques estacionarios vs. cilindros. *Ingenius*, 22, 113–122.

<https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.11>

Weather Spark. (2025). *Condiciones climaticas*.

<https://weatherspark.com/compare/y/25926~25931~25887~25226/Comparison-of-the-Average-Weather-in-Cusco-Ccatca-Coporaque-and-Santa-Ana>

Zainal, Z., & Azeman, M. (2010). The effect of surrounding temperature on liquefied petroleum gas behaviour during exhaustion process. In *Int. J. Oil, Gas and Coal Technology* (Vol. 3, Issue 2).

ANEXOS

Anexo 1. Mezclas propano y butano para uso comercial (GLP) concorde al clima según NTP

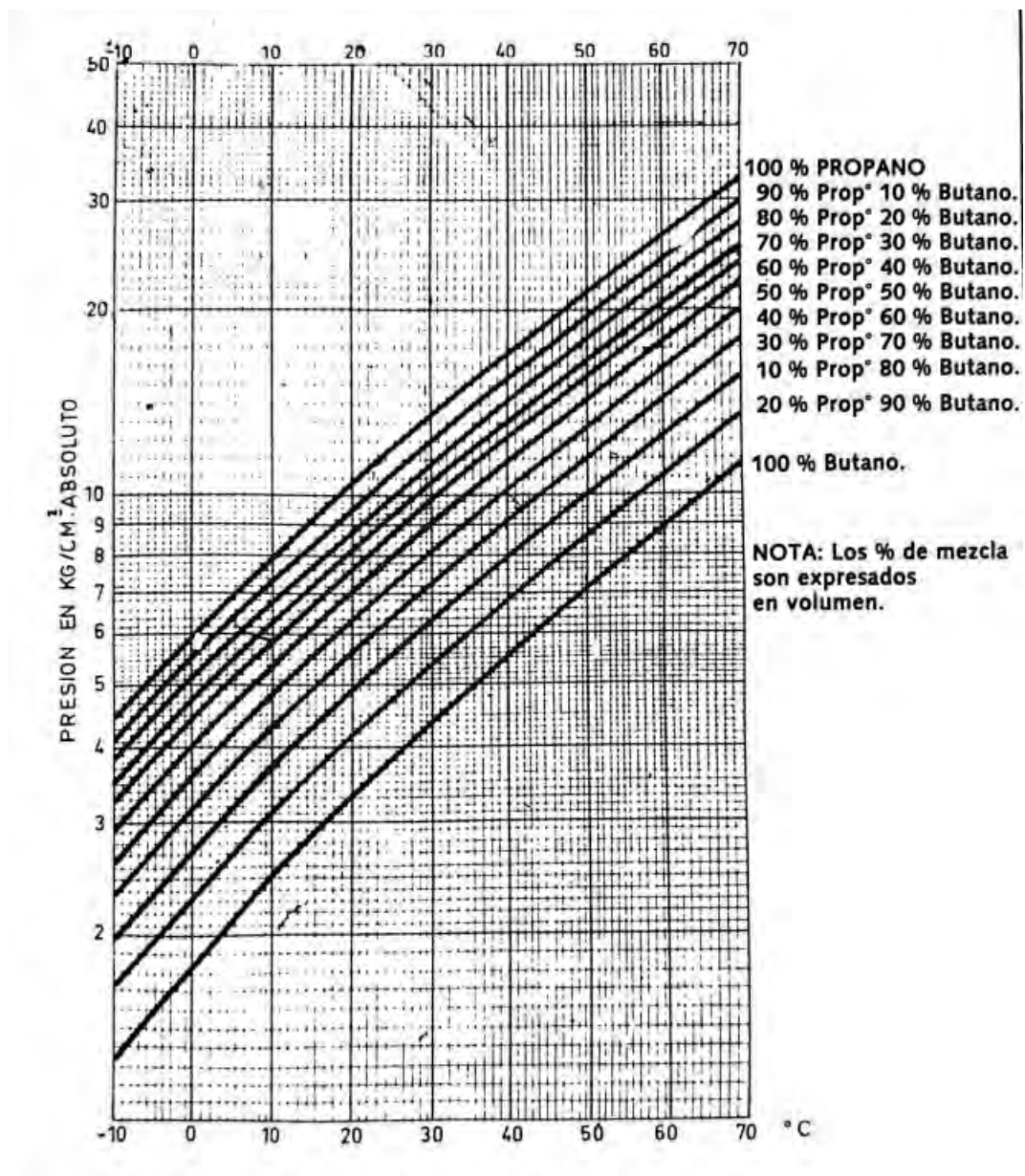
321.007.

Nombre del producto	Propano Comercial	Butano Comercial	Mezcla Propano Butano Comercial							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CARACTERÍSTICAS										
COMPOSICION, % Vol										
Propano ²⁾	100	—	90	80	75	70	65	60	55	50
Butano ³⁾	—	100	10	20	25	30	35	40	45	50
Pentano mas pesados	Nulo	2,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
COMBUSTION										
Poder calorifico aprox. Btu/lb	21,690	21,290	21,650	21,610	21,590	21,570	21,550	21,530	21,510	21,490
Clima de Aplicación	Muy frío	Muy cálido	Frío				Moderado			
Volatilidad	Alta Volatilidad	Baja Volatilidad	Alta Volatilidad				Moderada / Intermedia Volatilidad			
Usos Recomendados	Doméstico Comercial Industrial	Doméstico Comercial	Doméstico Comercial Industrial				Doméstico Comercial Industrial		Doméstico Comercial	

Nota 1) Es posible comercializar otras mezclas que no cumplan con la presión mínima de 793 kPa (115 psig) por acuerdo entre usuario y proveedor
 Nota 2) Véase 5.1 de la presente NTP.
 Nota 3) Véase 5.2 de la presente NTP.

Fuente: (NTP 321.007, 2002)

Anexo 2. Diagrama de presión de vapor butano, propano para diversas temperaturas



Nota: Obtenido de (Becco, 1992).

Anexo 3. Distribución de GLP líquido (% de llenado y peso)

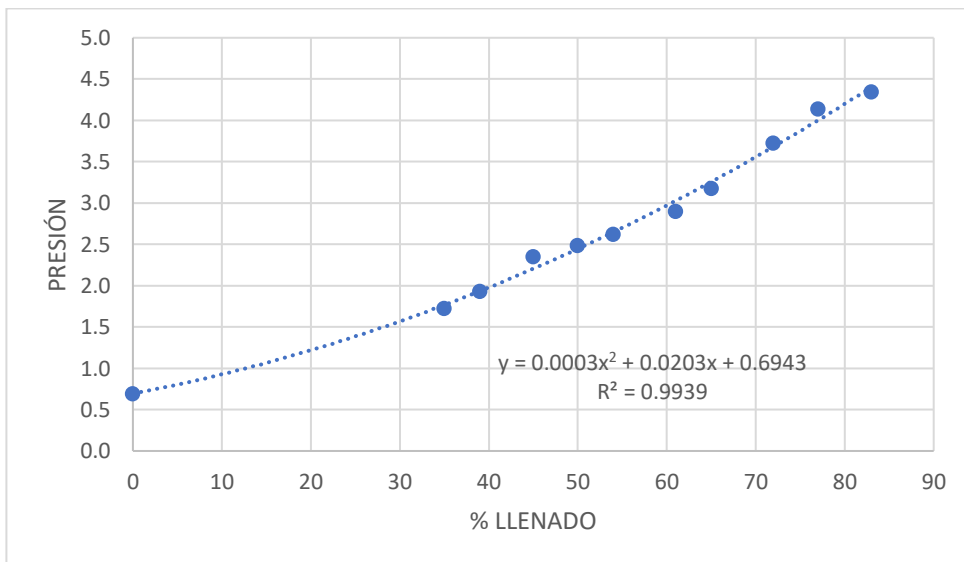
Tabla 25:*Distribución de GLP líquido (% de llenado y peso)*

Porcentaje de llenado (%)	Peso de GLP cilindro 10 kg	Peso de GLP cilindro 45 kg
80	10	45
65	8.13	36.56
50	6.25	28.13
35	4.38	19.69
30	3.75	16.88
20	2.5	11.25
14.42	1.8	8.11
7.4	0.93	4.16
3.3	0.41	1.86

Nota: Elaboración propia

En la tabla 25 se describe como el nivel de líquido GLP disminuye según el consumo, si para el 80% en volumen de GLP que se tiene en un cilindro debe tener como resultado 10 kg de peso, se considera que el porcentaje de GLP que va quedando disminuye equivalentemente. De igual manera para los cilindros de 45 kg.

Anexo 4. Porcentaje de llenado vs variación de la presión

Figura 16:*Porcentaje de llenado vs variación de la presión*

Con los datos de la tabla 12, se obtuvo la gráfica de porcentaje de llenado vs la variación de presión, donde se ajustó la curva con la ecuación polinómica de segundo grado como se muestra en la siguiente figura 16. A partir de esta ecuación se elabora la tabla 26 (anexo 5).

Anexo 5. Variación de la presión en función del porcentaje de llenado de GLP

Tabla 26:*Variación de la presión en función del porcentaje de llenado de GLP*

% llenado	Presión (bar)	Presión kg/cm ²
80	4.24	4.32
70	3.59	3.66
60	2.99	3.05
50	2.46	2.51
40	1.99	2.03
30	1.57	1.60
25	1.39	1.42
20	1.22	1.24
15	1.07	1.09
14.42	1.05	1.07
7.4	0.86	0.88
0	0.69	0.71

Anexo 6. Cálculo del poder calorífico superior del GLP

Para calcular el poder calorífico superior de la mezcla propano y butano, se tiene como dato del análisis cromatográfico que el remanente de GLP de los cilindros de retorno de la zona alta está compuesto por 4.4% de propano y 95.6% de n-butano en promedio como se puede observar en la tabla 17. Con esta composición se determina el número de moles del propano y butano (ec. 13).

$$n_{propano} = \frac{504 * 4.4}{44} = 0.5 \text{ mol}$$

$$n_{butano} = \frac{582 * 95.6}{58} = 9.596 \text{ mol}$$

El número de moles de la mezcla (GLP), será igual a la suma de la cantidad de moles de propano y butano:

$$n_{GLP} = n_{propano} + n_{butano}$$

$$n_{GLP} = 0.5 + 9.596 = 10.096 \text{ mol}$$

Se procede a determinar la fracción molar para el propano y el butano mediante la siguiente relación:

$$X_i = \frac{n_i}{n_T}$$

$$X_{propano} = \frac{0.5}{10.096} = 0.05$$

$$X_{butano} = \frac{9.596}{10.096} = 0.95$$

Ahora bien, con los valores de las fracciones molares de propano y butano en la mezcla de GLP, se calculó el poder calorífico superior para la mezcla GLP con la ecuación (10) conociendo que el PCS_{propano} es 92430 kJ/m³ y el PCS_{butano} es 121280 kJ/m³ (ver tabla 1);

$$PCS_{GLP} = (X_{propano} * PCS_{propano}) + (X_{butano} * PCS_{butano})$$


$$PCS_{GLP} = (0.05 * 92430) + (0.95 * 121280)$$

$$PCS_{GLP} = 119851 \frac{kJ}{m^3}$$

$$PCS_{GLP} = 113673 \frac{BTU}{m^3}$$

Este valor es necesario para determinar el caudal de consumo de GLP por una cocina u otro artefacto que funcione con GLP (anexo 13).

Anexo 7. Ficha técnica de Pluspetrol para el gas licuado de petróleo


HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES
1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DEL PROVEEDOR**Pluspetrol Perú Corporation S.A**

Planta de Fraccionamiento.
Carretera Pisco-Paracas, Km. 13.5. Pisco. Perú.
Teléfono: (51-1) 4117100 Anexo: 6022
Fax: (51-1) 411-7100 Anexo 6070
(51-1) 211-4515

Etiquetado (NFPA)

Salud: 1
Inflamabilidad: 4
Reactividad: 0

Nombre comercial : Gas licuado comercial	UN 1075
Sinónimos : Gas LP, LPG, Gas licuado de petróleo, Mezcla propano / butano, GLP.	CAS N° : 68512-91-4
Fórmula : C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀	Código : GLP
Tipo de aplicación : Combustible	

2. COMPOSICIÓN/INGREDIENTES

Componentes / CAS	Porcentaje Vol.	LEP (Límite de exposición permisible)
Propano / 74-98-6	50.0 – 90.0	1000 ppm (OSHA)
Butano / 75-28-5, 106-97-8 (nC4, iC4)	10.0 – 50.0	800 ppm (ACGIH)
Etil Mercaptano / 75-08-01	1lb/10000 gl	0.5 ppm

Nota: (Pluspetrol, 2018)

Anexo 8. Ficha técnica de Limagas para el gas licuado de petróleo.

	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD (MSDS) DEL GLP (GAS LICUADO DE PETRÓLEO)	Fecha de actualización: 06 Agosto 2018
		Revisión: 08
		Página: 1 de 8

1. PRODUCTO / IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre comercial	: GAS LICUADO DE PETRÓLEO
Nombre químico	: PROPANO + BUTANO
Fórmula química	: C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀
Familia química	: Hidrocarburos de petróleo
Tipo de aplicación	: Combustible
Código Naciones Unidas	: UN 1075
Otros nombres	: GAS LP, GLP, LPG
Empresa	: LIMA GAS S.A.
Dirección	: Calle A N°149, Zona 7, Fundo Bocanegra Callao – Perú
Email	: www.limagas.com
Teléfono de Oficinas	: (01) 215-9300
Central de Pedidos	: (01) 634-0000
Teléfono de emergencia	: 0800-00580

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

El Gas Licuado de Petróleo está constituido por una mezcla de hidrocarburos volátiles, principalmente de tipo propano y butano.

MATERIAL	NUMERO CAS	VOLUMEN (Aprox.)	LEP (Límite de Exposición Permissible)
Propano	74-98-6	50 – 70,0 %	1000 ppm
Butano	106-97-8	50 – 30,0 %	800 ppm
GLP	68476-85-7	100 %	900 ppm
Etil-Mercaptano (Odorizante)	75-08-1	14 ppm a 20 ppm	0,5 ppm

Nota: (Limagas, 2018)

Anexo 9. Propiedades atmosféricas a diferentes altitudes.

Altitud, z, m	Temperatura, T, °C	Presión, P, kPa	Gravedad, g, m/s ²	Velocidad del sonido, c, m/s	Densidad, ρ , kg/m ³	Viscosidad, μ kg/m · s	Conductividad térmica, k, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1 000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1 200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1 400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1 600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1 800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2 000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2 200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2 400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2 600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2 800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3 000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3 200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3 400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3 600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3 800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4 000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4 200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4 400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4 600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4 800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5 000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5 200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5 400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5 600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5 800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6 000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6 200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6 400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6 600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6 800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7 000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8 000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9 000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10 000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12 000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14 000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16 000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18 000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Nota: (Cengel, 2007), pg. 889.

Anexo 10. Emisividades de superficies no metálicas.

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Alúmina	800-1 400	0.65-0.45	Papel blanco	300	0.90
Aluminio, óxido de	600-1 500	0.69-0.41	Revoque blanco	300	0.93
Asbesto	300	0.96	Porcelana vidriada	300	0.92
Asfalto, pavimento de	300	0.85-0.93	Cuarzo, áspero, vidrio	300	0.93
Ladrillo			Caucho		
Común	300	0.93-0.96	Duro	300	0.93
De arcilla refractaria	1 200	0.75	Suave	300	0.86
Carbono, filamento de	2 000	0.53	Arena	300	0.90
Tela	300	0.75-0.90	Silicio, carburo de	600-1 500	0.87-0.85
Concreto	300	0.88-0.94	Piel humana	300	0.95
Vidrio			Nieve	273	0.80-0.90
De ventana	300	0.90-0.95	Suelo, tierra	300	0.93-0.96
Pyrex	300-1 200	0.82-0.62	Hollín	300-500	0.95
Pyroceram	300-1 500	0.85-0.57	Teflón	300-500	0.85-0.92
Hielo	273	0.95-0.99	Agua profunda	273-373	0.95-0.96
Magnesio, óxido de	400-800	0.69-0.55	Madera		
Mampostería	300	0.80	Haya	300	0.94
Pinturas			Roble	300	0.90
De aluminio	300	0.40-0.50			
Negra, laca, lustrosa	300	0.88			
De aceite, todos los colores	300	0.92-0.96			
De base (primer) roja	300	0.93			
Acrílica blanca	300	0.90			
Esmalte blanco	300	0.90			

Nota: (Cengel, 2007), pg. 891.

Anexo 11. Ficha técnica de una cocina domestica de 2 hornillas.



ARTEFACTOS

COCINA DOMÉSTICA DE SOBRE MESA

DATOS GENERALES

Nombre	Cocina doméstica de sobre mesa
Marca	Solgas artefactos
Modelo	Rumí
Origen	Perú

CARACTERÍSTICAS

- 2 Quemadores de 6.50 cm de diámetro con base de aluminio y tapa de bronce
- Parrilla superior: En varilla de acero al carbono de color, 100% enlozada o zincado desmontable
- Estructura: En plancha de acero al carbono de 0.5 mm
- Acabado: Enlozado color blanco (o requerimiento del cliente)
- Tipo de combustible: Gas licuado de petróleo (GLP)
- Consumo de GLP: 0.18 Kg/hora
- Regulador de gas: Regulador de baja presión
- Logo tipo:
 - Enlozado: en alto relieve y pintado
 - Pintura electroestática: en alto relieve
- **Sistema ecomax:** Ayuda al ahorro de gas GLP hasta un 40%

DATOS TÉCNICOS

Encendido	Manual
Inyector	2 tiempos
Tensión y frecuencia	No
Cable de conexión	No
Tipo de gas	GLP
Conexión de gas	G 1/4"



RECOMENDACIONES PARA LA LIMPIEZA

1. Antes de realizar la limpieza o mantenimiento, el equipo debe estar completamente frío, para evitar posibles quemaduras.
2. Evitar dejar restos de sustancias salinas, grasosas, restos de comida por tiempo prolongado. Retirar los residuos de comidas que caen sobre el quemador.
3. No use fibra metálica, cepillos de alambre o rascadores. Use sólo telas suaves, esponjas o cepillos de nylon.
4. No use productos de limpieza que contengan ácidos, cloruros, sales o abrasivos. Por ejemplo: lejía y ácidos
5. Se recomienda usar limpiadores o agentes para la limpieza
6. Enjuague completamente con agua y secar el equipo después de usar cualquier agente de limpieza.

Para limpiar la encimera

- No usar líquidos abrasivos.
- Limpiar con un paño o esponja suave humedecidos en agua y jabón neutro (lava vajilla líquido).

Cuando se ha culminado con la limpieza:

- Seque bien los quemadores.
- Colóque de tal manera que encajen correctamente y así evitar daños

Nota: (Solgas, 2025)

Anexo 12. Ficha técnica de una cocina domestica de 4 hornillas.



COCINA DOMÉSTICA DE SOBRE MESA

DATOS GENERALES

Nombre	Cocina doméstica de sobre mesa
Marca	Solgas artefactos
Modelo	Nazca
Origen	Perú

CARACTERÍSTICAS

- 3 Quemadores de 6.50 cm de diámetro con base de aluminio y tapa de bronce
- 1 Quemador de 9.1 cm de diámetro de bronce doble flama wok
- Parrilla superior: En varilla de acero al carbono de color, 100% enlozada o zincado desmontable
- Estructura: En plancha de acero al carbono de 0.4 mm
- Acabado: Cuerpo en pintura electroestática color blanco (o requerimiento de cliente) y tapa de acero inoxidable
- Tipo de combustible: Gas licuado de petróleo (GLP)
- Consumo de GLP: 0.36 Kg/hora
- Regulador de gas: Regulador de baja presión
- Logotipo solgas en alto relieve
- **Sistema ecomax:** Ayuda al ahorro de gas GLP hasta un 40%

DATOS TÉCNICOS

Encendido	Manual
Inyector	4 tiempos
Tensión y frecuencia	No
Cable de conexión	No
Tipo de gas	GLP
Conexión de gas	G 1/4"



RECOMENDACIONES PARA LA LIMPIEZA

1. Antes de realizar la limpieza o mantenimiento, el equipo debe estar completamente frío, para evitar posibles quemaduras.
2. Evitar dejar restos de sustancias salinas, grasosas, restos de comida por tiempo prolongado. Retirar los residuos de comidas que caen sobre el quemador.
3. • No use fibra metálica, cepillos de alambre o rascadores. Use sólo telas suaves, esponjas o cepillos de nylon.
4. • No use productos de limpieza que contengan ácidos, cloruros, sales o abrasivos. Por ejemplo: lejía y ácidos
5. Se recomienda usar limpiadores o agentes para la limpieza
6. Enjuague completamente con agua y secar el equipo después de usar cualquier agente de limpieza.

Para limpiar la encimera

- No usar líquidos abrasivos.
- Limpiar con un paño o esponja suave humedecidos en agua y jabón neutro (lava vajilla líquido).

Cuando se ha culminado con la limpieza:

- Seque bien los quemadores.
- Colóque de tal manera que encajen correctamente y así evitar daños

Nota: (Solgas, 2014)

Anexo 13. Consumo nominal de diversos artefactos.

Artefacto	kcal/h (Btu/h)
Aparatos para calefacción de agua	
Termotanque (Calentador de agua con tanque de almacenamiento)	
- 80 litros a 85 litros	6 000 (23 808)
- 120 litros	8 000 (31 744)
- 150 litros	8 000 (31 744)
- 180 litros	8 200 (32 538)
- 200 litros	8 200 (32 538)
- 260 litros	8 200 (32 538)
Termotanque de alta recuperación (Calentador de agua con tanque de almacenamiento)	
- 250 litros	30 000 (119 040)
- 300 litros	50 000 (198 400)
Calefón o Calentador de paso (Calentador de agua, automático instantáneo)	
Capacidad 5 L/min	10 000 (39 680)
Capacidad 10 L/min	20 000 (79 360)
Capacidad 13 L/min	26 400 (104 755)
Capacidad 16 L/min	31 400 (124 595)
Aparatos para cocinar	
- Cocina doméstica 4 hornillas c/horno	8 000 (31 744)
- Cocina semi industrial 4 hornillas	24 000 (95 232)
- Anafe semi industrial (cocinilla semi industrial de 2 hornillas)	8 000 (31 744)
- Horno pizzero 1 cámara	9 500 (37 696)
- Horno pizzero 3 cámaras	28 500 (113 088)
- Freidora 1 tina	9 300 (36 902)
- Baño maría 3 tinas	3 500 (13 888)
Otros aparatos	
- Secador de ropa, doméstico	12 700 (50 394)
- Calefactor mural	3 000 (11 904)

Nota: Valores promedio de información proporcionada por fabricantes (NTP. 321.121, 2018)

Cálculo del consumo de GLP por un artefacto (ecuación 1)

$$\text{PCS GLP: } 113673 \text{ BTU/m}^3$$

$$P: 31744 \text{ BTU/h. (de una cocina domestica de 4 hornillas c/horno)}$$

$$\text{Consumo (Q)} = \frac{31744 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{113673 \frac{\text{BTU}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Consumo (Q)} = 0.28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.55 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Este valor y los valores de consumo de los anexos 11 y 12 se encuentran en la tabla 2.

Anexo 14. Data de pesos de los cilindros de retorno de GLP de 10 kg y 45 kg.

MES ENERO Y FEBRERO															
semana 1 Y 2															
CILINDROS DE 10 KG 60 UNIDADES															
SECTOR " A "					SECTOR " M "					SECTOR " B "					
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente
1	Espinar	10.7	10.3	0.4	1	Cusco	10.35	10.1	0.25	1	La Convencion	10.10	10	0.10	
2	Espinar	10.8	10.3	0.5	2	Cusco	10.65	10.5	0.15	2	La Convencion	9.33	9.3	0.03	
3	Espinar	10.7	10.2	0.5	3	Cusco	10.26	10.1	0.16	3	La Convencion	10.12	10	0.12	
4	Chumbivilcas	10.6	10.2	0.4	4	Cusco	10.71	10.4	0.31	4	La Convencion	10.25	10.2	0.05	
5	Chumbivilcas	10.8	10.4	0.4	5	Cusco	10.2	9.9	0.3	5	La Convencion	10.24	10.2	0.04	
6	Chumbivilcas	10.5	10.1	0.4	6	Anta	10.5	10.3	0.2	6	Urubamba	10.31	10.3	0.01	
7	Canas	10.5	10.1	0.4	7	Anta	10.45	10.2	0.25	7	Urubamba	10.30	10.3	0.00	
8	Canas	10.4	10	0.4	8	Anta	10.6	10.3	0.3	8	Urubamba	10.06	10	0.06	
9	Canas	10.8	10.4	0.4	9	Acomayo	10.41	10.05	0.36	9	Urubamba	10.02	10	0.02	
10	Canchis	10.6	10.2	0.4	10	Acomayo	10.16	10	0.16	10	Paucartambo	9.90	9	0.90	
11	Canchis	10.7	10.2	0.5	11	Acomayo	10.4	10.3	0.1	11	Paucartambo	9.11	9	0.11	
12	Canchis	10.5	10.1	0.4	12	Acomayo	10.48	10.3	0.18	12	Urubamba	10.2	10.2	0.00	
PROMEDIO				0.43	13	Acomayo	10.17	9.9	0.27	13	Calca	10.41	10.2	0.21	
					14	Quispicanchi	10.25	10.1	0.15	14	Urubamba	10.1	10.09	0.01	
					15	Quispicanchi	10.5	10.2	0.3	15	Calca	9.25	9	0.25	
					16	Quispicanchi	10.49	10.3	0.19	16	Calca	9.12	9	0.12	
					17	Quispicanchi	10.45	10.1	0.35	17	Calca	10.25	10	0.25	
					18	Paruro	10.4	10.2	0.2	18	Calca	10.15	10	0.15	
					19	Paruro	10.6	10.2	0.4	19	Paucartambo	10.41	10.3	0.11	
					20	Paruro	10.4	10.2	0.2	20	Paucartambo	10.15	10	0.15	
					PROMEDIO			0.24	21	La Convencion	10.31	10.3	0.01		
									22	La Convencion	10.52	10.5	0.02		
									23	La Convencion	10.18	10	0.18		
									24	Urubamba	10.2	10.2	0		
									25	Urubamba	10.11	10.1	0.01		
									26	Urubamba	9.9	9.8	0.1		
									27	Calca	10.32	10.3	0.02		
									28	Calca	10.31	10.3	0.01		
									PROMEDIO			0.11			
CILINDROS DE 45 KG SOLGAS 15 UNIDADES															
SECTOR " A "					SECTOR " M "					SECTOR " B "					
Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente
1	Espinar	40.56	35.5	5.06	1	Quispicanchi	36.98	34.2	2.78	1	Calca	35.8	35.1	0.7	
2	Canas	40.85	35	5.85	2	Cusco	38.5	36.4	2.1	2	Paucartambo	37.48	37.2	0.28	
3	Chumbivilcas	40.75	34.5	6.25	3	Acomayo	40	37.5	2.5	3	La Convencion	39.01	37.9	1.11	
PROMEDIO				5.72	4	Cusco	41.68	38.7	2.98	4	Laconvencion	36.54	35.4	1.14	
					5	Anta	38.2	36	2.2	5	Urubamba	36.58	35.5	1.08	
					6	Paruro	36.49	34.3	2.19	6	Calca	36.9	35.5	1.4	
					PROMEDIO			2.46	PROMEDIO			0.95			
semana 3 Y 4															
CILINDROS DE 10 KG SOLGAS 60 UNIDADES															
SECTOR " A "					SECTOR " M "					SECTOR " B "					
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente
1	Espinar	10.52	10	0.52	1	Cusco	9.28	9.1	0.18	1	La Convencion	10.2	10.2	0	
2	Espinar	10.66	10.2	0.46	2	Cusco	10.54	10.3	0.24	2	La Convencion	10.22	10.1	0.12	
3	Espinar	10.58	10.1	0.48	3	Cusco	10.38	10.2	0.18	3	La Convencion	10.11	10	0.11	
4	Chumbivilcas	10.51	10	0.51	4	Cusco	10.28	10	0.28	4	La Convencion	10.26	10.1	0.16	
5	Chumbivilcas	10.84	10.3	0.54	5	Cusco	10.54	10.4	0.14	5	La Convencion	10.14	10.12	0.02	
6	Chumbivilcas	10.56	10.1	0.46	6	Anta	10.4	10.3	0.1	6	Urubamba	10.41	10.4	0.01	
7	Canas	10.65	10.2	0.45	7	Anta	10.53	10.3	0.23	7	Urubamba	10.32	10.3	0.02	
8	Canas	10.7	10.2	0.5	8	Anta	10.27	10.1	0.17	8	Urubamba	10.3	10.2	0.1	
9	Canas	10.46	10	0.46	9	Acomayo	10.21	10	0.21	9	Urubamba	10.41	10.3	0.11	
10	Canchis	10.47	10	0.47	10	Acomayo	10.36	10.2	0.16	10	Paucartambo	10.6	10.3	0.3	
11	Espinar	10.85	10.3	0.55	11	Acomayo	10.37	10.1	0.27	11	Paucartambo	10.52	10.3	0.22	
12	Chumbivilcas	10.54	10.1	0.44	12	Acomayo	10.23	10.1	0.13	12	Urubamba	10.58	10.4	0.18	
13	Chumbivilcas	10.67	10.2	0.47	13	Acomayo	10.38	10.2	0.18	13	Calca	10.37	10.2	0.17	
14	Canchis	10.56	10.1	0.46	14	Quispicanchi	10.1	9.8	0.3	14	Urubamba	10.1	10	0.1	
15	Canchis	10.48	10.1	0.38	15	Quispicanchi	10.38	10	0.38	15	Calca	10.15	10.1	0.05	
16	Canas	10.85	10.3	0.55	16	Quispicanchi	10.47	10.3	0.17	PROMEDIO			0.11		
17	Canchis	10.68	10.2	0.48	17	Quispicanchi	9.93	9.8	0.13						
18	Espinar	10.64	10.1	0.54	18	Quispicanchi	10.39	10.1	0.29						
PROMEDIO				0.48	19	Quispicanchi	10.36	10.2	0.16						
					20	Quispicanchi	9.5	9.4	0.1						
					21	Paruro	10.34	10.1	0.24						
					22	Paruro	10.31	10.1	0.21						
					23	Paruro	10.4	10.3	0.1						
					24	Paruro	10.3	10.1	0.2						
					25	Paruro	9.8	9.6	0.2						
					26	Paruro	10.33	10.2	0.13						
					27	Paruro	10.29	10.1	0.19						
					PROMEDIO			0.20							
CILINDROS DE 45 KG SOLGAS 15 UNIDADES															
SECTOR " A "					SECTOR " M "					SECTOR " B "					
Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincias	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente
1	Canchis	38.8	34	4.8	1	Quispicanchi	38.01	35.2	2.81	1	Calca	36.2	35.36	0.84	
2	Canas	40.38	35.6	4.78	2	Quispicanchi	37.93	35.1	2.83	2	Calca	36.9	35	1.9	
3	Espinar	42	36.2	5.8	3	Cusco	36.2	33.8	2.4	3	Urubamba	34.8	34	0.8	
4	Espinar	41.17	34.2	6.97	4	Anta	37.36	34.7	2.66	4	Urubamba	37.39	37.27	0.12	
5	Canchis	37.01	35.05	1.96	PROMEDIO			2.68	5	Paucartambo	37.94	36.23	1.71		
PROMEDIO				4.86	PROMEDIO			2.68	6	Paucartambo	35.91	35.6	0.31		
									PROMEDIO			0.95			

Nota: Obtenidos en el taller de mantenimiento, recalificado y pintado de cilindros de retorno de GLP.

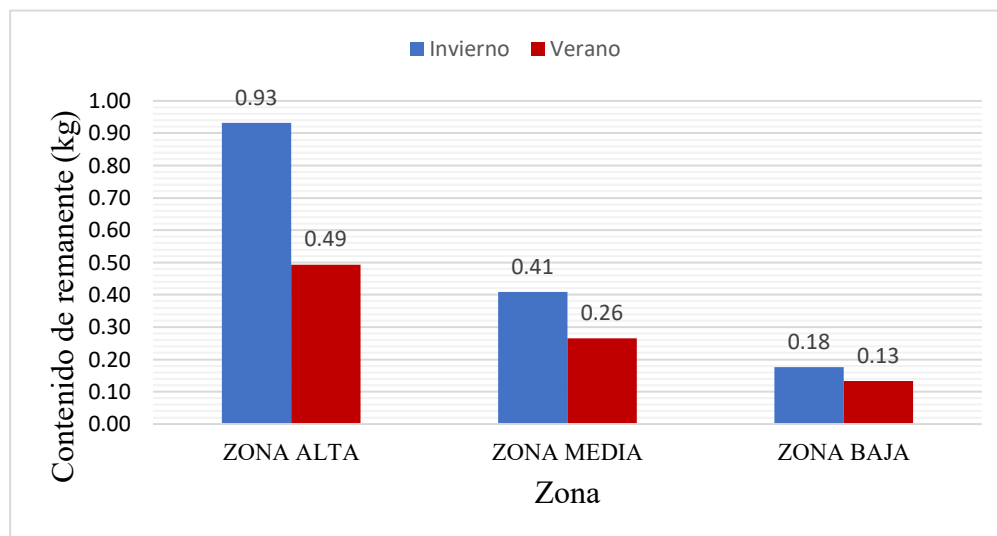
MES JUNIO Y JULIO												
Semana 1 Y 2			60 UNIDADES			SECTOR " M"			SECTOR " B"			
CILINDROS DE 10 KG												
SOLGAS			SECTOR " A"			SECTOR " M"			SECTOR " B"			
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	
1 Chumbivilcas	11.82	11.3	0.52	1 Cusco	10.35	10.1	0.25	1 La Convencion	10.2	10.1	0.1	
2 Espinar	10.58	10	0.58	2 Cusco	10.75	10.5	0.25	2 La Convencion	10.33	10.2	0.13	
3 Espinar	10.59	10	0.59	3 Cusco	10.26	10.1	0.16	3 La Convencion	10.25	10.1	0.15	
4 Espinar	10.7	10.2	0.5	4 Cusco	10.71	10.4	0.31	4 La Convencion	10.15	10	0.15	
5 Espinar	10.6	9.4	1.2	5 Anta	10.2	9.9	0.3	5 La Convencion	10.23	10.1	0.13	
6 Chumbivilcas	10.7	10.1	0.6	6 Anta	10.5	10.3	0.2	6 Urubamba	10.31	10.2	0.11	
7 Canas	10.85	10.3	0.55	7 Anta	10.45	10.2	0.25	7 Urubamba	10.3	10.2	0.1	
8 Canas	10.68	10.1	0.58	8 Anta	10.6	10.3	0.3	8 Urubamba	10.16	10	0.16	
9 Canas	10.84	10.3	0.54	9 Acomayo	10.41	10.05	0.36	9 Urubamba	10.15	10	0.15	
10 Canchis	10.57	10.1	0.47	10 Acomayo	10.26	10	0.26	10 Paucartambo	10.19	10	0.19	
11 Canchis	10.6	9.9	0.7	11 Acomayo	10.65	10.3	0.35	11 Paucartambo	9.11	9	0.11	
12 Canchis	10.59	10.1	0.49	12 Acomayo	10.48	10.2	0.28	12 Urubamba	10.2	10	0.2	
PROMEDIO			0.61	13 Acomayo	10.17	9.9	0.27	13 Calca	10.41	10.2	0.21	
				14 Quispicanchi	10.25	10.1	0.15	14 Urubamba	10.1	10	0.1	
				15 Quispicanchi	10.5	10.2	0.3	15 Calca	9.25	9	0.25	
				16 Quispicanchi	10.5	10.3	0.2	16 Calca	9.12	9	0.12	
				17 Quispicanchi	10.45	10.1	0.35	17 Calca	10.25	10	0.25	
				18 Paruro	10.4	10.2	0.2	18 Calca	10.24	10.1	0.14	
				19 Paruro	10.6	10.3	0.3	19 Paucartambo	10.35	10.2	0.15	
				20 Paruro	10.4	10.2	0.2	20 Paucartambo	10.1	10	0.1	
				PROMEDIO			0.26	21 La Convencion	10.52	10.3	0.22	
								22 La Convencion	10.4	10.2	0.2	
								23 La Convencion	10.18	10	0.18	
								24 Urubamba	10.42	10.2	0.22	
								25 Urubamba	10.25	10.1	0.15	
								26 Urubamba	9.9	9.8	0.1	
								27 Calca	10.42	10.3	0.12	
								28 Calca	10.5	10.3	0.2	
								PROMEDIO			0.16	
CILINDROS DE 45 KG												
SOLGAS			SECTOR " A"			SECTOR " M"			SECTOR " B"			
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	
1 Espinar	42.6	34.4	8.2	1 Quispicanchi	38.69	34.6	4.09	1 Calca	36.8	35.1	1.7	
2 Espinar	44.78	35.5	9.28	2 Quispicanchi	41.17	37.4	3.77	2 Calca	36.98	35.2	1.78	
3 Espinar	42.75	34.1	8.65	3 Quispicanchi	36.79	32.8	3.99	3 Calca	40.42	38.5	1.92	
PROMEDIO			8.71	4 Cusco	41.68	37.7	3.98	4 Urubamba	38.54	37.4	1.14	
				5 Quispicanchi	37.2	33	4.2	5 Urubamba	36.58	35.5	1.08	
				6 Cusco	38.5	35.3	3.2	6 Urubamba	36.9	35.5	1.4	
				PROMEDIO			3.87	PROMEDIO			1.50	
Semana 3 Y 4												
CILINDROS DE 10 KG			60 UNIDADES			SECTOR " M"			SECTOR " B"			
SOLGAS												
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	
1 Espinar	10.62	10.1	0.52	1 Cusco	9.8	9.5	0.3	1 Urubamba	10.31	10.2	0.11	
2 Espinar	10.86	10.3	0.56	2 Cusco	10.62	10.3	0.32	2 Urubamba	10.28	10.1	0.18	
3 Espinar	10.52	10	0.52	3 Cusco	10.58	10.2	0.38	3 Urubamba	10.21	10	0.21	
4 Chumbivilcas	10.65	9.9	0.65	4 Cusco	10.43	10.2	0.23	4 Urubamba	10.26	10.1	0.16	
5 Chumbivilcas	10.84	10.3	0.54	5 Anta	10.64	10.4	0.24	5 Urubamba	10.14	10	0.14	
6 Chumbivilcas	10.56	10	0.56	6 Anta	10.4	10.1	0.3	6 Urubamba	10.51	10.4	0.11	
7 Espinar	11.1	10	1.1	7 Anta	10.63	10.3	0.33	7 Urubamba	10.42	10.3	0.12	
8 Canas	10.64	10.1	0.54	8 Anta	10.57	10.1	0.47	8 Urubamba	10.3	10.2	0.1	
9 Canas	10.75	10.1	0.65	9 Acomayo	10.41	10.2	0.21	9 Urubamba	10.41	10.3	0.11	
10 Canchis	10.58	10	0.58	10 Acomayo	10.46	10.2	0.26	10 Paucartambo	10.6	10.3	0.3	
11 Espinar	10.95	10.3	0.65	11 Acomayo	10.57	10.2	0.37	11 Paucartambo	10.52	10.3	0.22	
12 Chumbivilcas	11.2	10.2	1	12 Acomayo	10.23	10	0.23	12 Paucartambo	10.58	10.4	0.18	
13 Chumbivilcas	10.63	10.1	0.53	13 Acomayo	10.38	10.1	0.28	13 Calca	10.37	10.2	0.17	
14 Espinar	11.25	10.2	1.05	14 Quispicanchi	10.51	10.2	0.31	14 Calca	10	9.8	0.2	
15 Canchis	10.98	10.3	0.68	15 Quispicanchi	10.38	10	0.38	15 Calca	10.25	10.1	0.15	
16 Canas	10.87	10.1	0.77	16 Quispicanchi	10.47	10.2	0.27	PROMEDIO			0.16	
17 Canchis	10.86	10.2	0.66	17 Quispicanchi	9.93	9.6	0.33					
18 Espinar	11.52	10.3	1.22	18 Quispicanchi	10.39	10.1	0.29					
PROMEDIO			0.72	19 Quispicanchi	10.36	10.1	0.26					
				20 Quispicanchi	10.2	9.8	0.4					
				21 Paruro	10.52	10.1	0.42					
				22 Paruro	10.3	10.1	0.2					
				23 Paruro	10.5	10.1	0.4					
				24 Paruro	10.6	10.3	0.3					
				25 Paruro	10.18	9.8	0.38					
				26 Paruro	10.43	10.2	0.23					
				27 Paruro	10.39	10.1	0.29					
				PROMEDIO			0.31					
CILINDROS DE 45 KG												
SOLGAS			SECTOR " A"			SECTOR " M"			SECTOR " B"			
Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	Provincia	cilindro con remanente (KG)	Tara	Remenente	
1 Espinar	42.8	34	8.8	1 Cusco	38.01	34.2	3.81	1 Calca	36.2	34	2.2	
2 Espinar	40.38	33.6	6.78	2 Cusco	40.2	36.3	3.9	2 Calca	37.5	36.15	1.35	
3 Espinar	43	36.2	6.8	3 Quispicanchi	38.2	34	4.2	3 Urubamba	34.4	32.5	1.9	
4 Espinar	43.25	35.2	8.05	4 Cusco	41	37.1	3.9	4 Urubamba	38	36.5	1.5	
5 Canchis	39.11	33	6.11	PROMEDIO			3.95	5 La Convencion	40.5	38.5	2	
PROMEDIO			7.31					6 La Convencion	36.2	34.2	2	
								PROMEDIO			1.83	

Nota: Obtenidos en el taller de mantenimiento, recalificado y pintado de cilindros de retorno de GLP.

Anexo 15. Promedio remanente de GLP por Zona, temporada y tipo de cilindro.

Figura 17:

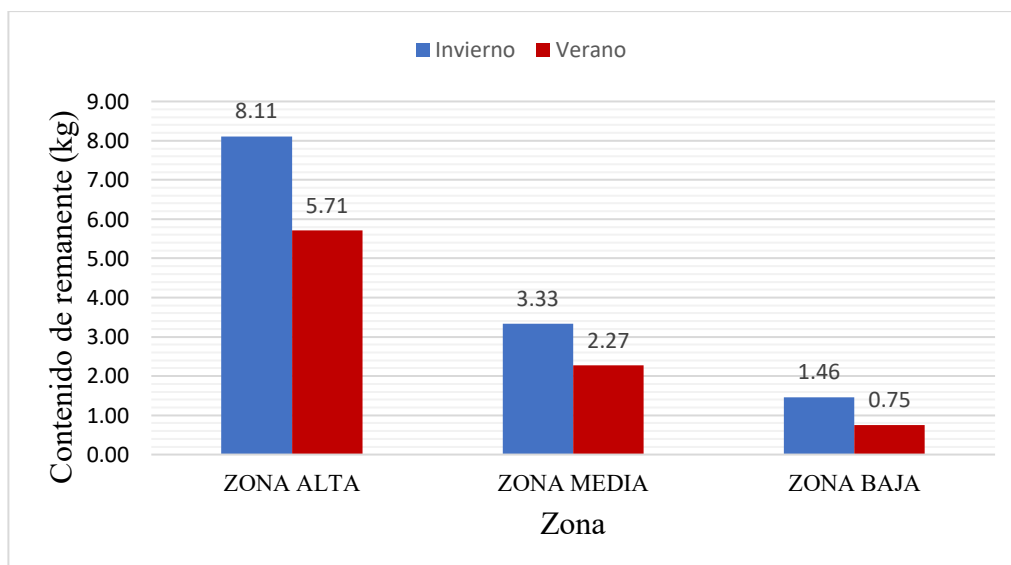
Contenido de remanente GLP promedio en cilindros de 10 kg, en invierno y verano



Nota: Promedio de remanente de GLP en invierno 0.50 kg en verano 0.29 kg.

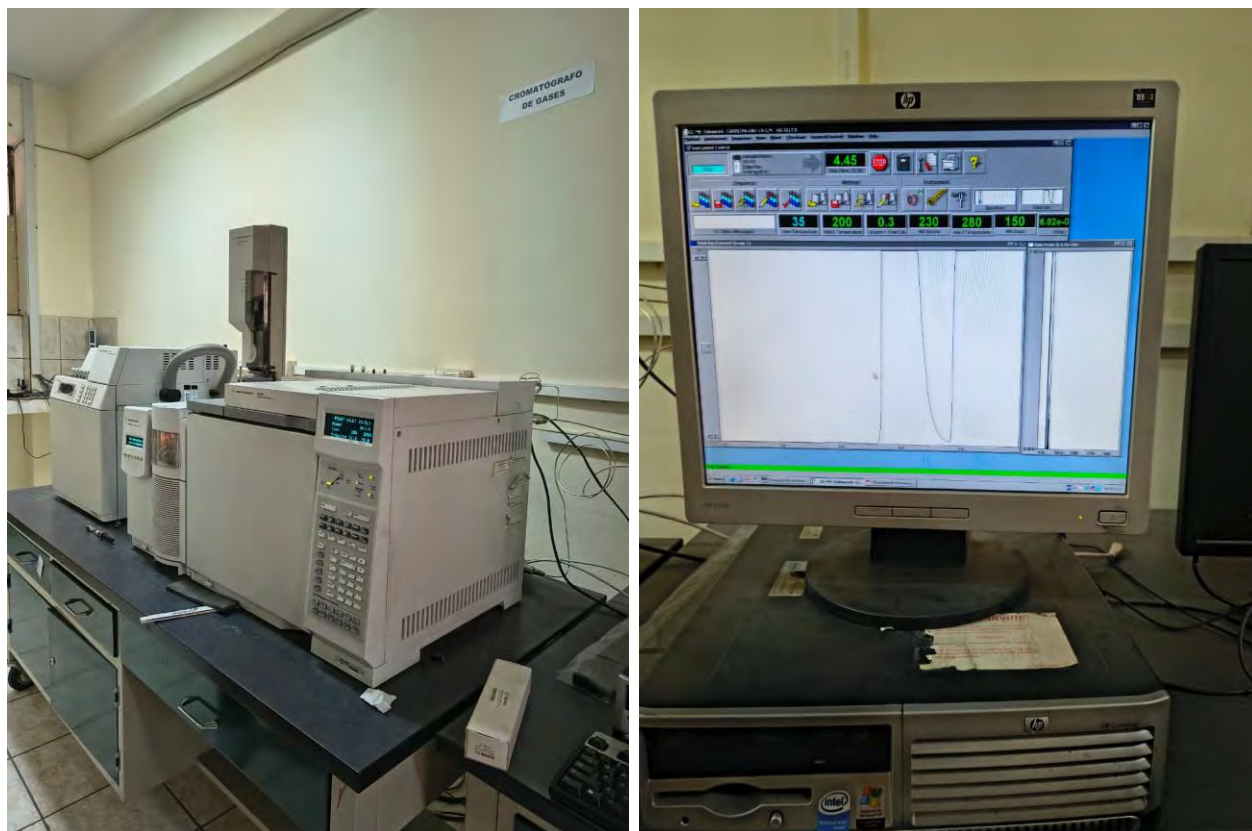
Figura 18:

Contenido de remanente GLP promedio en cilindros de 45 kg, en invierno y verano



Nota: Promedio de remanente de GLP en invierno 4.30 kg en verano 2.90 kg.

Anexo 16: Equipo cromatográfico de gases



Nota: Obtenidos en el laboratorio de cromatografía de gases GC-MS de la UNSAAC

Anexo 17. Informe de resultados del análisis cromatográfico.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE CIENCIAS
 LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA Y ESPECTROMETRÍA - Pabellón de Control de Calidad
 Av. De la Cultura 733 CUSCO-PERÚ Contacto: 973863855

RESULTADOS

Cusco, 18 de Septiembre del 2025

Solicitantes : Anny Eugenia Guzmán Collantes, Mari Luz Hemoza Mamani
 Tipo de Análisis : Perfil de Hidrocarburos
 Metodo : Cromatografía de Gases GC-MS.
 Tipo de Muestras : GLP residual de cilindros de GLP de la region del Cusco
 Cantidad de Muestra : 3, en contenedor metalico M1, M2 y M3
 Almacenamiento : -20 °C

M1

Pico	Tiempo min	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Area	Contenido Relativo %
1	5.83	Propane	000074-96-6	7	97357	0.8
2	6.13	Isobutane	000075-26-5	78	2673781	22.1
3	6.39	Butane	000106-97-8	64	9296101	76.9
4	7.34	Butane, 2-methyl-	000075-19-4	4	15753	0.1

M2

Pico	Tiempo min	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Area	Contenido Relativo %
1	5.83	Propane	000074-96-6	9	537088	4.2
2	6.13	Isobutane	000075-26-5	72	3330908	25.9
3	6.39	Butane	000106-97-8	64	8899104	69.3
4	7.34	Butane, 2-methyl-	000075-19-4	90	76773	0.6

M3

Pico	Tiempo min	Compuestos orgánicos volátiles (VOC) Librería Nist 11	CAS	Qual	Area	Contenido Relativo %
1	5.83	Propane	000074-96-6	9	1217467	6.1
2	6.13	Isobutane	000075-26-5	72	3959228	26.5
3	6.39	Butane	000106-97-8	64	9773697	65.4
4	7.34	Butane, 2-methyl-	000075-19-4	4	5119	0.03

Qual = Porcentaje de coincidencia con la base de datos Nist 11
 CAS = Numero para identificar la molécula

Nota:

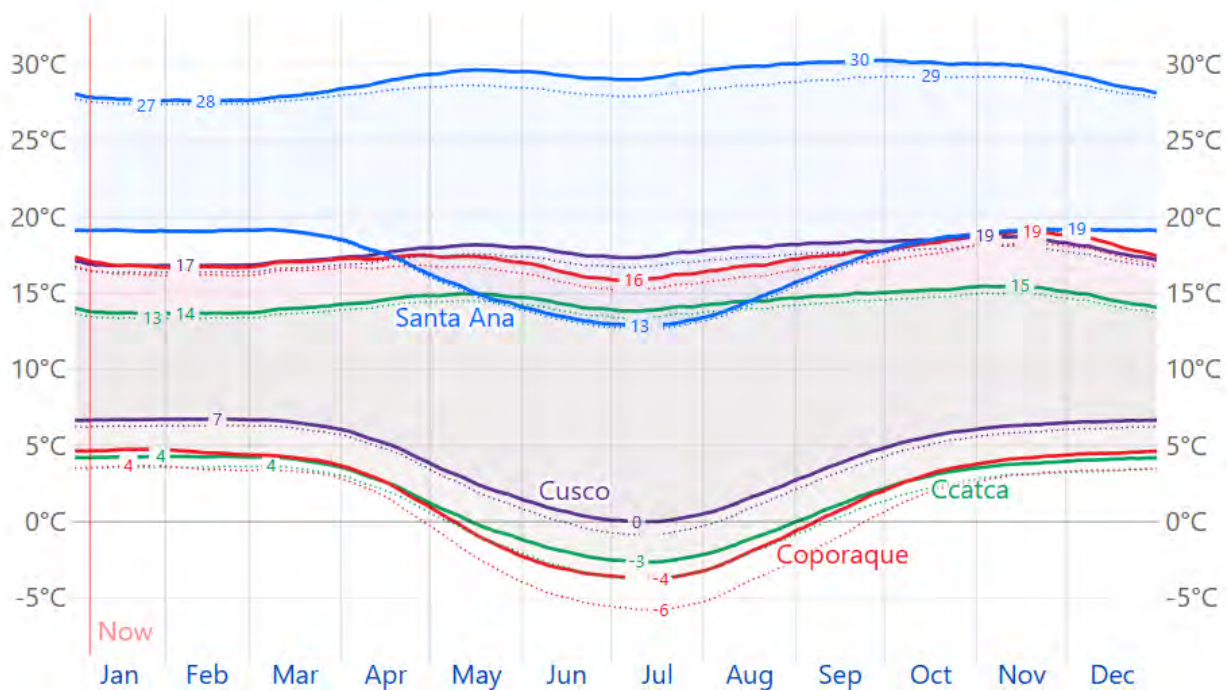
La identificación de los compuestos presentes en la muestras fue realizada mediante la comparación de los espectros de masas de los picos de la muestra con la biblioteca de espectros de masas de National Institute of Standards and Technology versión 11 (NIST v11), no se reporta los componentes en trazas.



[Handwritten Signature]
 Quiroga Jorge Guillermo Pizarro
 Analista del Laboratorio de Cromatografía y
 Espectrometría - UNSAAC
 GQP - 514

Nota: Resultados obtenidos del laboratorio de cromatografía de gases GC-MS de la UNSAAC

Anexo 18: Temperatura ambiental promedio máximo y mínimo en la región Cusco



Nota: Obtenido de (Weather Spark, 2025), de las estaciones metereologicas Santa Ana que se encuentra en La Convension, Cusco y Ccatca que se encuentran en la provincia Cusco y Quispicanchi, la estacion metereologica Coporaque que se encuentra en la provicnia de Espinar.