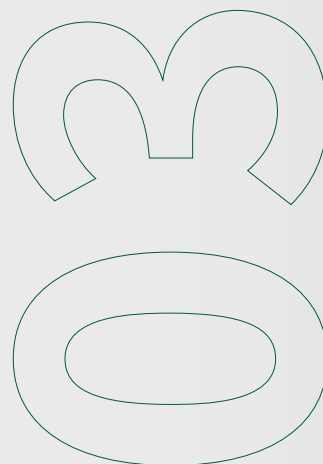


triple In

Investigación,
Ingeniería
e Innovación

FACULTAD
DE INGENIERÍA

Diciembre 2021
Publicación Anual
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia



triple In

**Investigación,
Ingeniería
e Innovación**

REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Diciembre 2021 / Publicación Anual / Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

Editor

Gastón Mejía Brown

Autores

Roland Mauricio Bascopé Salvatierra

Peter Conde Flores

José Antonio De La Cruz Dávalos

Heberto Hernan Peña Galarza, Ian Ehrenfeld Rodas, Daniel Mercado Pinto y

Mikhael Humberto Pacheco Topikha



Presidente del Directorio:	Carlos Díaz Villavicencio
Rectora:	Lauren Müller de Pacheco
Decano Facultad de Ingeniería:	Javier Alanoca Gutiérrez
Editor:	Gastón Mejía Brown

Consejo Editorial:	Lauren Müller de Pacheco
	Roberto Antelo Scott
	Javier Alanoca Gutiérrez
	Gastón Mejía Brown

Autoridades Universitarias

Rectora:	Lauren Müller de Pacheco
Gerente General:	Tihana Vranjican de Suárez
Vicerrector:	Sergio Daga Mérida
Secretario General:	Roberto Antelo Scott
Directora Académica:	Julvi Molina Machicao

Revista de la Facultad de Ingeniería
TRIPLE IN - Investigación, Ingeniería e Innovación | N° 03

© 2021

Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra - UPSA

Facultad de Ingeniería

Av. Paraguá y 4to. Anillo

Tel.: +591 (3) 346 4000 | Fax: +591 (3) 346 5757

Apartado Postal N° 2944

Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

Derechos de autor

Prohibida la reproducción total o parcial de la presente obra por cualquier medio sin citar expresamente la fuente.

ÍNDICE

- 07** **Prólogo**
- 11** **PRODUCCIÓN DE MEZCLA TIBIA (WMA) EN BOLIVIA**
Bascope Salvia tierra Roland Mauricio
- 21** **ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA Y COSTO PARA CUBIERTAS TIPO DOMO ENTRE EL SISTEMA CLÁSICO DE ARCOS CON ANILLOS CONCÉNTRICOS Y UN SISTEMA DE MALLA ESPACIAL ULTRALIGERA**
Conde Flores Peter
- 41** **LOS EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS EN EL DESARROLLO REGIONAL Y LOCAL EN BOLIVIA. Evidencia Empírica desde la Geología Petrolera**
De La Cruz Dávalos José Antonio
- 59** **USO DEL GLP COMO COMBUSTIBLE AUTOMOTOR EN BOLIVIA**
Peña Galarza Heberto Hernan, Ehrenfeld Rodas Ian, Mercado Pinto Daniel y Pacheco Topikha Mikhael Humberto

PRÓLOGO

Valoramos el esfuerzo de los trabajos de investigación publicados en la revista “Triple In” de la Facultad de Ingeniería de la UPSA, en su tercera edición, trabajos elaborados en una época muy compleja de la humanidad por la pandemia del COVID-19, que está afectando la economía, la educación, la forma de trabajar, el desarrollo y la salud. La producción científica e investigación no estuvo aislada de los efectos de la pandemia, obligando a redefinir prioridades de investigación, direccionando los esfuerzos de trabajos a lo más urgente, que es la sobrevivencia del ser humano en el planeta, entre otros, en aspectos de mitigación de esta enfermedad, de la producción de alimentos y de innovación en las fuentes de trabajo.

La pandemia ha colocado a la humanidad en un año cero, al obligarla a redefinir su desarrollo en aspectos no solo técnicos sino económicos y sociales, en la forma de valorar la vida y potenciando la importancia de la interacción social, como un mecanismo esencial del desarrollo cultural y científico. En este contexto, la innovación se consolidó en forma permanente como medio para sobresalir y subsistir generando nuevos productos y servicios y la resiliencia de la humanidad, su capacidad de remontar las caídas, está ahora a prueba. No todo estuvo detenido, hubo avances en la medicina, en la organización de la logística de los hospitales, y en nuevas formas de trabajo con la incorporación de procesos virtuales, con la intervención de la informática y de las redes de comunicación, apoyados por investigaciones científicas y prácticas que el momento exige.

Es necesario validar, en esta oportunidad, cómo una muestra de resiliencia académica, el esfuerzo de los investigadores cruceños, de llevar a cabo, a pesar de la pandemia, estudios que han dado lugar a una diversidad de artículos, revisados y aprobados por pares, emergentes de investigaciones en diferentes sectores, como los de ingeniería civil, de los hidrocarburos valorando su efecto en el desarrollo regional, y del uso de GLP como combustible vehicular, que se publican en este nuevo número de la Revista Triple In de la Facultad de Ingeniería.

Sin duda, este ejemplo nos impulsa a buscar investigar en todas las áreas científicas y sociales. Algunos, para ello, tendrán que redefinir su perfil profesional a fin de que les permita ser partícipes y acompañar el vertiginoso avance tecnológico en que estamos inmersos.

Concluyo valorando la fuerza de resiliencia, con una frase del famoso científico Dr. Albert Einstein.

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

Javier Alanoca Gutiérrez
Decano de la Facultad de Ingeniería - UPSA

INVESTIGACIONES

Las investigaciones publicadas son de entera responsabilidad de sus autores y no reflejan la posición de la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra - UPSA.

PRODUCCIÓN DE MEZCLA TIBIA (WMA) EN BOLIVIA¹

Bascopé Salvatierra, Roland Mauricio²

RESUMEN

Este trabajo propone la producción de Mezcla Tibia (MTA) en Bolivia, empleando aditivos, agregados pétreos y cemento asfáltico disponible en nuestro medio. Para llevar adelante la investigación, se realizó mezcla asfáltica de acuerdo al diseño Marshall en la cual el cemento asfáltico tenía porcentajes diferentes de aditivo y se procedió a compactar a temperaturas diferentes.

ABSTRACT

This paper propose the production of Warm Mix Asphalt (WMA) in Bolivia, employing additives, aggregates and bitumen available in our country. In order to advance this investigation an asphalt mix was prepared according to Marshall Design, in which the bitumen had different percentages of additive and then the mix was compacted at different temperatures.

Palabras Claves:

Mezcla Tibia, MTA, Asfalto Modificado.

Keywords:

Warm Mix, WMA, Modified Asphalt.

DEFINICIÓN

La Mezcla Tibia (WMA – Warm Mix Asphalt) se refiere a la mezcla asfáltica que es producida a la temperatura de 28°C o menor que la temperatura utilizada típicamente en la producción de mezcla asfáltica en caliente.

La meta es producir una mezcla con dureza, durabilidad y desempeño similar a las características de una mezcla en caliente, empleando una disminución considerable en las temperaturas de producción.

1 Programa UPSA - PAE.

2 Consultor Asociado, en Pavement Preservation Systems, LLC.

La tecnología de mezcla tibia fue introducida, primeramente, en Europa, a finales de los años 90, como una medida para reducir las emisiones de gases. Desde entonces, un número alto de técnicas de Mezcla Tibia han sido desarrolladas en Europa y Estados Unidos de América.

TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS TIBIAS

Estas son:

a) Aditivos Surfactantes (Químico), 10 °C a 32 °C

Brindan trabajabilidad debido a la reducción de la tensión superficial.

El asfalto envuelve fácilmente el agregado además de facilitar la compactación.

Incluyen promotores de adherencia.

b) Ceras (Orgánico), 10 °C a 21 °C

Trabajabilidad debido a la reducción de la viscosidad y al efecto de lubricación durante el proceso de Pavimentación y Compactación.

c) Asfalto Espumado debido a la adición de agua/aire (Espumado)

Trabajabilidad debido al espumado del cemento asfáltico.

Inyección Directa de Agua, entre 0 °C y 10 °C.

Uso de Zeolita, entre 10 °C y 21 °C.

Se presentan proveedores de proceso/aditivos para la producción de Mezclas Tibias.

Tabla 1. Técnicas para la Producción de Mezclas Tibias

Nombre	Proceso/Aditivo	Compañía
Accu-Shear Dual Warm Mix Additive System	Espumado	StanSteel
Adesco/Madsen Static Inline Vortex Mixer	Espumado	Adesco/Madsen
Advera	Zeolita	PQ Corporation
Aspha-min	Zeolita	Eurovia
Cecabase RT	Surfactante	Arkema
Double Barrel Green	Espumado	Astec, Inc
Rediset WMX	Surfactante	Nouryon
Rediset LQ		
Sasobit	Cera Fischer Tropsch	Sasobit

BENEFICIOS

Estos son:

a) Beneficios Ambientales

Se tiene:

- Disminución de vapores y emisiones (30% y 90%).
- Mejora en las condiciones de trabajo.

- Incremento de pavimentación en áreas de acceso difícil.
- Consumo menor de energía.

b) Beneficios Prácticos

Estos son:

- Ahorro de combustible.
- Reduce desgaste del equipo.
- Mayor productividad.
- Extensión del horario de pavimentación.
- Incremento en la distancia de transporte de la mezcla.
- Mejoras en la compactación, lo que conlleva a mejores densidades.

MÉTODO APLICADO

Para analizar los beneficios de la producción de Mezcla Tibia (WMA – Warm Mix Asphalt), se procede a adicionar el producto CECABASE RT BIO 10 de la empresa Arkema, disponible en Bolivia, a un asfalto modificado con Grado de Desempeño PG 76-28.

Para el control de la mezcla asfáltica, se utiliza el diseño Marshall de acuerdo a Norma A0603 del Manual de Carreteras V4 de la Administradora Boliviana de Carreteras.

La producción de Mezcla Tibia es una técnica que se obtiene con métodos diversos, antes descritos. La mezcla debe cumplir los requisitos del método de mezcla seleccionado y, en nuestro caso, debe cumplir con los requisitos del diseño Marshall.

El CECABASE RT BIO 10 es un aditivo tensoactivo para la producción de mezcla tibia. Incluir una cantidad reducida en el cemento asfáltico, mejora la trabajabilidad de la mezcla, permitiendo producir y pavimentar a temperaturas de hasta 40 °C por debajo de las mezclas calientes convencionales, sin ningún proceso de modificación o pérdida de propiedades mecánicas.

El aditivo CECABASE RT BIO 10 es adicionado en dos muestras

- a) Muestra con un contenido del 0,2% de su masa.
- b) Muestra con un contenido del 0,5% de su masa.

Las cantidades adicionadas se han determinado de acuerdo a las fichas técnicas del producto.

Producción Mezcla Tibia

Con la finalidad de verificar los beneficios de la Mezcla tibia, se procede a realizar una mezcla asfáltica empleando el cemento asfáltico con aditivo.

Para analizar las propiedades de la Mezcla Asfáltica, se emplea el método utilizado en Bolivia, el Método Marshall, aplicando condiciones para la fabricación de especímenes de prueba.

Tabla 2. Criterio de Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente, Diseño Marshall

Criterios de Mezcla	Tráfico Alto EEA > 10 ⁶
Compactación, número de golpes en cada cara del espécimen	75
Estabilidad Mínima	8,006 N 1800 lb
Flujo, 0,25 mm	8 - 18
Porcentaje de Vacíos en la Mezcla	3 - 5
Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA)	65 - 75

Fuente: Obras de Mantenimiento Periódico en la Red Vial Fundamental: Tramo Santa Cruz - Boyuibe

Composición Granulométrica de la Mezcla

Debe satisfacer los requisitos descritos

Tabla 3. Composición Granulométrica

Tamiz	% Que Pasa
1"	100
3/4"	97 - 100
1/2"	76 - 88
N° 4	49 - 59
N° 8	36 - 45
N° 40	14 - 22
N° 200	3 - 7

Fuente: Obras de Mantenimiento Periódico en la Red Vial Fundamental: Tramo Santa Cruz - Boyuibe

Preparación de Especímenes

Antes de proceder a la preparación de especímenes, según criterios de Diseño Marshall, se determinó el contenido óptimo del cemento asfáltico, que es 5,59% y, luego, se procede a la preparación de especímenes con cemento asfáltico con aditivo CECABASE RT BIO 10, con la finalidad de verificar sus propiedades. Los especímenes son compactados a temperaturas diversas:

- 145 °C (control).
- 130 °C.
- 115 °C.
- 100 °C.

Se considera la compactación a 145 °C como control ya que esta es la temperatura de compactación sugerida por el proveedor de cemento asfáltico y, a la cual, por lo general, es compactada la mezcla asfáltica en caliente en plataforma. Los otros valores han sido seleccionados aleatoriamente, de acuerdo a la recomendaciones del Instituto del Asfalto de Estados Unidos de América, que establecen que no existe un criterio o ensayo para la selección de la temperatura de compactación de un cemento asfáltico modificado y, en su caso, sugieren realizar pruebas in situ para ver los resultados de compactación a temperaturas distintas y seleccionar la adecuada.

Se presentan los resultados obtenidos

Tabla 4. Resultados Mezcla Tibia, Aditivo 0,20%

Identificación	Temperatura °C Compactación	Porcentaje Aditivo, %	Altura de Briqueña (cm.)	% Asfalto	% de Agregado Grueso	% de Agregado Fino	Peso Briqueña en el aire (Gr.)	Peso Briqueña S.S.S. (Gr.)	Peso briq. sumergida en el Agua (Gr.)	Volumen Briqueña (cm ³ .)	Densidad briqueña		% de Vacíos				Peso Unitario Agregados (Gr / cm ³)	Estabilidad Marshall (Lb)				Flujo 1 / 100"	
											Real	Máxima Teórica (Dmt)	Mezcla (Vv)	Agregados (VAM)	Llenos de asfalt (RBV)	Real		Factor correcc. Altura	o	p	q		r
				a	b	c	d	f	g	h	i	j	k	l	m	n							
										f - g	d / h	(1)	(2)	(3)	(4)								

1	145,00		6,18	5,6	54,6	39,8	1.187,5	1.188,4	685,7	502,7	2,362	2,420	2,40	13,14	81,77	2,305	720,00	1,043	1.742,72	3,842	16,5
2	130,00	0,20	6,26	5,6	54,6	39,8	1.193,9	1.194,6	687,3	507,3	2,353	2,420	2,77	13,47	79,45	2,288	580,00	1,023	1.377,51	3,037	16,0
3	115,00		6,35	5,6	54,6	39,8	1.184,6	1.186,6	677,3	509,3	2,326	2,420	3,88	14,47	73,15	2,236	580,00	1,000	1.346,61	2,969	15,5
4	100,00		6,45	5,6	54,6	39,8	1.198,3	1.199,7	684,5	515,2	2,326	2,420	3,88	14,47	73,15	2,236	470,00	0,975	1.064,51	2,347	15,0

Tabla 5. Resultados Mezcla Tibia, Aditivo 0,50%

Identificación	T pactación, °C	a	Altura de Briqueña (cm.)	% Asfalto	% de Agregado Grueso	% de Agregado Fino	Peso Briqueña en el aire (Gr.)	Peso Briqueña S.S.S. (Gr.)	Peso briq. sumergida en el Agua (Gr.)	Volumen Briqueña (cm³.)	Densidad briqueña			% de Vacíos				Peso Unitario Agregados (Gr / cm³)	Estabilidad Marshall (Lb)			Flujo
											Real	Máxima Teórica	Mezcla	Agregados	Llenos de asfalt	Factor correcc. Altura	Real		p	q	r	
				a	b	c	d	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	
										f - g	d / h	(1)	(2)	(3)	(4)							

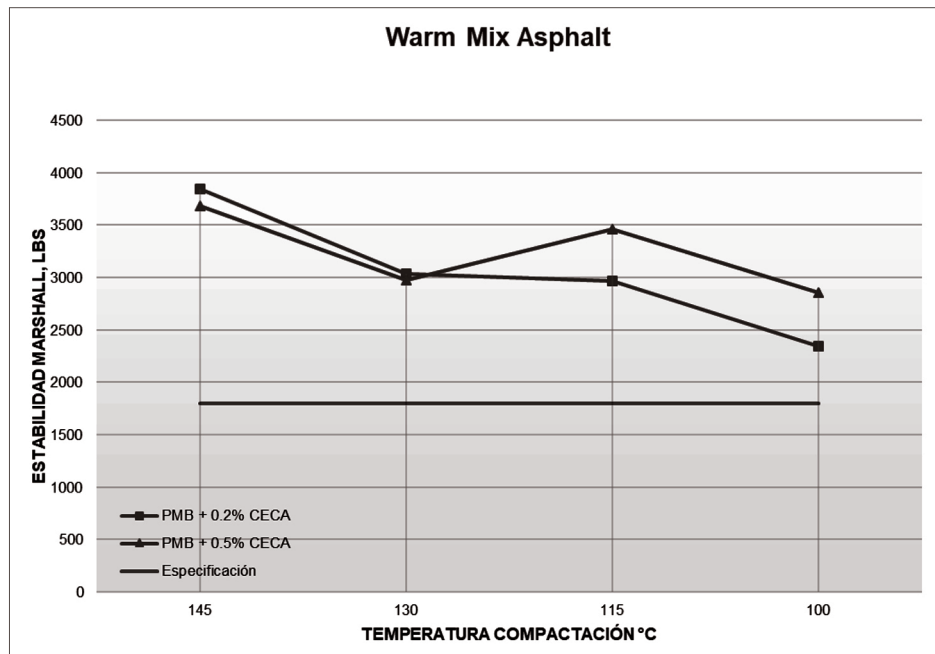
5	145,00		6,30	5,6	54,6	39,8	1.189,1	1.190,3	684,5	505,8	2,351	2,420	2,85	13,55	78,96	2,284	710,00	1,013	1.669,20	3,680	18,0
6	130,00	0,50	6,34	5,6	54,6	39,8	1.195,2	1.196,5	686,4	510,1	2,343	2,420	3,18	13,84	77,01	2,268	580,00	1,003	1.350,64	2,978	17,5
7	115,00		6,31	5,6	54,6	39,8	1.194,2	1.195,0	682,1	512,9	2,328	2,420	3,80	14,39	73,59	2,239	670,00	1,010	1.570,66	3,463	17,0
8	100,00		6,30	5,6	54,6	39,8	1.191,1	1.191,7	679,2	512,5	2,324	2,420	3,97	14,54	72,72	2,232	550,00	1,013	1.293,66	2,852	17,0

Se aprecia que a pesar de que, la temperatura de compactación es baja, en el caso de 100 °C, la Mezcla Tibia cumple los criterios solicitados del diseño Marshall (Tabla 2).

Análisis de Resultados

Estabilidad. Resultados similares a una mezcla asfáltica en caliente. Se aprecia que los resultados obtenidos están por encima de lo solicitado en las especificaciones (Figura 1).

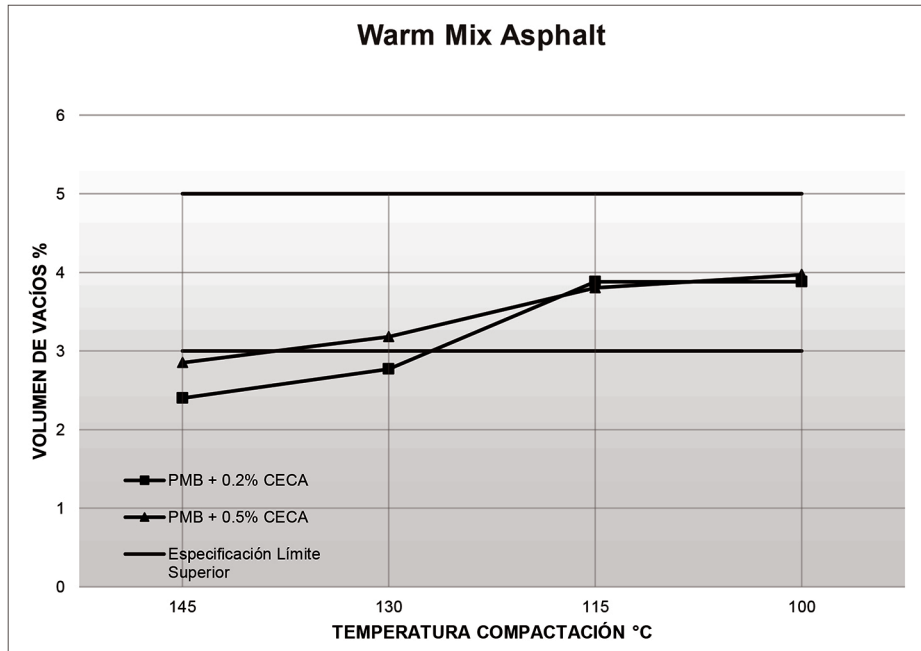
Figura 1. Resultados Estabilidad, Diseño Marshall



Se observa que a temperaturas altas, se obtienen resultados altos en cuanto a Estabilidad. Se debe a que la mezcla al ser compactada presenta una disminución en volumen de vacíos volviendo la misma más resistente. Se interpreta, inicialmente, que valores elevados de Estabilidad son buenos. Es importante verificar y controlar el resultado de los ensayos para obtener una mezcla de excelente calidad.

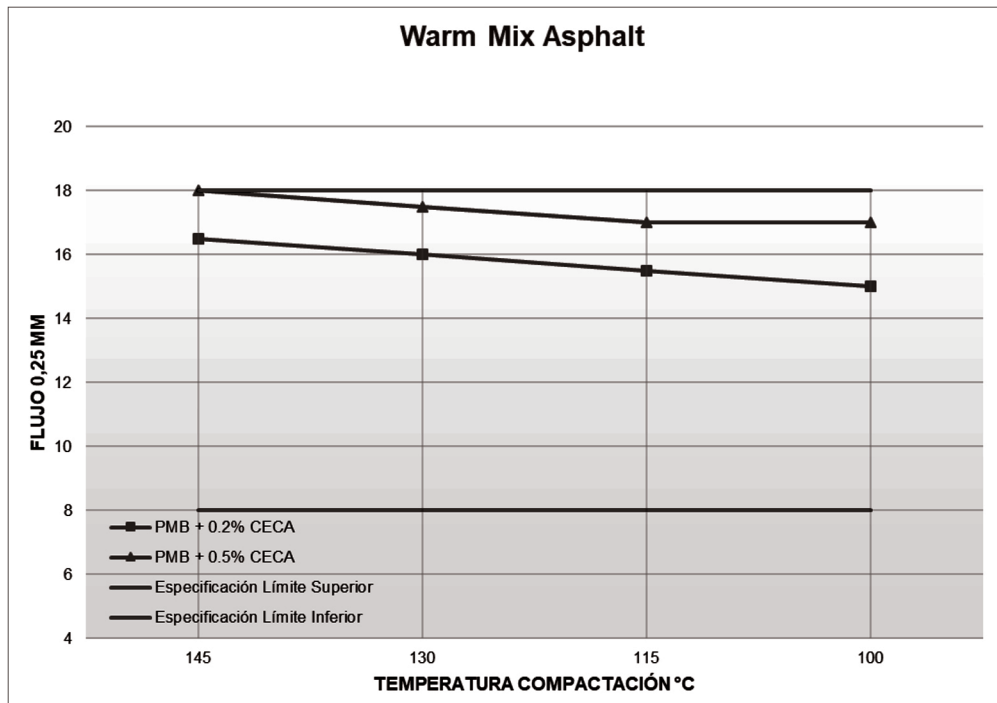
a) Porcentaje de Vacíos en la Mezcla. Debido a la disminución de la tensión superficial entre agregado – asfalto, existe una cantidad de vacíos menor al compactar a temperaturas mayores. Se puede apreciar un volumen de vacíos dentro de lo especificado cuando la temperatura de compactación es menor a 120 °C y, compactando a 100 °C, se afirma que el Porcentaje de vacíos en la mezcla es óptima (Figura 2).

Figura 2. Resultados Porcentaje de Vacíos en la Mezcla, Diseño Marshall



b) Flujo. Permite verificar la trabajabilidad de la mezcla. Si el flujo es reducido, la trabajabilidad es baja. En consecuencia, si hay problemas en la compactación y/o segregación de los agregados presentes en la mezcla, de acuerdo a los resultados obtenidos, se logran flujos dentro de los rangos especificados de acuerdo a los Criterios de Diseño Marshall.

Figura 3. Flujo, Diseño Marshall



Se establece que el aditivo CECABASE, al ser tensoactivo permite brindar fluidez mayor a la mezcla, brindando una mejor trabajabilidad a la misma. El flujo, al diseñar la mezcla asfáltica, es un valor importante puesto que la mezcla debe tener la suficiente trabajabilidad para ser colocada y compactada, pero, así mismo, hay que evitar tener una mezcla demasiado fluida y que se desplace hacia los lados.

PROPIEDADES CEMENTO ASFÁLTICO

El empleo de CECABASE RT BIO 10 no modifica y/o altera las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico. Para verificar estas aseveraciones se han realizado los ensayos:

- Punto de Ablandamiento Anillo y Bola – ASTM D 36
- Penetración 100 g, 5 seg @ 25°C – ASTM D 5
- Viscosidad Brookfield @ 135°C – ASTM D 4402

Estos ensayos fueron realizados en dos muestras. La primera correspondiente al cemento asfáltico sin aditivo y la segunda muestra al cemento asfáltico con 0,5% de CECABASE RT BIO 10.

Ensayo Cemento Asfáltico sin aditivo

Se presenta los resultados obtenidos

Tabla 6. Ensayo Cemento Asfáltico

ID	Descripción	Norma	Unidad	Resultados
1	Punto de Ablandamiento Anillo y Bola	ASTM D 36	°C	66
2	Penetración, 100 g, 5 seg @ 25°C	ASTM D 5	dmm	65
3	Viscosidad Brookfield @ 135°C	ASTM D 4402	cP	1.820

Ensayo Cemento Asfáltico + 0,5% CECA

Se presenta los resultados obtenidos

Tabla 7. Ensayo Cemento Asfáltico + 0.5% CECA

ID	Descripción	Norma	Unidad	Resultados
1	Punto de Ablandamiento Anillo y Bola	ASTM D 36	°C	64
2	Penetración, 100 g, 5 seg @ 25°C	ASTM D 5	dmm	67
3	Viscosidad Brookfield @ 135°C	ASTM D 4402	cP	1.760

CONCLUSIONES

El empleo y producción de Mezcla Tibia – Warm Mix en Bolivia, es un método que puede beneficiar a los constructores como así mismo a las empresas estatales que mantienen las distintas vías del país.

Los beneficios son:

- Disminución de consumo de combustible debido a la disminución en la temperatura de producción.
- Disminución de emisión de gases de la planta de asfalto.
- En las zonas con temperaturas bajas (altiplano boliviano), beneficiaría el horario de producción y transporte de mezcla.

De los ensayos realizados en esta investigación se concluye que el producto CECABASE RT BIO 10 permite elaborar una mezcla asfáltica que puede ser compactada hasta una temperatura de 100 °C, manteniendo la calidad de la mezcla asfáltica.

Se observa que el producto anteriormente mencionado no altera las propiedades del cemento asfáltico de acuerdo a los resultados obtenidos (Tablas 6 y 7), por lo cual no hay riesgo de posibles daños de la estructura pavimentada.

REFERENCIAS

- Rondón-Quintana, Hernández-Noguera, Reyes-Lizcano (2015). Mezclas Asfálticas Tibias: Revisión desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.
- TRB (2011). Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt – NCHRP Report 691. USA: Transportation Research Board.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA Y COSTO PARA CUBIERTAS TIPO DOMO ENTRE EL SISTEMA CLÁSICO DE ARCOS CON ANILLOS CONCÉNTRICOS Y UN SISTEMA DE MALLA ESPACIAL ULTRALIGERA¹

Conde Flores, Peter²



RESUMEN

Este estudio se enfoca en la comparación de dos tipologías estructurales para cubiertas de grandes luces de superficie media sinclástica, tipo cúpula o domo. Se toma como ejemplo real la cubierta de 60 metros de diámetro del coliseo municipal de la localidad El Torno cuya solución consiste en el sistema clásico de arcos rígidos radiales apoyados perimetralmente sobre columnas de hormigón armado e, interiormente en el centro, sobre un anillo de compresión. Este sistema se compara con una propuesta de estructura ultraligera de malla espacial esquelética de una sola capa. Se realiza el modelado en computadora de la estructura completa de hormigón armado de columnas, vigas y graderías en conjunto con cada una de las propuestas de cubierta de acero, para conseguir una mejor comprensión del comportamiento como conjunto del sistema completo *Estructura de hormigón - Cubierta de acero*.

El objetivo consiste en comparar ambos sistemas de cubierta en términos de la complejidad del modelado, el análisis estructural, el diseño de los elementos de acero, el cómputo de materiales, el costo de fabricación y, finalmente, la metodología y el costo total del montaje en sitio. Los resultados se resumen en dos tablas comparativas mostrando, en la primera, las cualidades y desventajas de cada sistema estructural, mientras que, en la segunda, se aprecia las diferencias estimadas en cuanto al costo directo de fabricación y de montaje.

Palabras clave

Sistema de arcos, malla espacial ultraligera, modelado de estructuras, estructuras espaciales, optimización de sistemas resistentes, domos, superficie sinclástica.

¹ Programa UPSA - Horizonte 2034.

² Docente UPSA.

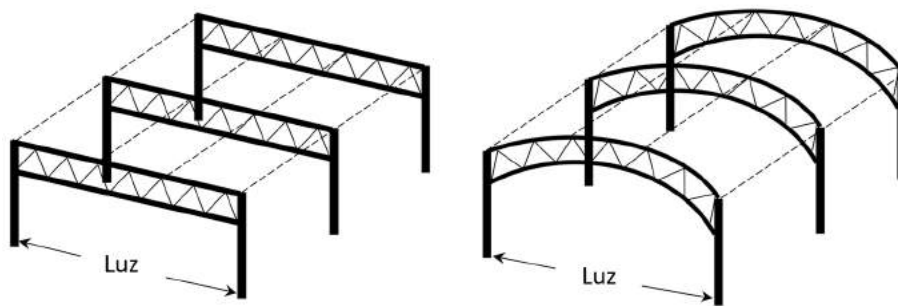
INTRODUCCIÓN

Cuando la presencia de columnas de soporte en interiores no representa un inconveniente funcional para las actividades normales de una edificación, la cubierta puede proponerse de una variedad de materiales y formas, desde los más pesados, como bloques de piedra hasta materiales ligeros como láminas metálicas o arreglos de tablas de madera. A medida que los espacios interiores libres de columnas necesitan ser más y más amplios en planta, las soluciones estructurales convergen sobre todo hacia formas curvas y materiales ligeros y resistentes, entre los que predomina el acero (McCormac & Csernak, 2012).

La densidad del acero como material es elevada, pero, su resistencia mecánica es grande en relación con su peso, lo que permite obtener secciones de elementos lineales tubulares de pared delgada altamente eficientes y ligeros (en comparación con otros materiales de construcción). Debido a estas bondades, se ha experimentado un crecimiento en la demanda de estructuras de acero con secciones tubulares, sobre todo, en el diseño de cubiertas de luces grandes.

Desde el punto de vista del análisis y el diseño, las estructuras se clasifican en bidimensionales (pórticos planos, cerchas planas, arcos) y tridimensionales o espaciales (domos, tenso-estructuras, tensegríticas, mallas de forma libre) (Subramanian, 2006). La manera clásica de encarar un diseño de cubierta de dimensiones grandes ha sido siempre utilizando elementos principales bidimensionales como vigas de elevada rigidez flexional y correas secundarias que se cruzan entre las vigas formando un entramado que sostiene el material de recubrimiento o “piel” de la cubierta (Hibbeler, 2015).

Figura 1. **Pórticos planos con vigas rectas de celosía (izquierda) y con vigas arqueadas tipo bóveda (derecha)**

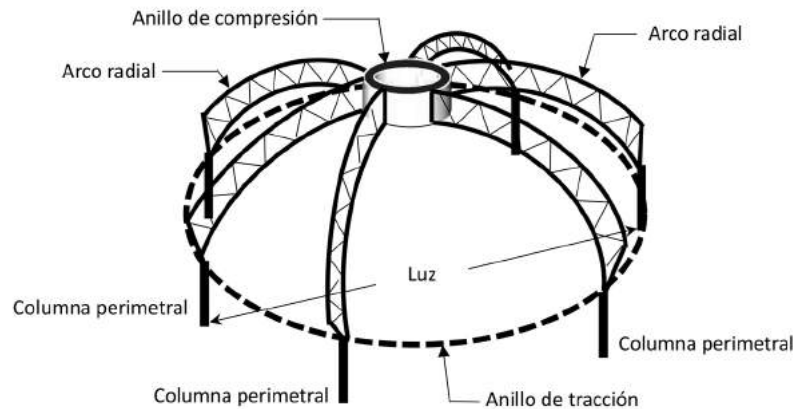


Cuando la planta es, en esencia, de forma rectangular, las vigas principales forman sistemas planos paralelos, donde dichas vigas suelen ser de alma calada o celosía. Al aumentar la luz que se debe cubrir, suele cambiarse el trazado del eje de la viga de recto a curvo, con lo que se tiene una estructura tipo bóveda cañón (Figura 1).

Si la planta es circular, la forma global que suele usarse es un domo o cúpula (Engel, 2003), cuya solución estructural clásica es la de arcos rígidos, generalmente de celosía, que se apoyan perimetralmente en una estructura de soporte externa e, interiormente, en la zona más alta, en un anillo de compresión (Figura 2). La forma de domo es en sí misma eficiente y rígida (Chilton, 2000), y corresponde a una superficie espacial de doble curvatura sinclástica (o curvatura gaussiana positiva). La principal desventaja de las estructuras de arcos rígidos es que concentran mucho material para conseguir dicha rigidez y esto las vuelve densas y pesadas, sobre todo, en su parte central superior, lo que involucra

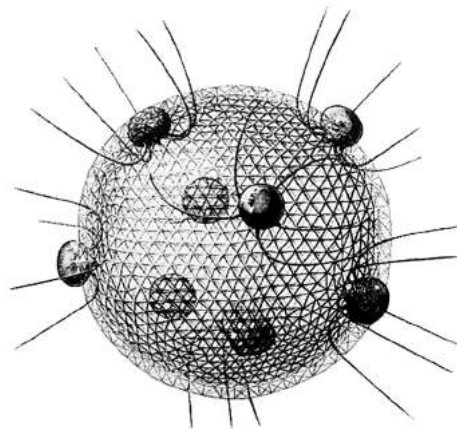
también la utilización de equipos mecánicos grandes y pesados para el montaje de los elementos en el sitio de la obra.

Figura 2. Domo de arcos radiales con anillos



A medida que el avance informático se abrió camino en las áreas de las ciencias, en la ingeniería estructural se han ido dando enormes avances en cuanto al modelado y el diseño de una variedad de composiciones complejas que apuntan a emular patrones geométricos de la naturaleza (Figura 3) (Subramanian, 2006) y, gracias a ello, conseguir grados de optimización alta en resistencia mecánica estructural (Lan, 1999). Una de las grandes ventajas de las estructuras espaciales ultraligeras hechas de tubos de acero es que se pueden organizar en patrones geométricos de triángulos formando una sola capa de superficie media, curva altamente rígida y resistente, tanto que resulta atractivo comparar su rigidez con la del sistema de arcos.

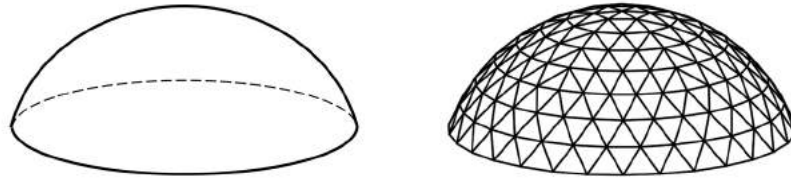
Figura 3. Estructura esquelética de la bacteria Radiolaria Tuscaretta Globosa



Fuente: Subramanian, Space Structures: Principles and Practice, 2006, pág. 3

El comportamiento resistente de una malla curva de triángulos (malla arriostrada) es parecido al comportamiento de un cascarón continuo, a medida que los triángulos se van densificando (Figura 4) (el cascarón es una de las formas más resistentes de la naturaleza) (Songel Gonzáles, 2005).

Figura 4. Izquierda, cascarón continuo. Derecha, malla curva arriostrada



La razón por la cual no se explotaba en plenitud las ventajas de las mallas espaciales en las décadas pasadas se debe a que, tanto en su diseño geométrico como en su análisis estructural, se maneja una enorme cantidad de datos, actividad hoy relativamente barato y simple.

ESTRUCTURA DE CUBIERTA DE ARCOS DEL COLISEO MUNICIPAL DE LA LOCALIDAD “EL TORNO”

Se tomaron las dimensiones globales del proyecto construido del coliseo municipal de la localidad El Torno, a 36 kilómetros al suroeste de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

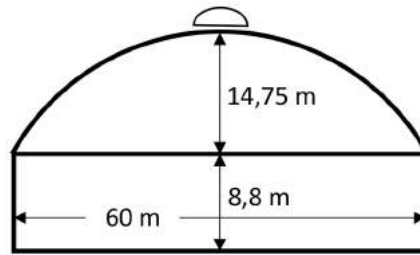
Figura 5. Coliseo municipal de El Torno



Nota: Izquierda, vista exterior. Derecha, vista interior.

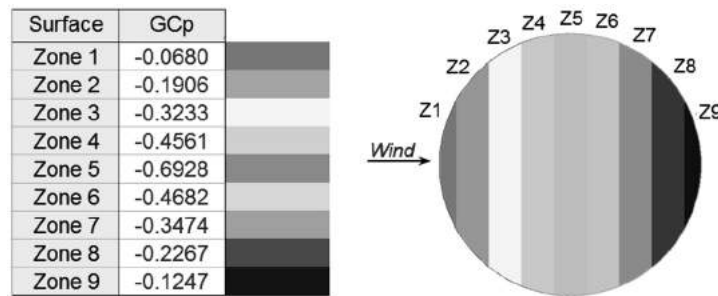
Estos datos son necesarios para modelar la estructura tal y como se encuentra construida. Las dimensiones globales se refieren al diámetro del coliseo, la altura de las columnas perimetrales de hormigón armado, y la elevación total en el ápice del domo. Estas dimensiones son la base para el modelado de ambas tipologías estructurales (Figura 6).

Figura 6. Dimensiones globales para modelar las estructuras del estudio



Con el volumen definido por las dimensiones externas generales, se procede a obtener las cargas de viento utilizando el denominado “método teórico”, establecido en la normativa estadounidense de cargas para edificios, de donde se obtiene una zonificación para los coeficientes de presión y de succión sobre la superficie envolvente del edificio (American Society of Civil Engineers ASCE-7, 2006). Otra carga importante es la carga viva de techo, referida a la presencia de trabajadores sobre la cubierta realizando labores durante el montaje. Aquí se toma en cuenta un valor de 60 kgf/m^2 como carga viva de techo.

Figura 7. Vista en planta de la zonificación de iso-presiones sobre la superficie del domo



Los estados de carga considerados en el estudio son:

- CM = carga muerta de los elementos estructurales y no estructurales
- CVt = carga de montaje o mantenimiento sobre la superficie de la cubierta
- VxAp = viento en dirección x, caso A, presión interna positiva
- VxAn = viento en dirección x, caso A, presión interna negativa
- VxBp = viento en dirección x, caso B, presión interna positiva
- VxBn = viento en dirección x, caso B, presión interna negativa
- VzAp = viento en dirección z, caso A, presión interna positiva
- VzAn = viento en dirección z, caso A, presión interna negativa
- VzBp = viento en dirección z, caso B, presión interna positiva
- VzBn = viento en dirección z, caso B, presión interna negativa

Para las combinaciones de carga, según ANSI/AISC-360/05: Specifications for Structural Steel Buildings, capítulo B, Design Requirements, AISC (American Institute of Steel Construction), se toma en cuenta el capítulo 2 del documento ASCE7-05, subtítulo 2.4. *Combining nominal loads using ASD*, 2.4.1. *Basic Combinations*, con lo cual se llega a obtener un total de 27 combinaciones de carga.

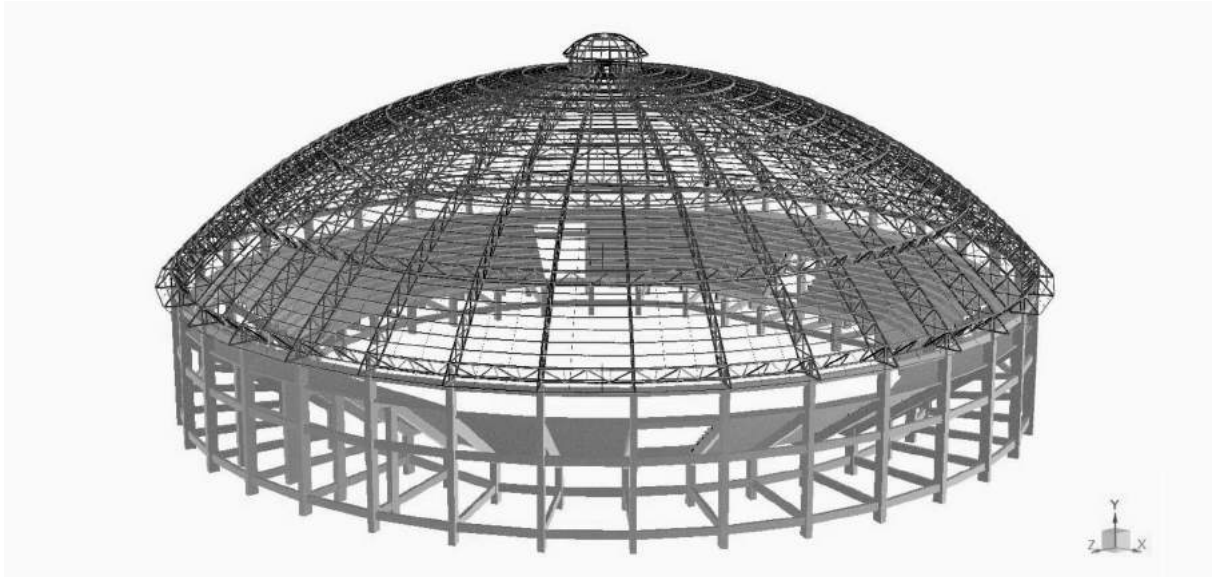
D1=CM	D15=CM+0,75VxBn+0.75CVt
D2=CM+CVt	D16=CM+0,75VzAp+0.75CVt
D3=CM+0,75CVt	D17=CM+0,75VzAn+0.75CVt
D4=CM+VxAp	D18=CM+0,75VzBp+0.75CVt
D5=CM+VxAn	D19=CM+0,75VzBn+0.75CVt
D6=CM+VxBp	D20=0,6CM+VxAp
D7=CM+VxBn	D21=0,6CM+VxAn
D8=CM+VzAp	D22=0,6CM+VxBp
D9=CM+VzAn	D23=0,6CM+VxBn
D10=CM+VzBp	D24=0,6CM+VzAp
D11=CM+VzBn	D25=0,6CM+VzAn
D12=CM+0,75VxAp+0,75CVt	D26=0,6CM+VzBp
D13=CM+0,75VxAn+0,75CVt	D27=0,6CM+VzBn
D14=CM+0,75VxBp+0,75CVt	

En el relevamiento, se toman las dimensiones de los elementos de la obra civil que son vigas perimetrales, vigas de las graderías, columnas secundarias, losas de graderías, posiciones de los accesos, con el fin de obtener el conjunto completo de la obra y apreciar en las simulaciones del cálculo, la interacción con la estructura de cubierta. El proceso del modelado de los ejes de los elementos se realizó en AutoCAD para luego ser transferidos al programa de análisis y diseño estructural RAM Elements, donde se les asignó propiedades geométricas y físicas de acuerdo con los datos obtenidos en el relevamiento inicial.

Se muestra una imagen del modelo completo del coliseo (Figura 8). La configuración estructural consiste en 36 columnas perimetrales de hormigón armado conectadas entre sí, en su parte inferior, por una viga de arriostre y, en su parte superior, por una viga perimetral, ambas de hormigón armado. Para la cubierta se tienen 36 arcos principales de celosía plana, conectados cada uno a una columna mediante una placa base con barras de anclaje. En la parte alta del domo, los arcos convergen hacia un anillo denominado “anillo de compresión”, sobre el cual se levanta una pequeña subestructura a modo de chimenea que permite tanto el ingreso de luz natural del sol como la evacuación del aire caliente refrescando de manera natural el ambiente interior. Una serie de anillos concéntricos de celosía conectan los arcos, cada cierta distancia, para controlar la longitud de pandeo en el sentido perpendicular a su rigidez mayor. Estos anillos concéntricos controlan las fuerzas radiales que de otro modo empujarían hacia afuera las puntas superiores de las columnas de hormigón. Como elementos secundarios, se tiene las correas de techo, que son perfiles simples formando anillos concéntricos a separaciones adecuadas para instalar, sobre ellos, la lámina de calamina de recubrimiento. Finalmente, para evitar que las correas de la zona media inferior se flexionen lateralmente por gravedad, se tienen barras de interconexión llamadas tensores de correas.

Corrido el análisis y verificado el diseño de los elementos de la cubierta, bajo el método ASD (American Institute of Steel Construction AISC, 2006), se obtiene un peso para la estructura de acero de 81,330 kilogramos fuerza. Considerando que el área interior en planta del ambiente es de 2.826 m^2 , se tiene un valor aproximado de 28,80 kilogramos por metro cuadrado cubierto, valor coherente para una cubierta de estructura de acero de luces grandes.

Figura 8. Vista axonométrica en perspectiva del modelo de la estructura completa del coliseo El Torno



Se presentan resultados importantes, producto de haber analizado y diseñado la cubierta con el sistema de arcos y anillos concéntricos.

El máximo desplazamiento vertical hacia arriba calculado (teórico) es para un nudo que pertenece a una de las correas y vale 1,73 centímetros, en la combinación de diseño $D26=0,6CM+VzBp$ (60% de la carga muerta, más viento en dirección z, caso B, presión interna positiva) (Figura 9). El máximo desplazamiento vertical hacia abajo es de -2,59 centímetros, también para un nudo de correa, en la combinación de diseño $D11=CM+VzBn$ (carga muerta, más viento en dirección z, caso B, presión interna negativa) (Figura 10).

Figura 9. Vista superpuesta de un arco completo original y deformado para la combinación de carga $D26=0,6CM+VzBp$ (60% de carga muerta, más viento en z, caso B, presión interna positiva)

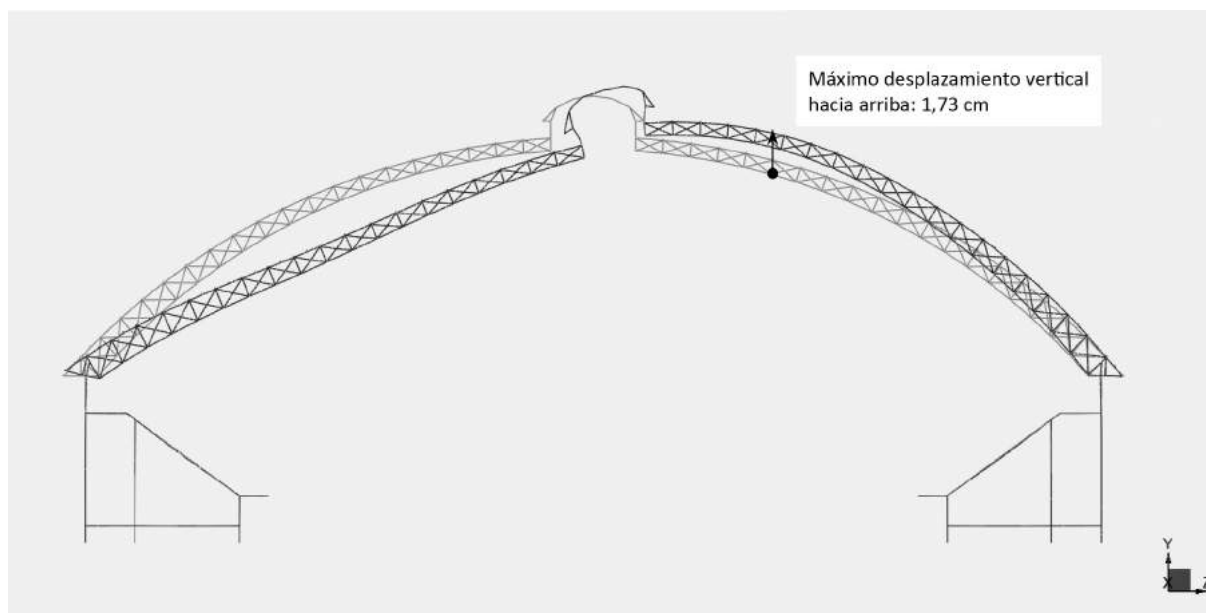
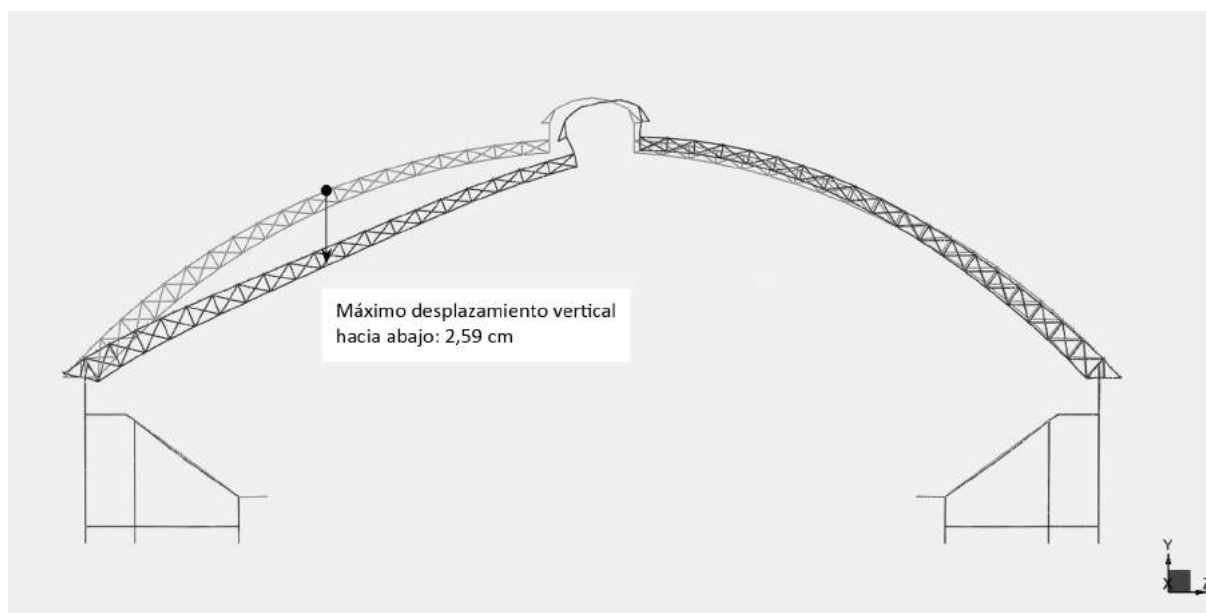
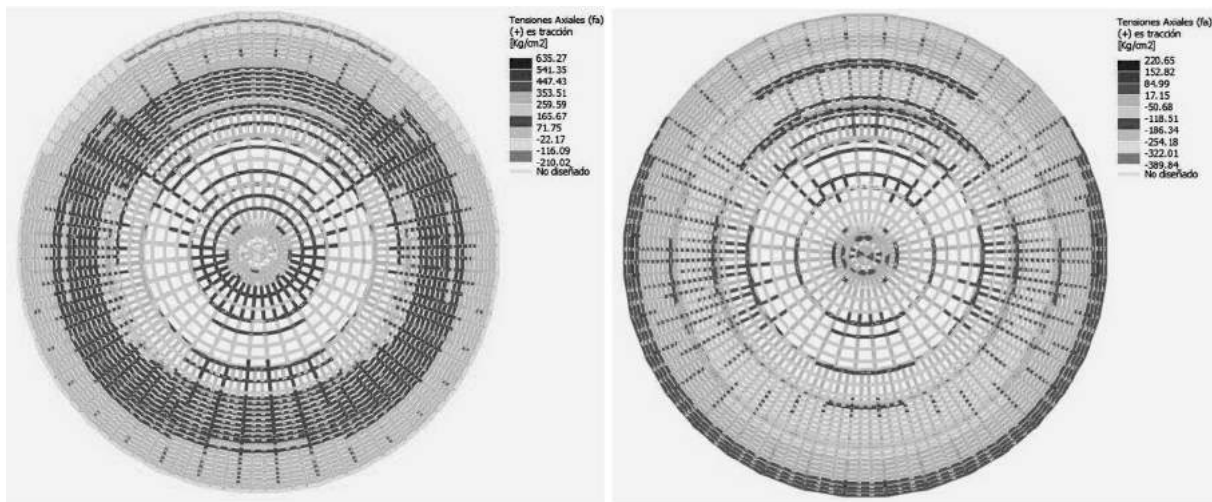


Figura 10. Vista superpuesta de un arco completo original y deformado para la combinación de carga $D11=CM+VzBn$ (carga muerta, más viento en dirección z, caso B, presión interna negativa)



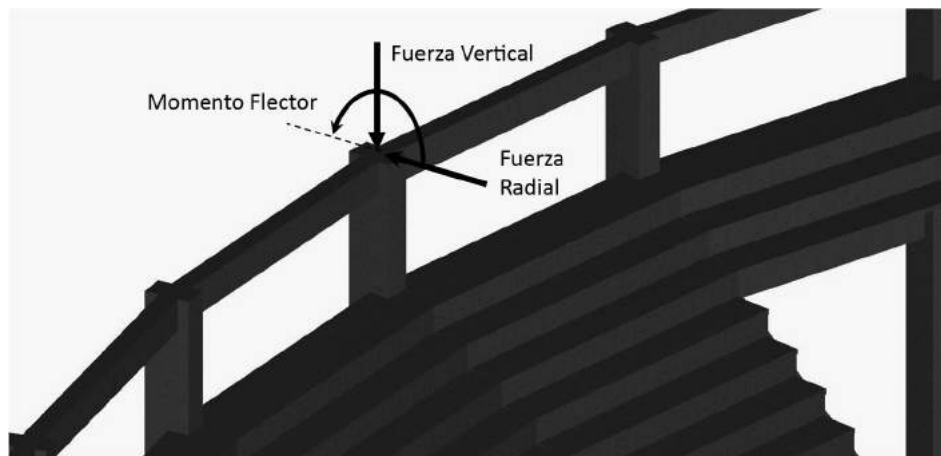
En la combinación de diseño D26 se genera la tensión axial de tracción mayor de 635 kg/cm^2 , mientras que, en la combinación D11, se genera la máxima tensión axial de compresión igual a -390 kg/cm^2 (Figura 11).

**Figura 11. Izquierda, máxima tensión axial de tracción.
Derecha, máxima tensión axial de compresión**



Se presenta las reacciones de las bases de los arcos que cargan las puntas superiores de las columnas para cuatro casos gobernantes: máxima fuerza vertical de compresión, máxima fuerza vertical de levantamiento, máxima fuerza radial, y máximo momento flector.

Figura 12. Figura ilustrativa de las reacciones de las bases de los arcos, cargadas como acciones en los extremos superiores de las columnas perimetrales de hormigón armado



Se presenta los valores de las fuerzas máximas sobre las puntas superiores de las columnas perimetrales que corresponden a las fuerzas de reacción en las bases de los arcos de la cubierta. Los valores positivos para estas fuerzas tienen direcciones (y sentidos) similares que los de la Figura 12.

Tabla 1. Fuerzas máximas que actúan sobre los extremos superiores de las columnas perimetrales de hormigón armado (inversas a las reacciones de apoyo para los arcos de la cubierta)

F. VERTICAL (kg)	F. RADIAL (kg)	MOMENTO (kg.m)	OBSERVACIONES
5.560	-2.830	-1.532	Máxima fuerza de compresión Combinación de carga D11
-6.509	-2.260	1.357	Máxima fuerza de levantamiento Combinación de carga D20
2.998	2.597	1.102	Máxima fuerza radial h/afuera Combinación de carga D11
-3.932	-2.286	-1.621	Máximo momento flector Combinación de carga D26

Para la fabricación de las piezas metálicas se estima un tiempo aproximado de 65 días trabajados con al menos 10 personas. El transporte desde el taller hasta el sitio de montaje necesita de equipos de grúa para el cargado, el descargado y la manipulación de los sub-ensamblajes de los arcos principales y los tramos de anillos de celosía. Para el montaje en sitio, conlleva la construcción de una torre temporal central sobre la cual se asienta el anillo de compresión con la ayuda de una grúa cuyo brazo debe tener al menos 40 metros de longitud. Deben subirse los arcos principales y apoyarse, inferiormente, sobre una columna perimetral de hormigón y, superiormente, sobre el anillo de compresión. Debido a que al apoyar un arco sobre el anillo superior se genera una fuerza lateral sobre este apoyo, debe subirse simultáneamente el arco opuesto para anular dicha fuerza lateral, es decir, que se necesita dos grandes grúas trabajando en paralelo en el montaje. No se puede subir un arco solitario porque, por sus dimensiones, es esbelto lateralmente, de manera que se tiene que pre ensamblar en tierra dos arcos contiguos con sus fragmentos de anillos laterales, entre ellos, para controlar ese efecto. Una vez instalados los arcos y los anillos concéntricos, se procede a colocar las correas y, finalmente, la lámina de recubrimiento. El tiempo estimado para el montaje de esta cubierta es de 75 días.

ESTRUCTURA DE CUBIERTA DE MALLA ESPACIAL ULTRALIGERA

Al analizar la rigidez elevada de un cascarón, debida a su doble curvatura, y considerando la relación entre el espesor y el diámetro de cascarón tipo huevo de gallina, se tiene una idea básica para proponer el espesor estructural de una malla espacial arriostrada, cuyo comportamiento es similar al de un cascarón. En el caso del huevo, la relación es del orden del 1%, lo que implica que, para un diámetro de 60 metros, el espesor estructural podría ser de orden de 60 centímetros. Una cubierta espacial de luces grandes es la del coliseo municipal de la localidad de Fernández Alonso, ubicada a 90 kilómetros al norte de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, consistente en una malla de doble capa cuya separación es de 60 centímetros (espesor estructural), que cubre una planta hexagonal que mide 70 metros entre esquinas opuestas (Figura 13).

La proporción espesor/diámetro del huevo ha sido establecida a través de procesos naturales de optimización de forma y resistencia asociada. Sin embargo, esta proporción también obedece al material base del que está hecho el cascarón, carbonato cálcico. Tomando en cuenta los elevados valores de resistencia mecánica que presenta el material acero en relación con su peso propio, se intenta plantear soluciones de mallas arriostradas con relaciones espesor/diámetro por debajo de 1%. En la cubierta del coliseo del colegio Germán Busch, ciudad de Yacuiba, al sur de Bolivia, se tiene una malla arriostrada de una sola capa con un espesor de 10 centímetros cubriendo una luz principal de 42

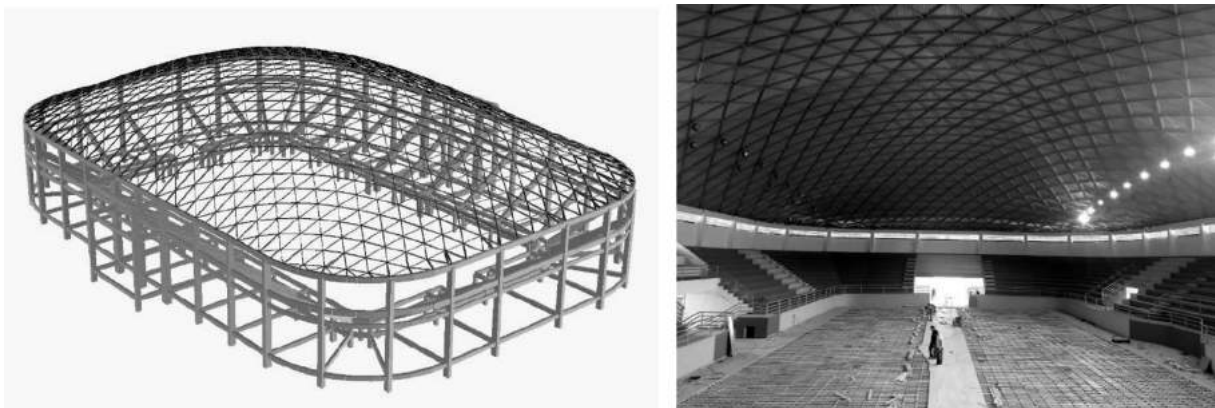
metros, lo que resulta en una relación espesor/luz de 0,24 % (Figura 14). La propuesta, para el domo de planta circular de 60 metros de diámetro del presente estudio comparativo, es de una sola malla arriostrada con tubos de 10 centímetros de altura, relación espesor/diámetro de 0,17 %.

Figura 13. Coliseo municipal de Fernández Alonso



Nota: Izquierda, vista exterior del coliseo cuya cubierta es una malla espacial de doble capa. Derecha, vista interior hacia el ápice de la cubierta.

Figura 14. Coliseo del colegio Germán Busch, Yacuiba



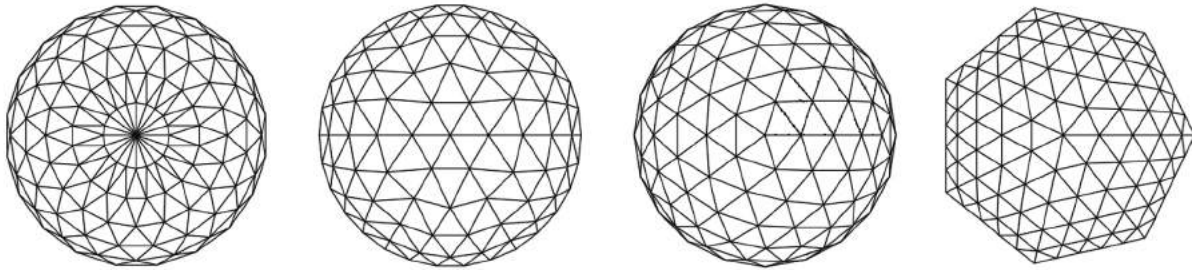
Nota: Izquierda, vista axonométrica del modelo en computadora de la estructura completa. Derecha, vista del interior durante la instalación del piso.

Un factor importante a tomar en cuenta en el desempeño de una malla arriostrada es la forma de los triángulos, donde los triángulos equiláteros presentan la mejor distribución de esfuerzos en general. Sin embargo, para cubrir superficies de doble curvatura, es necesario distorsionar sistemáticamente algunos triángulos para adaptar la malla a la base o a alguna otra característica propia del proyecto. Los

patrones geométricos de mallas de triángulos para domos de planta circular o poligonal se clasifican en: Lamella, Kiewitt, geodésico, de proyección (Figura 15) (Subramanian, 2006).

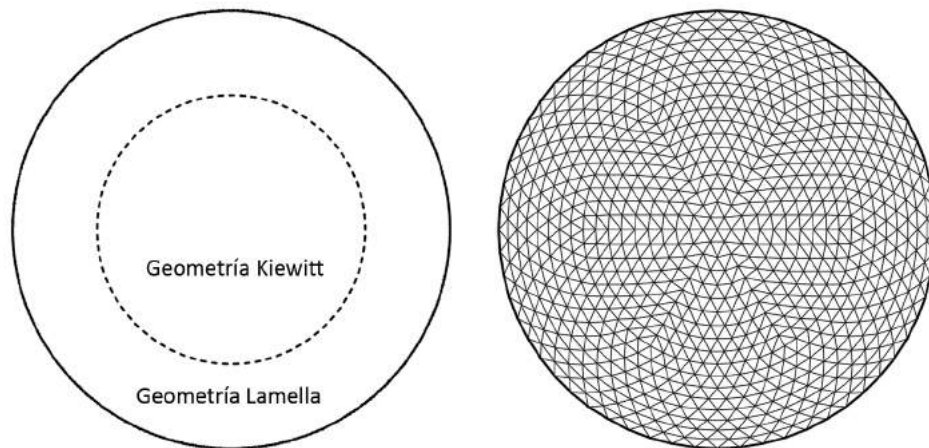
Se propone un patrón híbrido de geometría Lamella en la zona perimetral y Kiewitt en la zona central (Figura 16). Los elementos en su mayoría son tubos rectangulares de 50 milímetros x 100 milímetros y 2 milímetros de pared.

Figura 15. Algunos patrones geométricos para mallas de domos de superficie esférica



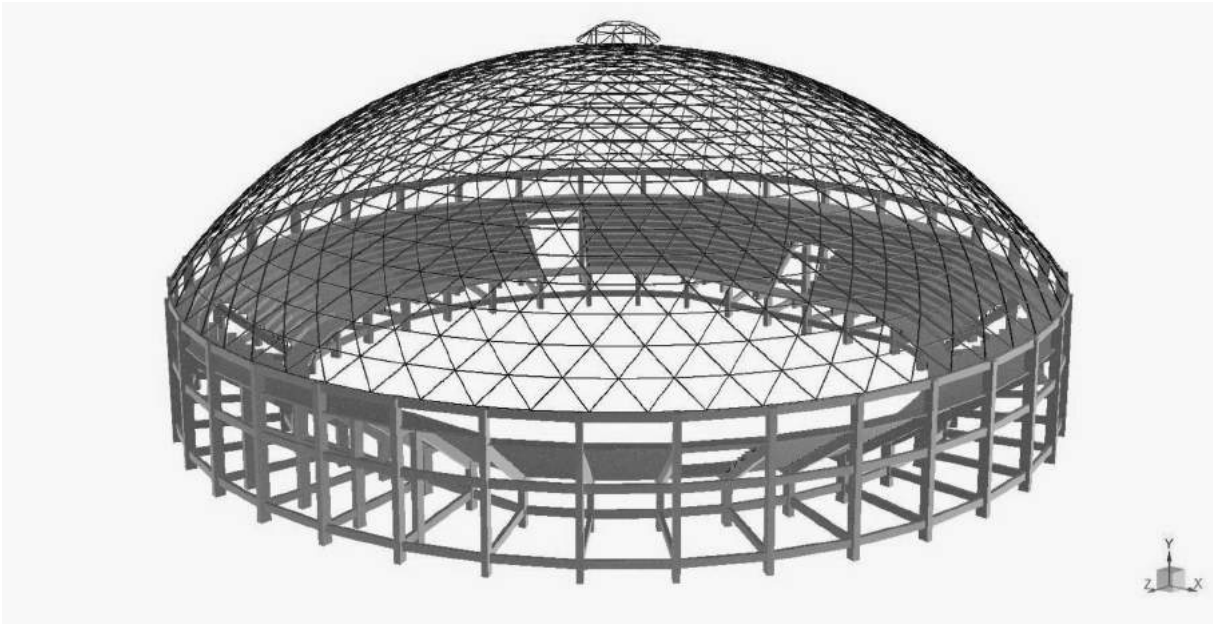
Nota: De izquierda a derecha: Lamella, Kiewitt, Geodésico, Proyección.

Figura 16. Vista en planta del patrón geométrico propuesto: híbrido Kiewitt-Lamella



Se presenta el modelo en computadora de la estructura completa (Figura 17). Realizado el análisis y verificado el diseño de los elementos de la malla bajo el método ASD (American Institute of Steel Construction AISC, 2006), se obtiene un peso para la estructura de acero de 27,560 kilogramos fuerza.

Figura 17. Vista axonométrica en perspectiva del modelo en computadora de la estructura de hormigón con la malla espacial de una sola capa propuesta para la cubierta.



Considerando que el área interior en planta del ambiente es de 2,826 metros², se obtiene un valor aproximado de 9,80 kilogramos por metro cuadrado cubierto, valor impresionantemente bajo para una estructura rígida de perfiles de acero. Se muestran algunos de los resultados sobresalientes, producto de haber analizado y diseñado la cubierta con el sistema de malla espacial ultraligera.

El máximo desplazamiento vertical hacia arriba calculado es de 2,26 centímetros, en la combinación de carga $D26=0m6CM+VzBp$ (60% de la carga muerta, más viento en dirección z, caso B, presión interna positiva) (Figura 18). El máximo desplazamiento vertical hacia abajo es de -0 metros 95 centímetros, en la combinación $D7=CM+VxBn$ (carga muerta, más viento en dirección x, caso B, presión interna negativa) (Figura 19).

En cuanto a las tensiones en los elementos, en la combinación $D26=0m6CM+VzBp$ se genera la tensión axial de tracción mayor igual a 851 kilogramos/centímetros² y en la combinación $D7=CM+VxBn$, se genera la tensión axial de compresión mayor, igual a -424 kilogramos/centímetros² (Figuras 20 y 21).

Figura 18. Vista superpuesta del perfil de una franja de malla original y deformada para la combinación de carga $D26=0,6CM+VzBp$ (60% de carga muerta, más viento en z, caso B, presión interna positiva)

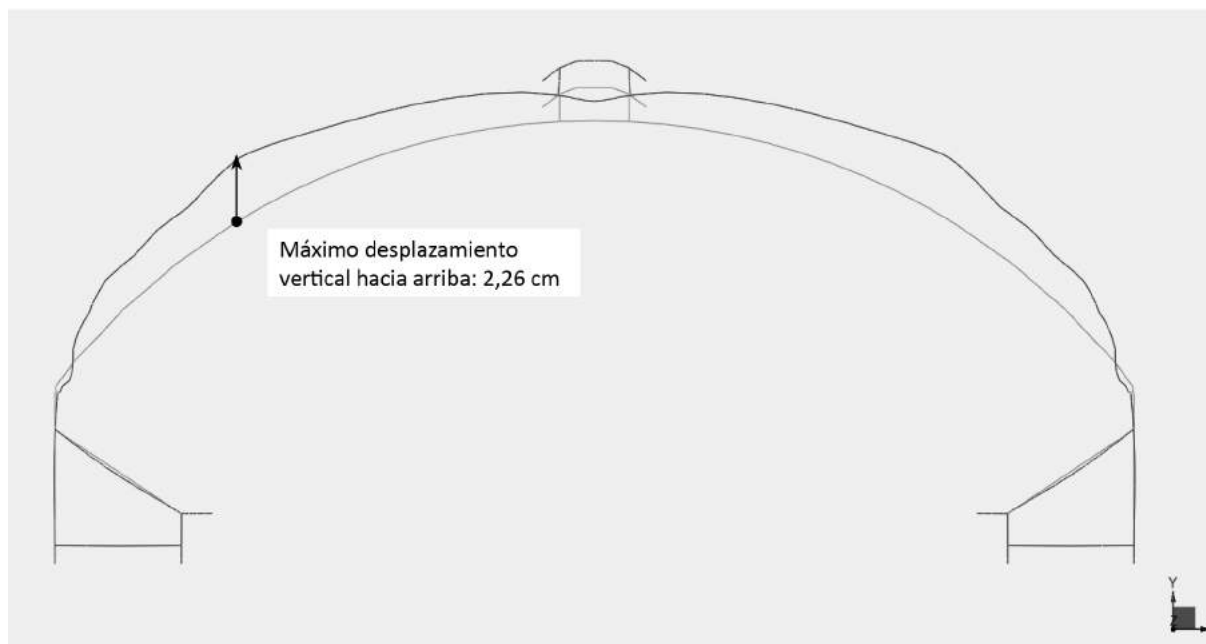


Figura 19. Vista superpuesta del perfil de una franja de malla original y deformada para la combinación de carga $D7=CM+VxBn$ (carga muerta, más viento en x, caso B, presión interna negativa)

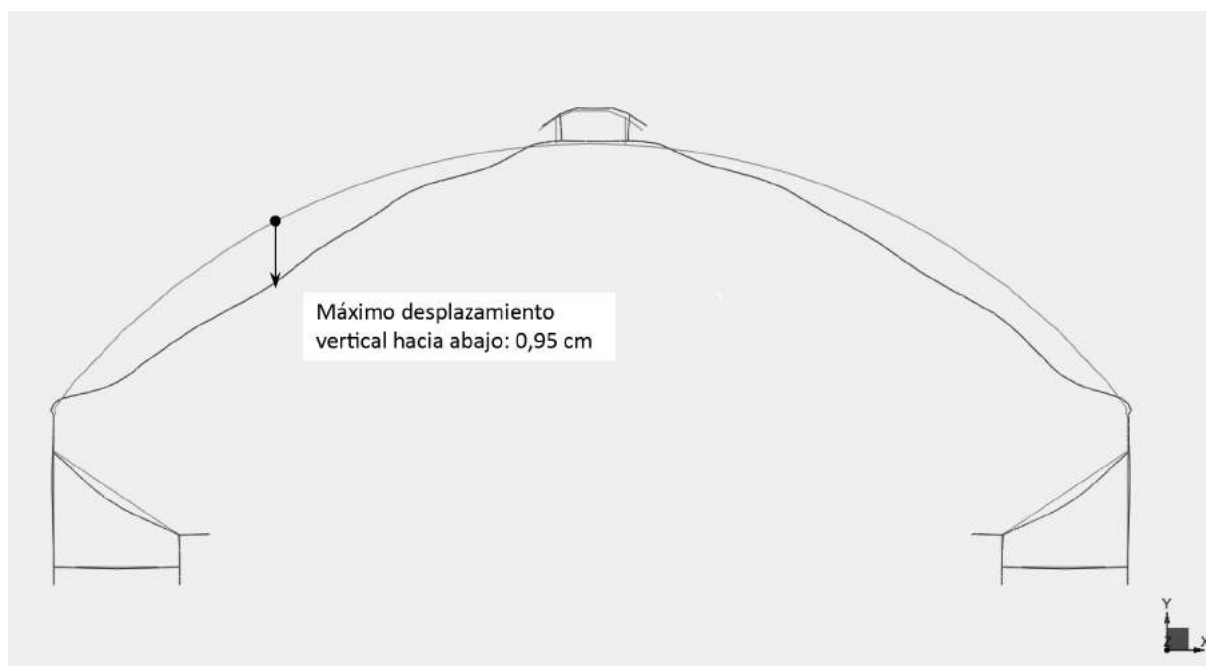


Figura 20. Mapeo de tensiones axiales en la combinación D26=0,6CM+VzBp (60% de carga muerta, más viento en z, caso B, presión interna positiva)

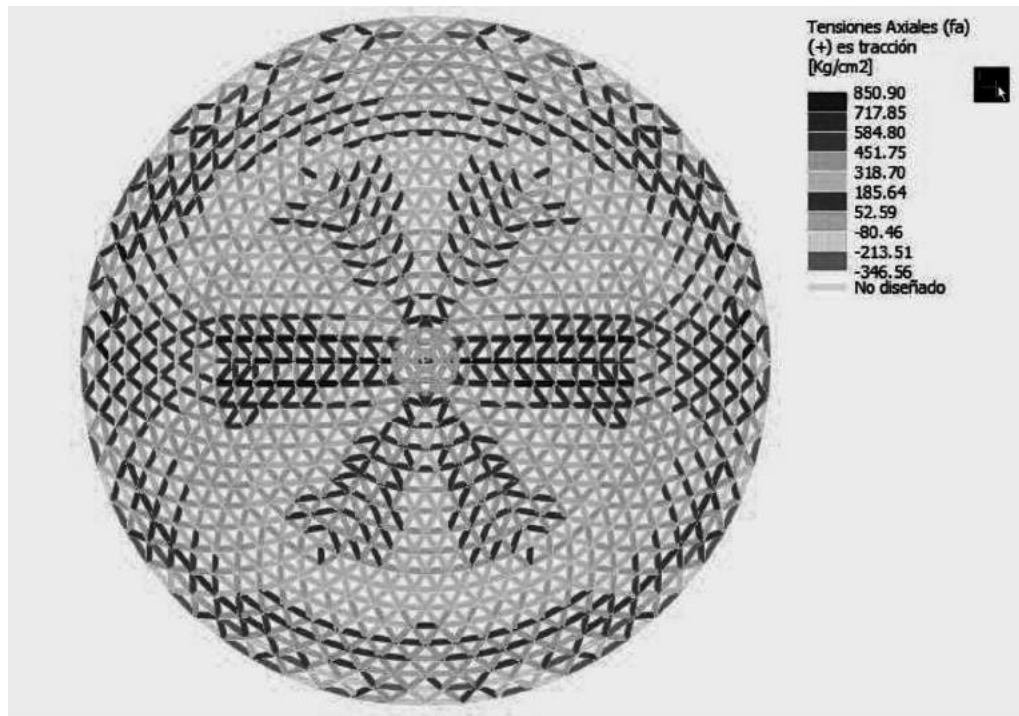
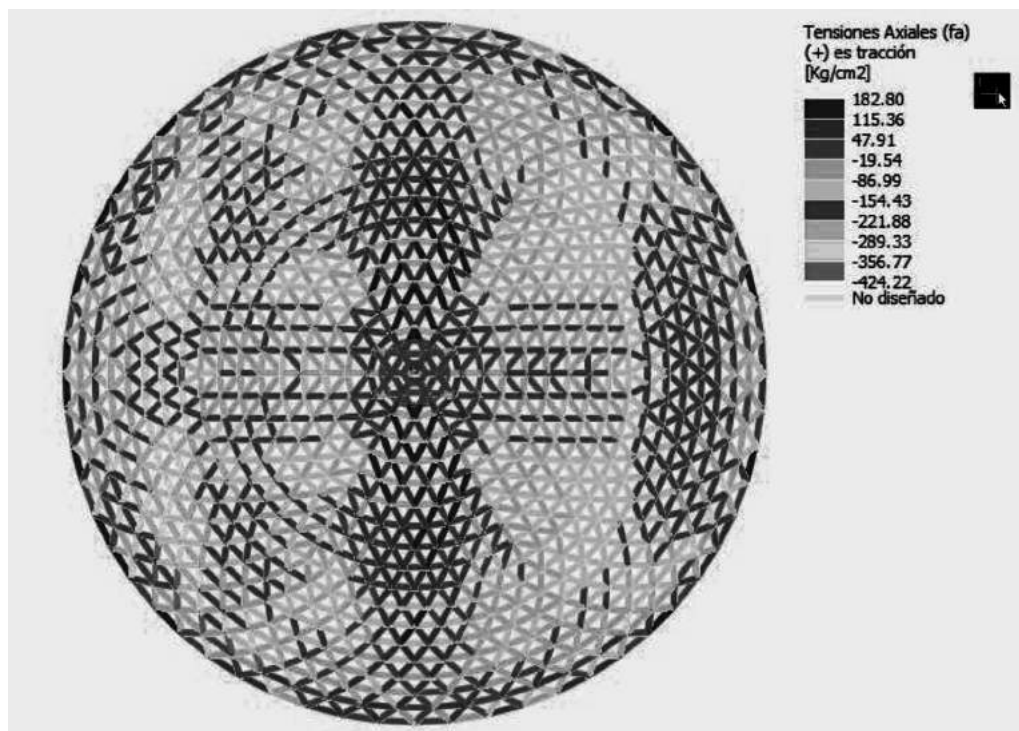
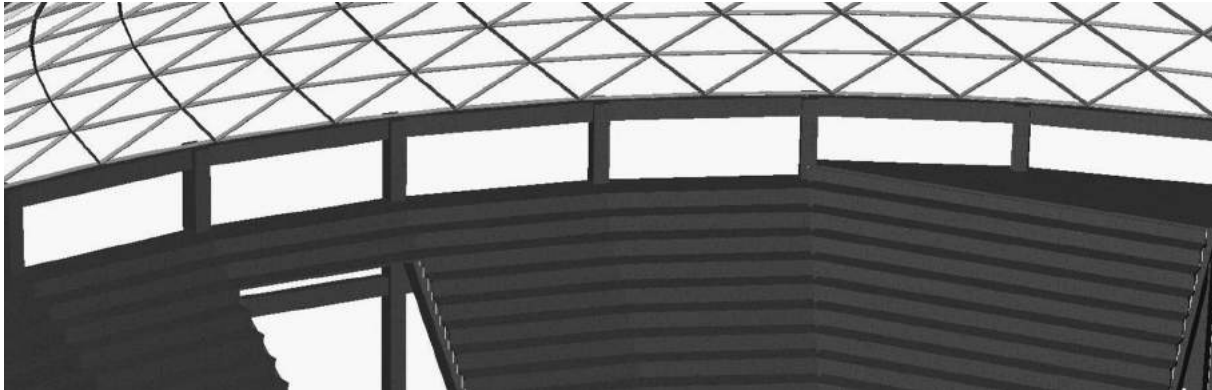


Figura 21. Mapeo de tensiones axiales en la combinación D7=CM+VxBn (carga muerta, más viento en x, caso B, presión interna negativa)



Las fuerzas de reacción en los nudos base de la estructura de malla se transmiten a una viga perimetral de hormigón armado de sección 30 centímetros x 50 centímetros, que, a su vez, descansa sobre los extremos superiores de las columnas perimetrales de hormigón armado.

Figura 22. **Vista interior mostrando que los puntos de apoyo de los nudos base de la malla se distribuyen de manera no uniforme con respecto a las columnas perimetrales**



No es posible separar, de manera práctica, los efectos de las reacciones de los nudos base para aplicarlos en las puntas superiores de las columnas, ya que la rigidez de la viga perimetral de apoyo influye en los valores de dichas reacciones. Así, los nudos base que se encuentran cerca de una columna, reaccionan con fuerzas mayores que los nudos que apoyan en las zonas centrales (menos rígidas) de los tramos colgados de la viga perimetral (Tabla 1). Se exponen las fuerzas máximas de reacciones, vistas como acciones sobre la viga perimetral donde se apoyan, distinguiéndose tres tipos de posiciones con respecto a las columnas perimetrales: (1) cercano a columna, (2) alejado de columna, y (3) centro de tramo de viga entre dos columnas.

Figura 23. **Posiciones tipo para presentar las fuerzas de apoyo cargadas sobre la viga perimetral de hormigón armado donde se conecta la malla espacial de la cubierta**

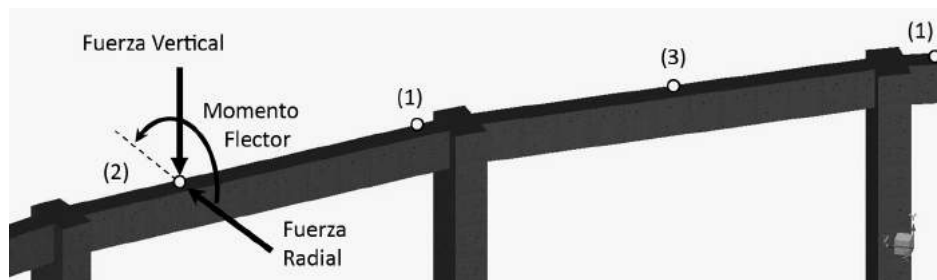


Tabla 1. Fuerzas máximas que actúan sobre la viga superior perimetral de hormigón armado (inversas a las reacciones de apoyo para los nudos base de la malla estructural de la cubierta)

F. VERTICAL (kg)	F. RADIAL (kg)	MOMENTO (kg.m)	OBSERVACIONES
2.920	2.448	152	Máx. fuerza de compresión (1) combinación de carga D11
-6.260	-4.548	-267	Máx. fuerza levantamiento (1) combinación de carga D20
-5.301	-5.025	293	Máxima fuerza radial (1) combinación de carga D20
-5.301	-5.025	293	Máximo momento flector (1) combinación de carga D20
1.436	-1.983	200	Máx. fuerza de compresión (2) combinación de carga D7
-2.504	-2.809	308	Máx. fuerza levantamiento (2) combinación de carga D20
-2.432	-2.990	307	Máxima fuerza radial (2) combinación de carga D20
-2.482	-2.649	317	Máximo momento flector (2) combinación de carga D24
1.281	1.278	-160	Máx. fuerza de compresión (3) combinación de carga D11
-2.418	-2.875	353	Máx. fuerza levantamiento (3) combinación de carga D20
-2.418	-2.875	353	Máxima fuerza radial (3) combinación de carga D20
-2.352	-2.727	360	Máximo momento flector (3) combinación de carga D24

Las conexiones en la malla se materializan mediante pernos de resistencia alta tipo A490 sobre nudos prefabricados prismáticos huecos, desarrollados por el autor. Para la fabricación en taller, se estima un tiempo aproximado de 70 días con 12 personas. Una de las ventajas de este sistema es que la manipulación de los elementos no necesita de equipos de grúa o montacargas, debido a que las piezas individuales son relativamente pequeñas y livianas, ventajoso para el cargado y el transporte desde el taller de fabricación hasta el sitio de la obra.

Para el montaje de los elementos, se tiene una variedad de métodos desarrollados según las características del proyecto (Mukaiyama, Fujino, Kuroiwa, & Ueki, 2009). Uno de los procedimientos de montaje eficientes consiste en tener una torre central temporal de la que cuelga la malla, que se va elevando a medida que se colocan nuevas piezas en la zona inferior; el proceso continúa hasta completar la malla y, luego, se desmonta la torre central. Otro proceso consiste en pre armar bloques grandes sobre el suelo y, luego, con la ayuda de grúas, se elevan y colocan los bloques en su posición final. El método planteado en este proyecto es económico y consiste en armar las piezas avanzando secuencialmente desde la base del domo (viga perimetral de hormigón que une las puntas de las columnas de soporte) hacia arriba, anillo por anillo, con la utilización de tres elevadores personales “liftman”, y la participación de 15 personas semi-calificadas durante 70 días de trabajo.

RESULTADOS

Los máximos desplazamientos verticales hacia abajo estimados, en una y otra tipología estructural, son 2,59 centímetros para la estructura de arcos y 0,95 centímetros para la malla espacial. Los máximos desplazamientos verticales hacia arriba, debidos a la succión del viento, estimados en una y otra tipología estructural son 1,73 centímetros para la estructura de arcos y 2,26 centímetros para la malla espacial. De acuerdo con la especificación ANSI/AISC-360/05, en la sección de Comentarios del capítulo L, se indica que el límite para deflexiones en estructuras de cubierta se toma como la luz dividido por 240 que en este caso, resultara en $6.000 \text{ centímetros} / 240 = 25 \text{ centímetros}$, satisfecho por ambas propuestas de modelos estructurales. En cuanto al diseño de los miembros, por el método ASD, lo que se compara, son los esfuerzos permisibles contra los valores de esfuerzos requeridos según el análisis estructural. Así, se tiene familias de elementos cuyas verificaciones se realizan únicamente para el elemento más solicitado de cada familia. Se muestran las familias importantes de elementos y los criterios de diseño de la norma tomados en cuenta (Tabla 2).

Tabla 2. Familias de elementos y criterios referenciales de norma para diseño por ASD

ELEMENTO	SECCIÓN	RELACIÓN	REFERENCIA	OBSERVACIONES
Cuerda de arco	100x100x3mm	0,74	Eq. H1 - 1 a	Arco de celosía
Diagonal arco	50x100x2mm	0,38	Eq. H1 - 1 b	Arco de celosía
Cuerda de anillo	100x100x3mm	0,38	Eq. H1 - 1 a	Anillo concéntrico
Diagonal anillo	50x100x2mm	0,10	Sec. E1	Anillo concéntrico
Perímetro basal	50x100x3mm	0,92	Eq. H1 - 1 a	Malla espacial
Resto de malla	50x100x2mm	0,97	Eq. H1 - 1 a	Malla espacial

En base a las etapas de diseño, fabricación y montaje, se han elaborado tablas donde se puede identificar, las ventajas del sistema de malla espacial frente al sistema clásico de arcos radiales con anillos concéntricos (Tabla 3).

Se muestra los costos directos asociados a cada etapa de la construcción, evidenciando que la instalación de calamina tiene el mismo costo en ambas tipologías (conclusión lógica al ser igual en ambos casos tanto la superficie de calamina como el trabajo de instalación). No toma en cuenta el costo del transporte, desde el taller de fabricación hasta el sitio de montaje, ya que este componente puede variar en relación a la distancia del viaje y las condiciones de la ruta (Tabla 4).

Tabla 3. Características y necesidades propias para cada tipología estructural propuesta

Característica o necesidad	Estructura de Arcos c/anillos	Estructura de malla espacial
Nivel de complejidad para modelar en la computadora	Mediano	Elevado
Peso propio de la Estruct.	81.330 kgf	27.560 kgf
Número de elementos sueltos en obra	1.692 piezas entre ensambles grandes y piezas pequeñas	2.430 barras o elementos 830 nudos prefabricados
Número de piezas grandes que necesitan grúa	361	Ninguna
Necesidad de realizar soldadura en el sitio	Se necesita en las conexiones, o deberán diseñarse atornilladas	No se necesita
Necesidad de torre auxiliar temporal para el montaje	Sí, una torre central robusta c/ cables de arriostram. al suelo	No se necesita

Necesidad de equipos de elevación personal	No se necesita	Se estiman necesarios al menos 3 elevadores liftman
Necesidad de grúas grandes para el montaje	Sí, mínimo dos grúas grandes c/ brazo de 50 metros de largo	No se necesita
Necesidad de tráiler de carga para transporte pesado	Sí, se necesita al menos 3 viajes en tráiler de 35 toneladas	Se puede transportar en camiones medianos o 1 tráiler
Tiempo estimado de fabricación en taller	65 días hábiles, con 10 personas calificadas	70 días hábiles, con 12 personas calificadas en soldadura
Tiempo estimado de montaje en el sitio	75 días hábiles, con 12 personas calificadas	70 días hábiles, con 15 personas semi-calificadas

Tabla 4. Costos directos globales de los principales componentes de las propuestas

Componente o etapa	Estructura de Arcos c/anillos	Estructura de malla espacial
Fabricación en taller	149.050,00 dólares	81.690,00 dólares
Montaje en sitio	73.750,00 dólares	58.320,00 dólares
Instalación de calamina	32.740,00 dólares	32.740,00 dólares

En resumen, el costo directo total para la estructura de arcos con anillos es de 255.540,00 dólares estadounidenses y el costo directo total para la estructura de malla espacial es de 172.750,00 dólares estadounidenses.

CONCLUSIONES

Ambos sistemas se analizaron y diseñaron bajo cargas de viento, peso de recubrimiento y carga viva de techo similares y, sin embargo, existen diferencias entre las dos tipologías estructurales para cubiertas de luces grandes, principalmente, en cuanto al peso propio de las estructuras y, en cuanto, al costo directo en la etapa de fabricación. En términos de peso propio, con respecto al peso de la estructura de arcos, el peso de la malla espacial representa el 33,88 %, es decir, prácticamente, un tercio del valor y, sin embargo, la rigidez estimada respecto al mayor desplazamiento vertical hacia abajo o hacia arriba de los puntos de ambas estructuras es similar.

Con respecto al costo estimado de fabricación en taller, de la estructura de arcos, la malla representa el 54,81 % de dicho valor, que repercute de manera importante en el costo final de la obra. Para el costo directo de la etapa de montaje, con respecto a la estructura de arcos, la malla espacial representa el 79,08 % que sigue siendo económico con una diferencia más o menos importante, aunque no tan pronunciada como en la etapa de fabricación donde, obviamente, tiene una incidencia mayor la cantidad menor de materiales comprados. En la adquisición e instalación del material de recubrimiento, se considera que no hay diferencia entre ambos sistemas estructurales, ya que la superficie a cubrir y el volumen de trabajo es exactamente igual en ambas situaciones, es decir, que compra e instalación de la calamina tiene un costo que es independiente del sistema estructural resistente. Se evidencia el grado alto de optimización de la propuesta de malla espacial de una sola capa contra la estructura de arcos radiales y anillos concéntricos, tanto en términos de aprovechamiento del material, como en costo de la obra.

REFERENCIAS

- American Institute of Steel Construction AISC. (2006). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois, USA: AISC, INC.
- American Society of Civil Engineers ASCE. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
- Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. Oxford: Architectural Press.
- Engel, H. (2003). *Sistemas de Estructuras*. Barcelona, España: Gráficas-92.
- Hibbeler, R. C. (2015). *Structural Analysis*. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- Lan, T. T. (1999). *Structural Engineering Handbook: Space Frame Structures*. Boca Raton. Florida, USA: CRC Press LLC.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Structural Steel Design*. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc.
- Mukaiyama, Y., Fujino, T., Kuroiwa, Y., & Ueki, T. (2009). Erection Methods for Space Structures. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, 1951-1962.
- Songel Gonzáles, J. M. (2005). Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. *Tesis Doctoral*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Subramanian, N. (2006). *Space Structures: Principles and Practice*. Brentwood, UK: Multi-Science Publishing Co. Ltd.

1 Originalmente el título tenía como nombre Los Efectos de la Nueva Ley de Hidrocarburos en el Desarrollo Regional y Local en Bolivia.

2 Programa UPSA Horizonte 2034.

3 Economista y Consultor.

se encuentren a localidades mineras. Desde los estudios realizados por Sachs y Warner (1995) y los modelos propuestos por Corden y Neary (1982), la hipótesis de la maldición de los recursos naturales ha sido refutada observando los impactos locales sobre el crecimiento económico, en particular, de economías en subdesarrollo. La evidencia empírica sugiere que los efectos gasto y movimiento de recursos productivos, generan encadenamientos positivos para la expansión de industrias localizadas en torno al sector extractivo como también continuas expansiones de sectores no transables durante un choque positivo a los precios de los recursos naturales no renovables, Goderis y Malone (2010).

La hipótesis de la maldición de los recursos naturales ha sido corroborada observando el comportamiento fiscal de los gobiernos a cargo de la administración de los recursos, y los canales institucionales. Estudios realizados por Bhattacharyya y Hodler (2010) y Besley y Persson (2011), encuentran que la mayor riqueza de un recurso natural no renovable ocasiona efectos heterogéneos en la corrupción y calidad institucional de los territorios con abundancia de estos recursos. La evidencia empírica sugiere que la existencia de estados rentistas llevan a un mal uso de los valores marginales de los fondos públicos observando niveles menores de gasto efectivo, endeudamiento público excesivo y tasas bajas de inversión y tributación efectiva. Aunque la teoría sugiere que los ingresos captados por la extracción de los recursos naturales, tienen un beneficio directo sobre los presupuestos de las entidades locales que las administran, la captación de estos recursos y sus reglas de distribución fiscal pueden conducir a resultados económicos positivos. Los hallazgos empíricos, Caselli y Michaels (2013) y Arrellano-Yanguas (2011) han sido divergentes y los académicos acuerdan que los factores institucionales importantes para garantizar el éxito del aprovechamiento de los recursos dependen tanto de un balance entre niveles de descentralización política como de mejor capacidad gubernamental de los gobiernos locales que las administran. De tal forma que la evidencia sugiere que resultados locales positivos como resultado de los ingresos compartidos con los gobiernos locales son posibles pero no están asegurados.

Se toma el enfoque empírico propuesto por Perry y Olivera (2009), examinando los efectos locales de la producción de petróleo y carbón en departamentos y municipios de Colombia. Así como, también, las interacciones entre los departamentos y municipios productores según su capacidad de generar mayores recaudaciones tributarias y otras proxy de calidad institucional. El escenario Boliviano ofrece posibilidades para constatar la evidencia empírica obtenida en países también ricos en recursos no renovables y con un pasado altamente extractivo. En particular, la ley de hidrocarburos (2005) permitió generar nuevos recursos fiscales como el Impuesto directo a los hidrocarburos (IDH) y otros recursos de coparticipación tributaria entre todos los municipios productores y no productores de hidrocarburos de Bolivia. La coyuntura internacional que beneficio durante cuatro años consecutivos, al sector de hidrocarburos nacional, producto del auge de los precios del petróleo, permitió captar cuantiosos recursos fiscales que fueron distribuidos entre departamentos y municipios de Bolivia, y financió proyectos de inversión pública y de políticas sociales con los recursos del Tesoro General de la Nación.

En Bolivia, el cincuenta por ciento de los recursos fiscalizados por la producción a boca de pozo de hidrocarburos se destina según el régimen de regalías y participaciones⁴. La distribución de dichos recursos es la siguiente 11 por ciento a los departamentos productores, uno por ciento de regalía nacional compensatoria donde el departamento del Beni, recibe una tasa de dos tercios, y Pando, de un tercio, seis por ciento de participación al Tesoro General del Estado y 32 por ciento para el IDH destinado a gobernaciones (antes prefecturas), municipios y universidades públicas de Bolivia. Cabe mencionar que la distribución de coparticipación del IDH es del cuatro por ciento para los departamentos productores y dos por ciento para los no productores. Sin embargo, si hubiese algún departamento

4 La ley de hidrocarburos del 2005 no modificó el cálculo ni la distribución de regalías.

productor cuya recaudación sea menor al de un departamento no productor, el Tesoro General de la Nación nivelará su ingreso hasta el máximo monto percibido por el departamento no productor. Los estudios realizados por Fundación Jubileo (2012) ofrecen un detalle descriptivo interesante sobre los ingresos de recaudaciones por regalías e IDH recibidos por los gobiernos locales de Bolivia.

En el presente artículo académico, se examina si departamentos y municipios productores de hidrocarburos en Bolivia han crecido económicamente más respecto a los departamentos y municipios no productores. Pero, también, si los recursos fiscales en forma de regalías por la extracción y producción de hidrocarburos, ha permitido crecimiento económico mayor en las entidades territoriales de su jurisdicción. También se evidencia si existen diferencias en el comportamiento fiscal de los departamentos y municipios que son sujetos o no de los recursos fiscales en forma de regalías por hidrocarburos. La contribución empírica de este artículo está sustentada por la introducción de variables instrumentales que explotan las variaciones espaciales de la geología petrolera y permiten controlar los problemas de endogeneidad de los modelos econométricos. La segunda sección de este documento brinda información descriptiva sobre el uso de la geología petrolera para la construcción de variables instrumentales, mientras que, la tercera sección brinda la identificación estratégica de la metodología empírica, la cuarta sección describe los datos y las últimas secciones presentan los resultados y las conclusiones.

GEOLOGÍA PETROLERA Y VARIABLES INSTRUMENTALES

Se describe y se resalta la importancia de la geología petrolera para instrumentalizar la riqueza en recursos de hidrocarburos y minerales. Se define que las cuencas sedimentarias son sedimentos rocosos formados hace millones de años, que contienen en su interior diversos gases y minerales que permiten la formación de hidrocarburos, es decir, petróleo y gas natural, Fugro Robertson (2013). Estas cuencas sedimentarias son localizadas en distintas fallas geológicas alrededor del planeta. Las cuencas sedimentarias son clasificadas en 28 grupos, de acuerdo a su placa tectónica, mecanismo de subsidencia y componente final del ambiente deposicional⁵. La naturaleza de la exogeneidad de las cuencas sedimentarias se debe a que no depende, para su formación, de ningún factor socio-económico impulsado por el ser humano.

En Bolivia, las cuencas sedimentarias forman parte de la jurisdicción del estado boliviano⁶ y corresponden al tipo de cuencas convergentes oceánicas-continenciales caracterizadas por encontrarse alrededor de fallas geológicas de montaña y cordillera. Solo una cuenca sedimentaria es divergente e intracratónica pero tiene poca exploración y se encuentra en la región del pantanal boliviano (anexo 2, Figuras A2.1 y A2.2). Las cuencas sedimentarias en Bolivia toman los nombres de Cuenca Santa Cruz, Madre de Dios, Altiplano, Planicie de Beni y Bajo Pantanal. La cuenca Santa Cruz intersecta los territorios soberanos de los departamentos de Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, pero, también, de territorios soberanos del norte Paraguayo y Argentino. La cuenca de la Planicie de Beni intersecta territorios soberanos del departamento del Beni, Santa Cruz, Cochabamba y La Paz. La cuenca Madre de Dios intersecta territorios soberanos de los departamentos de Pando, Beni y La Paz, pero, también, de territorios soberanos del norte del Brasil y Amazonas del Perú. La cuenca del Altiplano intersecta territorios soberanos de los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí, pero, también, de

5 El ambiente deposicional se refiere a la naturaleza de la falla geológica y la relativa distancia de la cuenca sedimentaria con respecto a su placa tectónica.

6 Todas las cuencas sedimentarias son onshore pero solo algunas explotan hidrocarburos, otras son descubrimientos, filtraciones de hidrocarburos y otras son inciertas.

territorio soberano del sur Peruano. Por último, la cuenca de pantanal intersecta territorio soberano del departamento de Santa Cruz y territorio soberano del este del Brasil.

El departamento del Chuquisaca tiene el 77% de su territorio cubierto de cuencas sedimentarias, La Paz el 85%, Cochabamba el 65%, Oruro el 100%, Potosí el 66%, Tarija el 87%, Santa Cruz el 60%, Beni el 61% y Pando el 63%. De las cuencas sedimentarias mencionadas, solo la cuenca Santa Cruz se encuentra produciendo hidrocarburos. Las demás se encuentran exploradas e inciertas. Estos datos fueron recabados por información GIS de la base de Fugro Robertson Ltda. y GADM sobre los límites y superficie en polígonos de las unidades territoriales administrativas de Bolivia. Dado que no existe una convención sobre que tipo de cuenca sedimentaria tiene mayor probabilidad de encontrar hidrocarburos en sus sedimentos, Cassidy (2018) y De La Cruz (2018)⁷ encuentran por medio de una exploración espacial de datos a nivel mundial, que las cuencas convergentes continentales son las que mayor probabilidad de explotar hidrocarburos cuentan. Entonces, las cuencas sedimentarias encontradas en territorio soberano de cada departamento de Bolivia tiene una probabilidad alta de explotar hidrocarburos y minerales. Para la construcción de estas variables se tomó, por medio del sistema de coordenadas proyectadas por área cilíndrica equitativa y Mercator, los kilómetros cuadrados intersectados en espacio territorial soberano de cada departamento y municipio de Bolivia⁸ convertidas en términos per capita⁹ de la población del año 2000 para cada departamento.

METODOLOGÍA

A partir de esta sección, se describe la metodología empírica empleada para las estimaciones de los efectos de la riqueza de hidrocarburos y minerales en el crecimiento económico y comportamiento fiscal de los departamentos y municipios de Bolivia. A su vez, se describen las fuentes de datos que se incorporaron a los modelos econométricos propuestos.

a. Estrategia Empírica

El propósito del presente artículo es estimar los efectos de la riqueza de hidrocarburos, observado por producción neta y el flujo de recursos que captan los departamentos productores en términos de su producción por medio de las regalías, sobre el crecimiento económico medido en términos de la tasa de crecimiento del PIB real de cada departamento. A su vez, se tiene como segundo propósito, estimar los efectos de los flujos de regalías de hidrocarburos sobre el comportamiento fiscal de los departamentos productores y no productores medido por la inversión pública efectiva y tasa de tributación efectiva. Por último, para las anteriores dos estimaciones propuestas se incorporan los efectos de las regalías totales que reciben los departamentos del territorio boliviano, que incluyen las regalías mineras de los departamentos del occidente de Bolivia.

Dado que se cuenta con un panel de datos observado por departamento, la estrategia empírica es aplicar un modelo de panel de efectos fijos que permita eliminar las heterogeneidades de cada departamento y municipio. Esto, porque el supuesto de no correlación entre la presencia de factores no observados y la producción neta o regalías de hidrocarburos, no es plausible de cumplirse, es

7 En ambos artículos académicos explorando por muestras de 145 a 165 países se estima que una intersección de 1% más de kilómetro cuadrado de cuenca sedimentaria, se incrementa en 4 por ciento la producción de hidrocarburos.

8 Para consultar sobre las áreas intersectadas en municipios de Bolivia hacer llegar una solicitud.

9 Para evitar por problemas de endogeneidad por migración de aumentos de la población se convirtieron todas las variables geográficas en términos per capita antes del inicio de la muestra.

decir, $E(\tau_i | \text{regalias}_{i,t})^{10}$. Si consideramos solo el factor de la inversión extranjera directa que recibe cada departamento y que no es posible de observar en los datos, entonces, no controlar por esta variable sesgaría los resultados de las estimaciones propuestas, dado que la inversión extranjera directa se encuentra correlacionada con el crecimiento económico y el flujo de regalías que recibe cada departamento¹¹. La aproximación de efectos fijos *within* es una vía de las cuatro posibles para controlar por este problema de endogeneidad, y consiste en eliminar el efecto fijo del error compuesto restando a cada variable del modelo su media muestral. Entonces, todo elemento constante¹² en el tiempo desaparece, cuando se restan las observaciones de la misma unidad de análisis, Baltagi (2005).

Sin embargo, aún eliminando los factores constantes del error compuesto en el tiempo, aún se cuenta con problemas de endogeneidad por simultaneidad e incumplimiento de la exogeneidad estricta dada por la correlación rezagada del error compuesto y la producción y regalías de hidrocarburos, es decir, que $E(\epsilon_{i,t-1} | \text{regalias}_{i,t}) \neq 0$. Para controlar estos problemas, se propone instrumentalizar los efectos fijos por medio de las variables de cuencas sedimentarias introducidas por su interacción¹³ con dummy de tiempo. Para observar los efectos sobre el crecimiento económico la propuesta es:

Primera etapa

$$\overline{x}_{i,t} = \gamma_i + \pi' (\text{Cuencas}_i * \Gamma_t) + \phi \text{PIB}_{i,t-1} + \lambda_t' + \nu_{i,t}$$

Segunda etapa

$$\text{Crecimiento}_{i,t} = \sigma_i + \beta' \overline{x}_{i,t} + \Phi \text{PIB}_{i,t-1} + \Lambda_t' + \epsilon_{i,t}$$

Los subíndices i, t hacen referencia a las observaciones por departamentos y tiempo, respectivamente. La variable dependiente $\text{Crecimiento}_{i,t}$ es la tasa de crecimiento del PIB real; σ_i son los efectos fijos de los departamentos; Λ_t son los efectos fijos de tiempo mientras que la variable $\text{PIB}_{i,t-1}$ es el PIB per capita inicial que se incorpora para controlar por la convergencia condicional. Mientras que $\overline{x}_{i,t}$ es la variable predicha de la variable explicativa en la primera etapa. (La variable explicativa en algunas estimaciones es la producción neta de hidrocarburos y en otras son las regalías). Por último, $\text{Cuencas}_i * \Gamma_t$ es la interacción del conjunto de variables instrumentales por un vector Γ_t de *dummies* de tiempo.

Para observar los efectos sobre el comportamiento fiscal la propuesta es

Primera etapa

$$\overline{\text{regalias}}_{i,t} = \gamma_i + \pi' (\text{Cuencas}_i * \Gamma_t) + \phi \text{PIB}_{i,t-1} + \lambda_t' + \nu_{i,t}$$

10 El subíndice i hace referencia a las observaciones por departamento y municipio, y t al tiempo de observación.

11 Van der Ploeg y Poelhekke (2012) demuestran empíricamente como la inversión extranjera directa se encuentra correlacionada con el crecimiento económico, y los flujos de recursos fiscales que generan los sectores extractivos.

12 El hecho de tratar al término de la heterogeneidad del error constante se debe a que siempre se observa en el tiempo, dado que no es aleatoria. Esto es frecuente con las observaciones en panel y de datos longitudinales.

13 La idea de interactuar las variables de cuencas con las dummy de tiempo es para evitar que por el efecto fijo se eliminen, dado que estas variables geográficas no cambian en el tiempo.

Segunda etapa

$$y_{i,t} = \sigma_i + \beta' \overline{regalias_{i,t}} + \Phi PIB_{i,t-1} + \Lambda_t' + \epsilon_{i,t}$$

Donde la variable explicativa son las regalías per capita recibidas por los departamentos productores de hidrocarburos. En otros casos, se estiman empleando la totalidad de las regalías que incorporan las regalías mineras. El predicho de esta variable en la segunda etapa se estima respecto a las variables de respuesta como la inversión efectiva, en algunas ocasiones, y tasa de tributación efectiva, en otras. Nuevamente, las estimaciones controlan por dummy de tiempo y el PIB per capita inicial¹⁴ de cada departamento.

b. Descripción de Datos

Los datos seleccionados para observar el crecimiento económico por departamento proviene de las fuentes oficiales del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE). Se cuenta con observaciones desde 1989 al año 2018, tanto para el PIB a precios constantes de 1990, como para la tasa de crecimiento del PIB real. Los datos de población por departamento provienen también de los cálculos del INE sobre las imputaciones¹⁵ de la tasa de crecimiento poblacional de Bolivia por departamentos desde el año 2000 al 2016. Los datos sobre las cuencas sedimentarias provienen de la base de datos GIS de Fugro Robertson (2013) que cuenta con información de 864 cuencas sedimentarias esparcidas por el planeta. La base de datos sobre los límites de superficie territorial de cada departamento y municipio de Bolivia, proviene de la base GIS de GADM (2015). Las variables geográficas fueron transformadas en términos per capita del año 2000.

Para las variables de inversión y tributación efectiva, se reunió información oficial del INE respecto a la inversión ejecutada y recaudación tributaria por departamento. Para la primera variable, se cuenta con información desde el año 2000 hasta el año 2016 sobre las inversiones públicas ejecutadas por los municipios y gobiernos locales agregados por departamento, en millones de dólares estadounidenses. Estos valores fueron convertidos, según el tipo de cambio oficial, en promedio para cada año, y luego deflactados¹⁶ en moneda nacional a precios constantes usando el deflactor del PIB real de cada departamento por año. Para las recaudaciones tributarias por departamento se consideraron solo las del mercado interno, no así las aduaneras (año 2004 al 2016) observados en millones de bolivianos. Estos valores, también, se los convierte a precios constantes usando el deflactor del PIB de cada departamento. Ambas variables fueron divididas por el PIB real de cada departamento. para obtener una tasa de inversión y tributación efectiva por producción e ingreso de cada departamento.

Las regalías y transferencias totales fueron recabadas de fuentes oficiales del INE para observaciones desde el año 1996 al 2016, por departamento, en millones de bolivianos. Estos valores fueron convertidos a precios constantes considerando el deflactor de cada departamento. Las regalías de hidrocarburos fueron obtenidas de las memorias del Ministerio de Hidrocarburos de Bolivia para observaciones desde el año 2005 al 2018, en millones de dólares estadounidenses. Estos valores fueron convertidos

14 Son los rezagos del PIB per capita de cada año para todos los departamentos, y permiten controlar por la convergencia condicional del crecimiento, la inversión y tributación efectiva.

15 Las imputaciones para observar la población por departamentos toma en cuenta regresiones sobre la tasa de natalidad y mortalidad para cada departamento con los datos censales correspondientes.

16 El año base fue de 1990 considerando que eran las únicas medidas que se contaban para observar el deflactor del PIB por departamento en Bolivia.

en moneda nacional al tipo de cambio oficial promedio para cada año y, luego, convertidos a precios constantes con los valores del deflactor del PIB real de cada departamento. Por último, los datos sobre producción de hidrocarburos neta y bruta fueron obtenidos de fuentes oficiales del INE y de algunas memorias del Ministerio de Hidrocarburos. Los datos cuentan con información sobre producción por pozo en cada departamento productor en miles de pies cúbicos desde el año 2007 al 2016. Estos valores fueron convertidos en términos per capita¹⁷ de la población de cada departamento por año (anexo 1, Tabla A1.1) presenta las estadísticas descriptivas para estas variables.

RESULTADOS

Se presentan los resultados de las estimaciones empíricas propuestas bajo los modelos econométricos de efectos fijos instrumentados. Pero, también, se presenta una descripción del comportamiento de las principales variables de resultado según sean los departamentos productores o no productores de hidrocarburos. En lo que respecta al crecimiento económico, se evidencia que los departamentos productores¹⁸, desde finales de los años 90, crecieron más en promedio que los departamentos no productores, aunque, a principios del 2000, sus tasas de crecimiento se estancaron y cayeron estrepitosamente. Coincidentemente, durante esos años, la economía nacional entró en una recesión y convulsión social que no permitió el desarrollo normal de las operaciones de las empresas petroleras en territorio Boliviano. Se verifica esta evolución (Figura A.3), aunque, a principios del año 2005, las tasas de crecimiento del PIB real se incrementan significativamente, pero, vuelven a experimentar una caída constante hasta el año 2008 cuando aún los precios internacionales del petróleo eran altos. Durante esos periodos, la economía boliviana experimentó una apreciación real motivada no solo por la expansión del sector de hidrocarburos sino también de las actividades mineras. Esto explica el repunte, durante esos periodos, del crecimiento de los departamentos no productores de hidrocarburos, pero, que son economías altamente mineras¹⁹. Desde los años 2009 al 2013, las economías de los departamentos productores crecieron más en promedio respecto a los departamentos no productores (anexo 1 Tabla A1.2), muestra esta evidencia con la diferencia de medias realizadas para los departamentos productores y no productores). En promedio, los departamentos productores, entre los años 1989 al 2018, crecieron a tasas del 4,8% mientras que, los departamentos no productores, crecieron a tasas del 4,7%, sin encontrar diferencias estadísticamente significativas.

La evolución de la inversión efectiva muestra que, en promedio, entre años 2000 al 2016, departamentos y municipios productores de hidrocarburos han invertido menos en porcentaje de su PIB real que los departamentos no productores. La diferencia entre estos dos niveles de inversión efectiva son estadísticamente significativas al 1% (anexo 1 Tabla A1.2). En la misma tabla, no se muestran diferencias estadísticamente significativas para la evolución de las tasas de tributación efectiva y las regalías totales. Sin embargo, la tasa de tributación efectiva tiene una relación negativa respecto al incremento marginal de las regalías por hidrocarburos que reciben los departamentos productores (anexo 2 Figura A2.5). Esto corrobora, al menos, descriptivamente, la hipótesis de la pereza fiscal que enfrentan instituciones políticas altamente rentistas.

17 Se convierte la producción en términos per capita para evitar la endogeneidad de la migración y población sobre el crecimiento económico y comportamiento fiscal.

18 Los departamentos productores de hidrocarburos son: Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija.

19 Con excepción de los departamentos del Beni y Pando, aunque estos departamentos reciben regalías por la producción de hidrocarburos y pueden mostrar un repunte del gasto público en dichos departamentos durante el 2009-2010.

a. Efectos sobre crecimiento económico

Los resultados de las estimaciones propuestas en la identificación estratégica permiten afirmar que la riqueza de recursos de hidrocarburos, en términos de producción y de flujos de recursos fiscales que se recaudan, generan un crecimiento económico mayor de municipios y departamentos productores. Esto se corrobora con mayor robustez considerando el flujo de los recursos fiscales de sectores extractivos como la minería y el gas natural. Entonces, se descarta la hipótesis de la maldición de los recursos, al menos, para explicar el crecimiento económico (Tabla 1).

Se considera las tres variables explicativas que se tomaron en cuenta. Los resultados de la primera, cuarta y sexta columna de la tabla 1, toman en cuenta sólo la aproximación por efectos fijos. Solo cambian las variables explicativas a considerar. Las primeras tres columnas toman como variable explicativa al logaritmo de las regalías por hidrocarburos per capita de cada departamento. Se observa que, a medida que se instrumenta, el modelo se ajusta mejor (según se puede observar en el estadístico de Wald), aunque para las tres columnas no se encuentra significancia estadística. Cabe aclarar que, los intervalos de confianza, son cada vez más estrechos al 95% de confianza a medida que instrumenta. En particular, un incremento de un 1% de la regalía por cada 1.000 habitantes, recibida de los gobiernos locales, aumenta el crecimiento económico en promedio en un 0,1% por año. Esta magnitud se incrementa a 0,8% si se controlan algunas variables proxy de calidad institucional²⁰. Aunque solo se considera una opción para esta variable, se ve que al incorporarla al modelo, los intervalos de confianza aumentan junto con los errores estándar. De tal forma que no fueron consideradas para las siguientes estimaciones aunque se considera que deben incluirse con otros controles adicionales.

Las columnas 4 y 5 consideran las estimaciones respecto a la variable explicativa de producción neta per capita transformada en logaritmos. Se observa que al instrumentalizar los efectos fijos se obtiene una magnitud sobre la tasa de crecimiento alta, que muestra significancia estadística al 10%. Sin embargo, de igual forma que las anteriores estimaciones respecto a las regalías de hidrocarburos, estas no son robustas y los intervalos de confianza al 95% corroboran esta situación. La interpretación de la magnitud de dicho coeficiente muestra que un incremento de un 1% de la producción promedio neta de gas natural por cada 1.000 habitantes, incrementa en 30% la tasa de crecimiento del PIB real de los departamentos productores. Una posible explicación para encontrar una magnitud tan alta respecto a las anteriores estimaciones es que, al considerar sólo la producción neta de hidrocarburos, no se consideramos a departamentos no productores que reciben ingresos fiscales de sus regalías. Entonces, en departamentos con sectores industriales más desarrollados, se evidencia los encadenamientos positivos que un auge de este recurso genera sobre sus economías industriales locales.

Por último, las columnas 6 y 7, consideran las estimaciones realizadas respecto a la variable explicativa de regalías totales y transferencias recibidas por la explotación de recursos minerales y de hidrocarburos. Se evidencia que existe un efecto robusto sobre el incremento del crecimiento económico ante un aumento marginal de las regalías totales recibidas, que son estadísticamente significativas al 1% y 5%, respectivamente, para las aproximaciones efectos fijos bajos y efectos fijos instrumentados.

20 La variable proxy considerada de calidad institucional, fue obtenida por medio de los residuales de una regresión de efecto fijo entre las recaudaciones tributarias per capita con respecto a el PIB per capita departamental.

Tabla 1. Estimaciones de los Efectos sobre el Crecimiento Económico Departamental

	EF (1)	EF-VI (2)	EF-VI (3)	EF (4)	EF-VI (5)	EF (6)	EF-VI (7)
Log regalías per capita	1,786 (2,219)	0,101 (1,049)	0,831 (1,157)				
Intervalo de confianza (95%)	[-3,330;6,903]	[-1,956;2,157]	[-1,437;3,100]				
Log de producción neta per capita				5,129 (3,458)	30,46* (15,78)		
Intervalo de confianza (95%)				[-2,844;13,103]	[-0,471;61,393]		
Log regalías y transferencias per capita						1,656*** (0,406)	1,000** (0,458)
Intervalo de confianza (95%)						[0,719;2,592]	[0,103;1,898]
Control institucional			0,000236 (0,00795)				
Estadístico F	1,88			1,97		9,75	
Estadístico Wald		8,78	17,31		17,15		26,77
ρ	0,543	0,488	0,547	0,852	0,991	0,568	0,521
Constante	9,379 (6,126)	14,38*** (5,148)	13,51*** (4,790)	7,916 (4,337)	-23,91 (32,16)	4,910** (1,574)	7,151*** (2,432)
Observaciones	126	126	108	90	90	144	144
R-cuadrado within	0,144	0,125	0,151	0,132	0,002	0,266	0,239
Número de departamentos	9	9	9	9	9	9	9

Errores estándar en parentesis.

*** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados estimados.

Nota: Las estimaciones por efectos fijos (EF) y efectos fijos instrumentados (EF-VI) toman en cuenta los controles de efectos fijos de tiempo y del PIB per capita inicial de cada departamento. Las variables explicativas de regalías per capita, producción per capita y regalías totales per capita se encuentran en logaritmos de la forma $\log(x + 1)$ para considerar a los departamentos no productores. La tercera columna toma en cuenta la variable proxy de control institucional, que se obtuvo por medio de los residuales de una regresión adicional entre las recaudaciones tributarias y el PIB per capita departamental.

En particular, se observa que un incremento de un 1% de las regalías totales recibidas por los municipios y departamentos mineros y petroleros, repercute en que las tasas de crecimiento del PIB real de los departamentos, en promedio, se incrementen en 1%. El estadístico de Wald corrobora su significancia global del modelo al igual que la heterogeneidad de cada departamento y municipio se encuentra explicada en un 52% del error compuesto, cifra menor al de las anteriores estimaciones. Estos resultados sugieren que existen efectos heterogéneos importantes a considerar entre departamentos y municipios mineros respecto de los petroleros. Una alternativa que es necesaria considerar es contar con las medidas del PIB minero y petrolero por departamento, para estimar y controlar por dichas diferencias.

b. Efectos sobre el Comportamiento Fiscal

Los resultados de las estimaciones propuestas en la identificación estratégica permiten afirmar que los flujos de recursos fiscales recaudados por la producción de hidrocarburos generan reducciones de inversiones y tributación efectiva de municipios y departamentos productores. Sin embargo, si se considera al flujo de los recursos fiscales de los sectores extractivos como la minería y el gas natural, los efectos son positivos pero cercanos a cero. Se halla aquí evidencia de la hipótesis de la maldición de los recursos con respecto al manejo fiscal de los recursos que se recaudan. Los resultados consideran dos variables explicativas que se toman en cuenta como son las regalías por hidrocarburos y las regalías totales de las actividades mineras y petroleras (Tabla 2).

Las columnas 1 al 4, consideran las estimaciones para las variables de respuesta de la inversión efectiva, medida respecto a la inversión pública ejecutada como porcentaje del PIB real de cada departamento. Se toman en cuenta tanto estimaciones por efectos fijos y en efectos fijos instrumentados por las cuencas sedimentarias. En particular, se observa que los efectos fijos son estadísticamente significativos al 10% aunque no son robustos, ya que cuando se instrumenta por cuencas sedimentarias, los errores estándar se incrementan, que se constata en los intervalos de confianza al 95%. Sin embargo, los intervalos son estrechos y sus magnitudes indican que un incremento de un 1% de las regalías recaudadas por la producción de gas natural, por cada 1.000 habitantes, reduce en promedio, la inversión ejecutada en 0,025% del PIB real de cada departamento con mayor superficie de cuenca sedimentaria intersectada en su territorio soberano. Sin embargo, se consideran regalías totales y transferencias por la producción de minerales e hidrocarburos, los efectos sobre la inversión efectiva son positivos y estadísticamente significativos al 1% mostrando un resultado robusto mayor, observado por el valor de su estadístico de Wald del modelo y su heterogeneidad controlada y expresada en 53,6% del error compuesto. Estos resultados, al igual que en el caso del crecimiento económico, sugieren que existen heterogeneidades no consideradas entre los grupos de departamentos y de municipios mineros que llevan a una aprovechamiento mayor de los recursos fiscales respecto a los departamentos y municipios petroleros.

Las columnas 5 al 8, consideran las estimaciones de las regalías de la producción de gas natural y las totales respecto a la variable de respuesta de tributación efectiva. Para construir esta variable, se toma en cuenta las recaudaciones del mercado interno para cada municipio y departamento, en porcentaje del PIB real de cada departamento. Se observa que si se toma nuevamente en cuenta sólo las regalías por la producción de gas natural, los efectos en este caso sobre la tributación efectiva, es una reducción en términos del porcentaje del PIB real. Aunque no se observa evidencia estadísticamente significativa, dados los intervalos de confianza altos, que se refleja en niveles de estadísticos bajos de Wald y niveles altos de heterogeneidad en el error compuesto.

Tabla 2. Estimaciones de los Efectos sobre el Comportamiento Fiscal Departamental y Municipal

	EF (1)	EF-VI (2)	EF (3)	EF-VI (4)	EF (5)	EF-VI (6)	EF (7)	EF-VI (8)
	Tasa de Inversión Efectiva			Tasa de Tributación Efectiva				
Log regalías per capita	-0,0416* (0,0199)	-0,0249 (0,0200)			-0,00634 (0,00564)	-3,04e-05 (0,00479)		
Intervalo de confianza (95%)	[-0,087;0,004]				[-0,019;0,007]		[-0,009;0,009]	
Log regalías y transferencias per capita			0,0146** (0,00543)	0,0265*** (0,00677)			0,00443 (0,00259)	0,00292 (0,00274)
Intervalo de confianza (95%)			[0,002;0,027]		[0,013;0,040]		[-0,001;0,010]	
Estadístico F	5,59		7,92		2,47		4,18	
Estadístico Wald		2,42		24,51		0,02		1,41
ρ	0,852	0,789	0,536	0,449	0,882	0,903	0,899	0,897
Constante	0,137* (0,0688)	0,0908 (0,0589)	0,0274 (0,0264)	-0,0130 (0,0214)	0,0226 (0,0455)	0,00512 (0,0455)	-0,00269 (0,0299)	0,00442 (0,0354)
Observaciones	108	108	144	144	108	108	117	117
R-cuadrado within	0,134	0,126	0,121	0,068	0,151	0,144	0,127	0,126
Numero de departamentos	9	9	9	9	9	9	9	9

Errores estándar en paréntesis
*** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados estimados

Nota: Las estimaciones por efectos fijos (EF) y efectos fijos instrumentados (EF-VI) toman en cuenta los controles de efectos fijos de tiempo y del PIB per capita inicial de cada departamento. Las variables explicativas de regalías per capita y regalías totales per capita se encuentran en logaritmos de la forma $\log(x + 1)$ para considerar a los departamentos no productores.

En particular, para un aumento de un 1% en las recaudaciones recibidas en promedio por departamentos y municipios productores de gas natural, la tributación en el mercado interno en estos municipios y departamentos se reduce en 0,03% del PIB real de estos departamentos en promedio, para los departamentos con mayor superficie intersectada de cuencas sedimentarias en sus territorios soberanos. Si se considera la totalidad de regalías mineras y petroleras recaudadas, se observa un escenario diferente. En particular, las magnitudes se incrementan, pero, no hay evidencia de significancia estadística, aunque sus intervalos de confianza al 95% se encuentran estrechos. En particular, se observa incrementos de la tributación recaudada como porcentaje del PIB real de cada departamento aunque sus magnitudes se mantienen cerca de cero. Estos resultados muestran la necesidad de considerar las heterogeneidades de los departamentos mineros respecto a los petroleros. Al parecer, en los primeros, deben tener capacidad administrativa mayor para ejecutar dichos recursos, o deben tener alguna otra clase de instituciones sociales y políticas que mantengan a sus gobiernos locales controlados y regulados.

CONCLUSIONES

Se estiman los efectos de la riqueza de hidrocarburos y minerales sobre el crecimiento económico y el comportamiento fiscal de departamentos y municipios productores de estos recursos no renovables. En particular, se encuentra que las regalías recaudadas por la producción de gas natural incrementan las tasas de crecimiento del PIB real de los departamentos productores, pero, esas diferencias no son estadísticamente significativas respecto a los departamentos y municipios no productores de gas natural. Sin embargo, cuando se considera solo las actividades de producción por cada 1.000 habitantes, se encuentra que las tasas de crecimiento de los departamentos productores de gas natural crecen significativamente a tasas más altas respecto a departamentos y municipios no productores. Dado que durante los años 2005-2009, los precios internacionales de minerales y de hidrocarburos subieron considerablemente, se encuentra que si se consideran los recursos fiscales provenientes de todas las regalías, en especial, de las actividades mineras, el crecimiento económico de los departamentos productores crecen a tasas estadísticamente significativas.

En lo que respecta al comportamiento fiscal de departamentos y municipios de Bolivia, se encuentra que departamentos y municipios receptores de regalías por la producción de gas natural, reducen sus tasas de inversión pública ejecutada en porcentajes de su PIB real respecto a departamentos y municipios no productores. Estas estimaciones no son robustas pero confirman la teoría de la pereza fiscal de gobiernos locales con niveles de capacidad gubernamental bajos. Si se consideran las regalías mineras percibidas por departamentos y municipios del occidente de Bolivia, se encuentra que las tasas de inversión pública efectiva, en porcentajes de su PIB real, se incrementa más respecto a departamentos y municipios no productores. Estos resultados confirman una heterogeneidad que aún no se considera en los planteamientos del modelo y que podría traer mejores explicaciones de los canales por los cuales la riqueza de los recursos naturales pueden ser consideradas una bendición para sus economías.

REFERENCIAS

- Abubakr, R., Lean, H. and Clark, J. (2016). The evolution of a natural resource thesis. *Resources Policy*, 51, pp.123-134.
- Alkott, H. and Keniston, D. (2014). Dutch disease or agglomeration? *The Review of Economic Studies*, 85(2), pp.695-731.
- Cassidy, T. (2018). The Long Run Effects of Oil Wealth on Development: Evidence from Petroleum Geology.
- Corden, W., and Neary, J. (1982). Booming Sector and De-Industrialisation in a Small Open Economy. *The Economic Journal*, 92, pp.825-848.
- Corden, W. (1984). Booming Sector and Dutch Disease Economics: Survey and Consolidation. *Oxford Economics Papers*, 36, pp.359-380.
- Costa, H. and Dos Santos, E. (2013). Institutional Analysis and The Resource Curse in Developing Countries. *Energy Policy*, 63, pp.788-795.
- Erle, S. and Gilles, S. (2013). World Borders Database, version 0.3.
Recuperado de <http://thematicmapping.org>, accessed February 2018.
- Fundación Jubileo (2012). Análisis de Ingresos por Regalías y Participaciones Hidrocarburíferas. La Paz, Bolivia.
- Fugro Robertson, Ltd.(2013). Fugro Tellus Sedimentary Basins of the World Map.
Recuperado de <http://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/global-framework/robertson-tellus-sedimentary-basins-of-the-world-map>.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). Recuperado de <https://www.ine.gob.bo/index.php>.
- Mehlum, H., Moene, K., and Torvik, R. (2006). Institutions and The Resource Curse. *The Economic Journal*, 116, pp.1-20.
- Ministerio de Hidrocarburos de Bolivia.
Recuperado de <http://www.hidrocarburos.gob.bo>.
- Perry, G., and Olivera, M. (2010). El Impacto del Petróleo y la Minería en el Desarrollo Regional y Local en Colombia. Centro de Investigación Económica y Social, FEDESAR- ROLLO. No.51 Bogotá, Colombia.
- Sachs, J., and Warner, A. (1999). The big push, natural resource booms and growth. *Journal of Development Economics*, 59, pp.43-76.
- Sovacool, B., Walter, G., Van Der Graaf, T., and Andrews, N. (2016). Energy Governance, Transnational Rules, and The Resource Curse: Exploring The Effectiveness of The Extractive Industries Transparency Initiative. *World Development*, 82, pp.179-192.
- Wooldridge, J. (2002). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. Cambridge, Estados Unidos: The MIT Press.

ANEXOS

Se tiene:

Anexo 1. Tablas

Tabla A1.1. Estadísticas Descriptivas

	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Obs
Tasa de crecimiento PIB real	4,137	4,254	25,42	-7,06	270
Tasa de inversión pública efectiva	0,128	0,080	0,490	0,033	153
Tasa de recaudación tributaria efectiva	0,066	0,060	0,214	0,006	117
Cuencas sedimentarias en Km2 per capita	0,194	0,225	0,768	0,025	279
Log de regalías por hidrocarburos	3,067	2,367	6,930	0	126
Log de producción neta de hidrocarburos	1,970	2,419	6,927	0	90
Log de regalías y transferencias totales	5,437	1,473	7,554	0,074	153
PIB per capita inicial	3.334,42	1.345,15	8.745,09	1.515,12	162
Log de producción bruta de hidrocarburos	1,991	2,433	6,933	0	90

Fuente: Elaboración propia en base a los datos recabados.

Nota: Las variables de tasa de inversión y tributación efectiva son las variables de inversión pública y recaudación tributaria en porcentajes del PIB real de cada departamento. La variable de cuenca sedimentaria fue convertida en términos de kilómetros cuadrados per capita con la población por departamento del año 2000, antes del año del comienzo de las estimaciones. Las variables de regalías, producción y regalías totales fueron convertidas en términos per capita por cada año de la población departamental y transformadas en logaritmos de la forma $\log(x + 1)$ para evitar variables no observables en los departamentos y municipios no productores. El PIB per capita inicial corresponde a rezagos de un periodo del PIB real departamental.

Tabla A1.2. Prueba de Medias

	Productores	No Productores	Diferencias	Estadístico t	Valores P
Tasa de crecimiento PIB real	4,874	4,672	-0,202	-0,231	0,818
Tasa de inversión pública efectiva	0,108	0,178	0,070***	4,049	0,000
Tasa de recaudación tributaria efectiva	0,072	0,067	-0,005	-0,378	0,707
Log de regalías y transferencias totales	6,175	6,316	0,141	1,086	0,280
Cuencas sedimentarias en Km2	84.024,41	87.423,12	3.398,71	0,265	0,791
Observaciones	40	50			

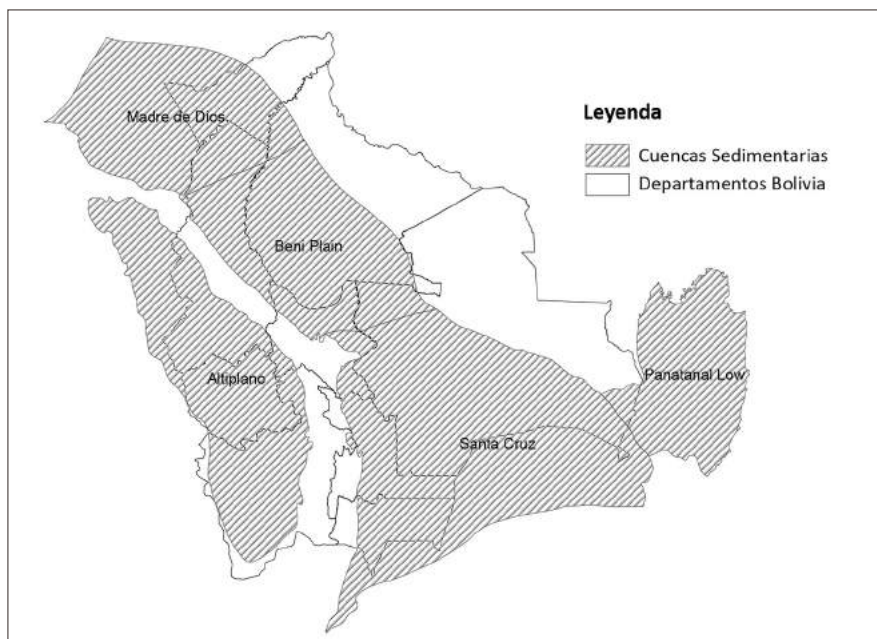
*** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$

Fuente: Elaboración propia en base a las estimaciones realizadas.

Nota: Las estimaciones de diferencias de medias, se realizaron promediando los años 2007 al 2016. La diferencia se construyó respecto a los departamentos productores de gas natural, y los no productores de gas natural. La diferencia de media de la tasa de crecimiento del PIB real departamental, no refleja diferencias estadísticamente significativas, pero, dice que los departamentos productores crecieron en promedio más respecto a los departamentos no productores. La inversión pública efectiva fue la única estimación estadísticamente significativa al 1%. Su magnitud dice que los departamentos productores ejecutaron menos inversión pública respecto a la totalidad de sus ingresos comparado con los departamentos no productores que invirtieron más. En cuanto a la tasa de tributación efectiva, las diferencias muestran que, en promedio, departamentos y municipios productores recaudaron más impuestos del mercado interno, pero, sus diferencias no son significativas. Mismo escenario respecto a la totalidad de regalías percibidas por ambos departamentos y municipios productores y no productores. Por último, departamentos y municipios productores tienen menor cantidad de cuencas sedimentarias intersectadas en sus territorios soberanos respecto a los departamentos y municipios no productores, aunque esa diferencia no es estadísticamente significativa.

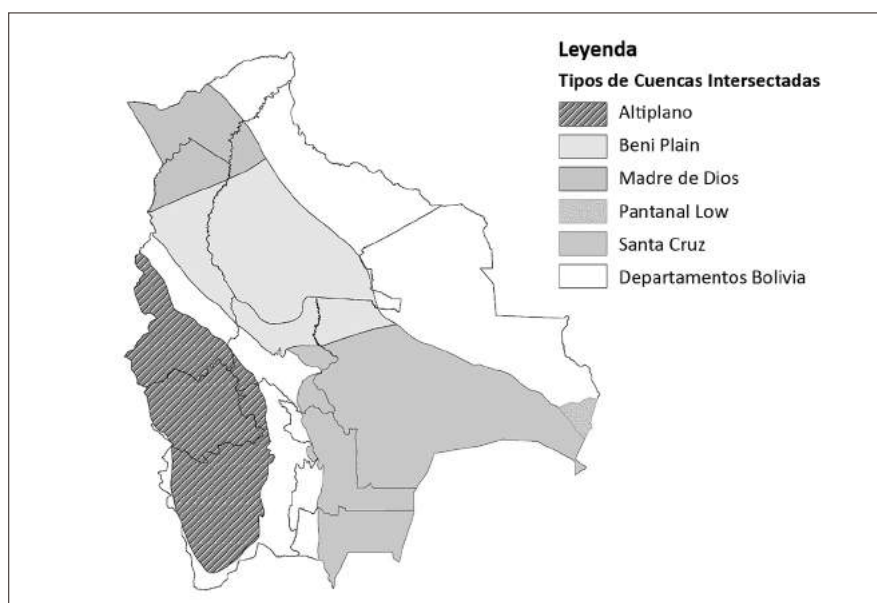
Anexo 2. Gráficos

Figura A2.1. Cuencas sedimentarias en territorio Boliviano



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de Fugro Robertson (2017) y GADM (2015).

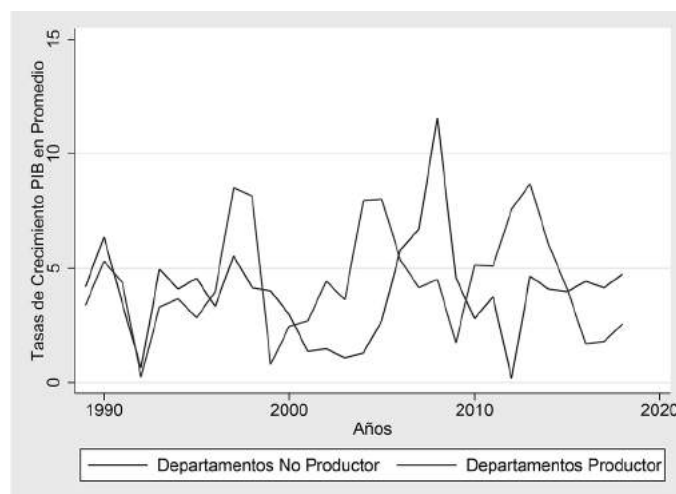
Figura A2.2. Cuencas sedimentarias intersectadas en territorio Boliviano



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de Fugro Robertson (2017) y GADM (2015).

Nota: En territorio Boliviano, los tipos de cuencas sedimentarias con excepción de la cuenca pantanal bajo, son convergentes-continuales e intracratónica. Estos tipos de cuencas sedimentarias se caracterizan por formarse en las fallas geológicas de montaña y choque de placas tectónicas.

Figura A2.3. **Serie de tiempo de crecimiento económico por tipos de departamentos**

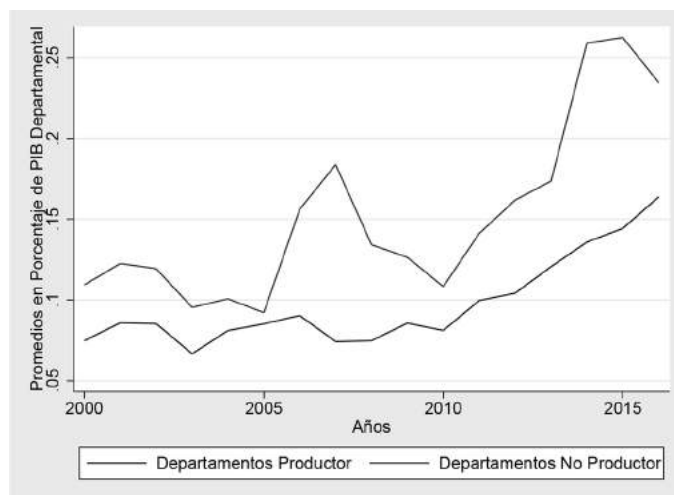


Fuente: Elaboración propia.

Datos: INE.

Nota: La producción hace referencia a los departamentos productores de gas natural, Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija. Los restantes departamentos son no productores de gas natural, aunque hay departamentos como Beni y Pando que reciben regalías por producción de gas natural por compensación. Las tasas de crecimiento para estos grupos de departamentos fueron promediadas desde el año 1989 al 2018. Las tasas de crecimiento económico de departamentos productores muestran que siguen la misma dirección de los movimientos de los precios internacionales del petróleo. Los últimos años los departamentos productores, en promedio, han decrecido y algunos departamentos han entrado en recesión económica, como es el caso de Tarija.

Figura A2.4. **Serie de tiempo de tasa de inversión pública efectiva por tipos de departamentos**

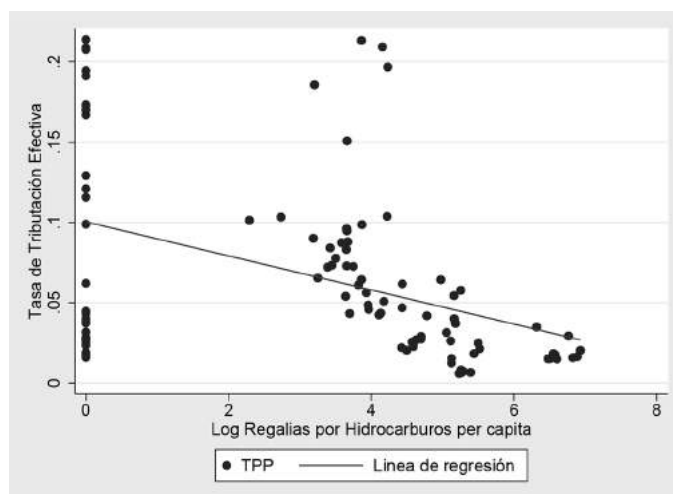


Fuente: Elaboración propia.

Datos: INE.

Nota: La tasa de inversión pública efectiva es la tasa de inversión pública ejecutada de cada gobierno municipal y departamental en porcentajes del PIB real de cada departamento. La producción hace referencia a los departamentos productores de gas natural, Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija. Los restantes departamentos son no productores de gas natural, aunque hay departamentos como Beni y Pando que reciben regalías por producción de gas natural por compensación. Las tasas de inversión pública efectiva para estos grupos de departamentos fueron promediadas desde el año 2000 al 2016. Las tasas de inversión pública efectiva de los departamentos productores en promedio muestran que son inferiores para todos los años respecto a los departamentos no productores.

Figura A2.5. Dispersión de la tasa de tributación efectiva respecto a las regalías petroleras

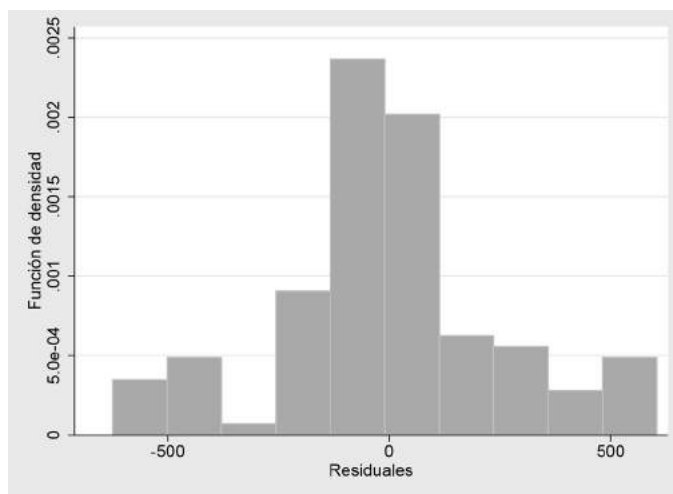


Fuente: Elaboración propia.

Datos: INE.

Nota: La tasa de tributación efectiva son las recaudaciones tributarias del mercado interno por municipio agregadas por departamento en porcentajes del PIB real de cada departamento. El periodo de observación va desde el año 2004 al 2016. Las regalías se encuentran de forma per capita por población departamental para cada año de observación y en logaritmos. La línea de regresión evidencia una relación negativa, entre mayor sean los valores de las regalías recibidas menor es la tasa de tributación recaudada en términos de los ingresos totales de los departamentos que reciben las regalías petroleras.

Figura A2.6. Histograma de la proxy de control institucional



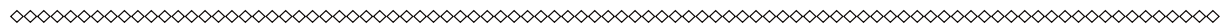
Fuente: Elaboración propia.

Datos: Regresión estimada.

Nota: La variable proxy estimada de control institucional fue obtenida de una regresión adicional por efectos fijos entre las recaudaciones tributarias del mercado interno de cada municipio agregadas por departamentos de forma per capita respecto al PIB per capita departamental. El histograma muestra que los residuales siguen por construcción una distribución normal, aunque, en las estimaciones de crecimiento económico introducirla generaba mayor incremento de los errores estándar. Una vía que es posible controlar es adicionando nuevas proxy, que tomen en cuenta el cociente entre recaudaciones tributarias e ingresos corrientes por municipio.

USO DEL GLP COMO COMBUSTIBLE AUTOMOTOR EN BOLIVIA¹

Peña Galarza, Heberto Hernan²; Ehrenfeld Rodas, Ian³; Mercado Pinto, Daniel³ y Pacheco Topikha, Mikhael Humberto³



RESUMEN

Bolivia tiene déficit en la producción de gasolina automotor desde el año 2009, requiriendo cada año, mayores volúmenes de importación para abastecer la demanda nacional, la cual crece en función del crecimiento del parque automotor, especialmente, de vehículos a gasolina.

Para compensar el déficit de producción de gasolina automotor, se autorizó el uso de etanol anhidro en las mezclas de gasolina automotor, pero esta solución no es suficiente para sustituir los crecientes volúmenes de gasolina importada.

A nivel mundial se tienen varias opciones de combustibles: Gasolina Automotriz, Gas Natural Comprimido (GNV), Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Bolivia tiene excedentes de producción GLP. La producción abastece al mercado interno y los excedentes son exportados a los países vecinos desde el año 2013.

La demanda de GLP en el mercado nacional, para el año 2018 fue de 1.235 TMD y la producción en las refinerías y plantas de separación de líquidos alcanzó 1.516 TMD, registrándose un volumen exportable de 281TMD.

El GLP, representa un excelente combustible alternativo a la gasolina por su costo bajo, producción excedentes, combustión limpia, menores emisiones contaminantes y la existencia de sistemas de almacenaje, transporte y distribución de éste.

¹ Programa UPSA Horizonte 2034.

² Docente UPSA, Miembro del Consejo de Investigaciones ANCB-SC.

³ Estudiante de la carrera de Ingeniería de Petróleo y Gas Natural, UPSA.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de los excedentes de producción de GLP como sustituto de la gasolina importada. La sustitución de un porcentaje de la gasolina importada por GLP permitirá mejorar el abastecimiento de combustibles, evitará la fuga de divisas y disminuirá la subvención estatal a los combustibles.

Palabras Claves:

GLP, GNV, GLP Automotor, Gasolinas automotor, Vehículos, Conversión de vehículos de gasolina a GLP, Normativa, Estaciones de servicio.

ABSTRACT

Bolivia has an automotive gasoline production deficit since 2009, requiring each year, higher volumes of gasoline imports to supply national demand, which grows as a function of the automotive fleet growth, especially gasoline vehicles.

To compensate for the deficit in automotive gasoline production, the use of anhydrous ethanol was authorized in automotive gasoline blends, but this solution is not enough to replace the growing volumes of imported gasoline.

Worldwide there are several fuel options such as Automotive Gasoline, Compressed Na (NGV), and Liquefied Petroleum Gas (LPG).

Bolivia has a LPG production surplus since 2013 that has not only covered the domestic market but gave the option to export it to neighboring countries.

The 2018s LPG domestic market demand was 1.235 TMD and the refineries and liquid separation plants production reached 1.516 TMD, registering an exportable volume of 281 TMD.

LPG represents an excellent fuel option to gasoline due to its low cost, production surpluses, clean combustion, lower polluting emissions and the existence of storage, transportation, and distribution systems.

The objective of this work is to evaluate the use of the LPG production surplus as a substitute for imported gasoline. The LPG substitution of a percentage of the imported gasoline will improve the supply of fuels, avoid the flight of foreign exchange and reduce the state subsidy for fuels.

Keywords

LPG, NGV, Automotive LPG, Automotive gasoline, Vehicles, Gasoline to LPG vehicles conversion, Regulations, Service station.

INTRODUCCIÓN

Se definen:

Objetivo General

Evaluar la viabilidad de uso de combustible GLP en automotores convencionales (a gasolina) en todo el territorio boliviano.

Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo propuesto se requiere revisar y evaluar información sobre:

- Producción y demanda de gasolina automotor en el mercado nacional y determinar requerimiento de importación.
- Producción y demanda de GLP en el mercado nacional y determinar excedentes de producción de GLP.
- Especificaciones de GLP para uso como combustible automotor.
- Normas y reglamentos para la conversión de vehículos de gasolina a GLP.
- Normas y reglamentos para la instalación de estaciones de servicio de GLP.
- Normas de seguridad para el uso de GLP como combustible automotor.
- Tecnologías de conversión (cilindro y kit de conversión) de vehículos de gasolina a GLP.
- Tabla comparativa de las emisiones del dióxido de carbono entre el GLP y la gasolina automotor.
- Aspectos económicos de la utilización GLP como combustible automotor.
- Viabilidad legal de introducir el GLP como combustible automotor.
- Impacto social del uso de GLP en automotores.
- Análisis FODA de la conversión de vehículos de gasolina a GLP.

Alcance del Proyecto

Este estudio se limita a estudiar la viabilidad, técnico, económica, medioambiental, legal y social de la conversión de vehículos de gasolina a GLP, considerando la disponibilidad de volúmenes excedentes de GLP que se están exportando y que los mismos podrían ser utilizados como combustible automotor para cubrir parte del déficit de producción de gasolinas en las refinerías de Bolivia.

El estudio se realiza con la colaboración de los estudiantes de la materia de Diseño de Plantas (IP 428 A) de la carrera de Ingeniería de Petróleo y Gas Natural en el marco del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) que es parte del alcance de la formación de profesionales de la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra (UPSA).

Metodología

Se considera:

- Identificación del problema
- Análisis de las soluciones
- Definición de la propuesta

El estudio será original y estará orientados a la búsqueda de información documentada, siguiendo un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de los datos que permitan presentar una propuesta de conversión segura de vehículos de gasolina a GLP.

PRODUCCIÓN DE GASOLINA AUTOMOTOR

Se determina:

Capacidad de Refinación

Bolivia tiene tres refinerías de petróleo para producir combustibles y lubricantes, con capacidad de procesamiento de crudo de 67.450 barriles por día (BPD).

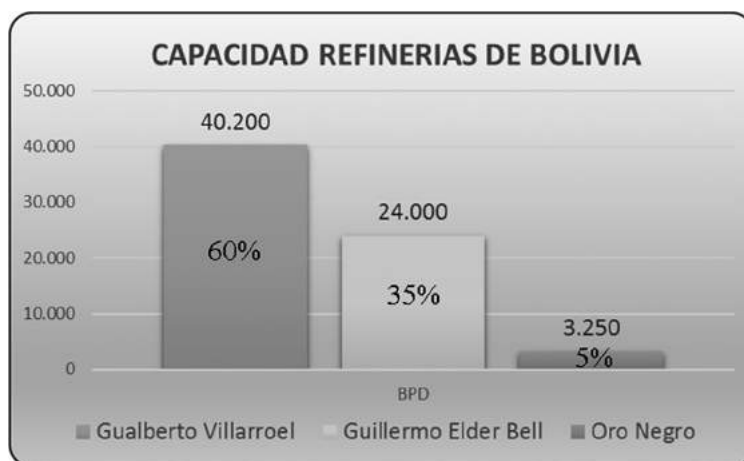
La refinería "Gualberto Villarroel" (RGV) de Cochabamba y la refinería "Guillermo Elder Bell" (RGEB) de Santa Cruz de la Sierra, pertenecen de la empresa YPFB Refinación S.A. y la refinería Oro Negro (RON) de Santa Cruz, pertenece a la empresa privada Equipetrol.

La RGV, tiene una capacidad de procesamiento de crudo de 40.200 BPD y produce combustibles (GLP, Gasolinas Automotrices, Diesel Oil, Kerosene, Jet Fuel y Gasolina de Aviación) y lubricantes (Aceites y Grasas Automotrices e Industriales).

La RGEB, tiene una capacidad de procesamiento de crudo de 24.000 BPD y produce sólo combustibles (GLP, Gasolinas Automotrices, Diesel Oil, Kerosene y Jet Fuel).

La RON, tiene una capacidad de procesamiento de crudo de 3.250 BPD y produce sólo combustibles (GLP, Gasolina Especial y Diesel Oil).

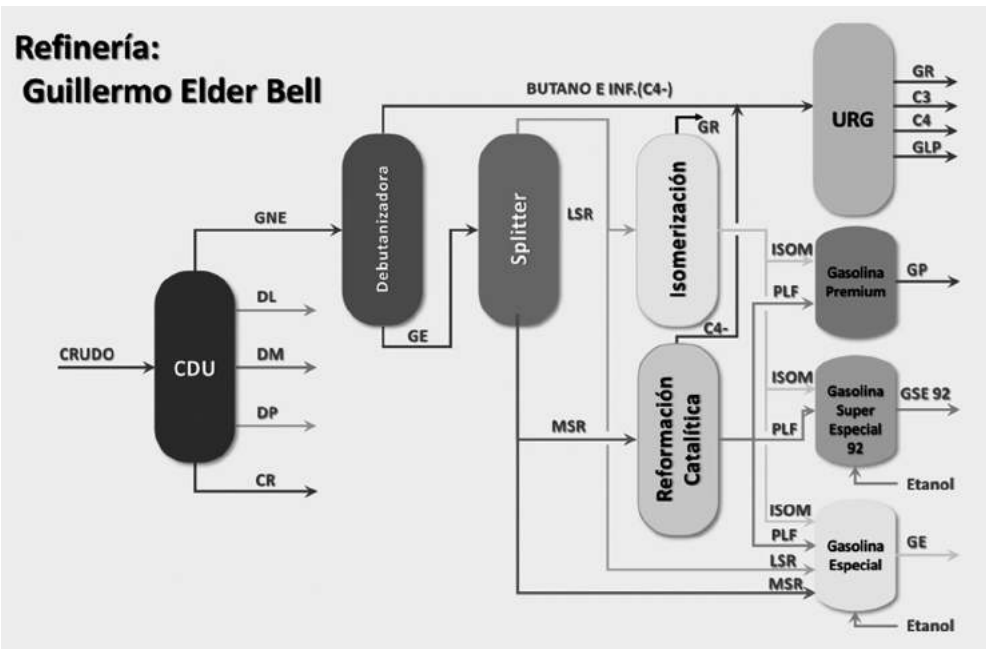
Figura 2.1 Capacidad de Refinerías de Bolivia (64.450 BPD)



Fuente: Elaboración Propia

Las refinerías disponen de unidades de destilación atmosférica de petróleo crudo (CDU), estabilizadora de gasolinas(desbutanizadora), separadora de gasolinas intermedias (splitter de nafta), unidad de recuperación de gases (URG), destilación al vacío, reforma catalítica e isomerización. No se tiene unidades de cracking catalítico por los porcentajes bajos de producción de crudo reducido.

Figura 2.2 Diagrama de Flujo Refinería Guillermo Elder Bell



Fuente: Elaboración Propia

Nota: Glorario

GNE	Gasolina No Estabilizada	C4_	Butano e inferiores
DL	Destilado Liviano	LSR	Gasolina Liviana
DM	Destilado Medio	MSR	Gasolina Media
DP	Destilado Pesado	ISOM	Isomerado
CR	Crudo Reducido	PLF	Reformado
GE	Gasolina Estabilizada	GR	Gas de Refinería
C3	Propano	GP	Gasolina Premium
C4	Butano	CDU	Unidad de Crudo
GSE92	Gasolina Super Especial 92	GE	Gasolina Especial
GLP	Gas Licuado de petróleo	URG	Recuperación de Gases

Las refinерías han sido diseñadas como unidades de proceso para elaborar petróleo crudo y producir combustibles, a excepción de la refinería de Cochabamba (RGV) que también produce lubricantes automotrices e industriales.

Tabla 2.1 Unidades de Proceso de Refinerías de Bolivia

Refinería	Propiedad / Operador	Ubicación	Destilación Primaria	Destilación al Vacío	Reformación Catalítica	Isomerización
Guillermo Elder Bell	Estatul / YPFB Refinación S.A.	Santa Cruz	↑		↑	↑
Gualberto Villarroel	Estatul / YPFB Refinación S.A.	Cochabamba	↑	↑	↑	
Oro Negro	Privada / Equipetrol	Santa Cruz	↑		↑	

Fuente: Elaboración propia

Producción de Gasolina Automotor

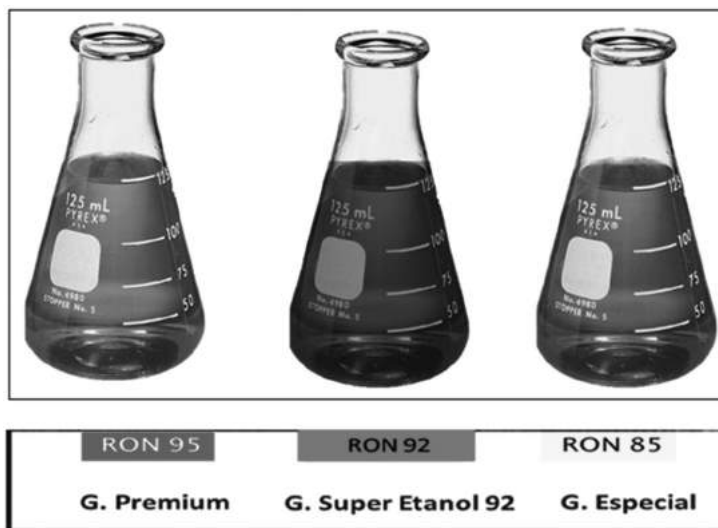
Se analiza los tipos de gasolina producidos en estas refinerías.

Tipos de Gasolina

Estos son:

- Gasolina Especial (85 RON)
- Gasolina Súper Etanol 92 (92 RON)
- Gasolina Premium (95 RON)

Figura 2.3 Tipos de Gasolina Automotor



Fuente: Elaboración propia

a) Gasolina Especial

Líquido inflamable, ligero, compuesto por una serie de hidrocarburos volátiles obtenidos del petróleo. Es de color cristalino amarillento y olor característico. En su preparación se utiliza Gasolina Especial Base de 81 octanos y 8% de Etanol Anhidro. Su principal característica es el octanaje o grado de resistencia a la compresión antes de su detonación o ignición de 85 octanos. Es un producto sin plomo.

b) Gasolina Súper Etanol 92

Líquido inflamable, ligero, compuesto por una serie de hidrocarburos volátiles obtenidos del petróleo. Es de color rojo y olor característico. En su preparación se utiliza Gasolina Especial Base de 85 octanos y 12% de Etanol Anhidro. Su principal característica es el octanaje o grado de resistencia a la compresión antes de su detonación o ignición de 92 octanos. Es un producto sin plomo.

c) Gasolina Premium

Líquido inflamable, producto sin plomo y mayor octanaje, 95 octanos. Es de color púrpura con lo cual se la identifica en el mercado, formulada para automóviles con convertidor catalítico y motores de relación de compresión alta.

Componentes de las Gasolinas

Las gasolinas terminadas se formulan, mezclando gasolinas de destilación directa (LSR, MSR) de octanaje bajo y gasolinas de octanaje alto (Reformado e Isomerado). Se usa etanol anhidro como aditivo en la preparación de Gasolina Especial y Super Especial 92.

Se muestra los componentes de gasolinas terminadas, que presentan características relacionadas a la Tensión de Vapor Reid (TVR) y Octanaje (RONC):

Tabla 2.2 Componentes Gasolina el Automotor

Componente	RONC	TVR
Isomerado (ISOM)	87-89	16
Platformado (PLTF)	90-97	4,5
Gasolina Liviana (LSR)	71	12
Gasolina Media (MSR)	45	1,2
Etanol Anhidro (EtOH)	120	2,7

Fuente: Elaboración propia

Especificación de Calidad de las Gasolinas

Las especificaciones de las gasolinas especial y premium están contenidas en el Decreto Supremo No. 2741 de 26 de abril del 2016 y la especificación de la gasolina super etanol 92 está contenida en la Resolución Administrativa RAR-ANH-DJ No 0352/2018 de 29 de octubre de 2018.

Tabla 2.3 Especificaciones Gasolina Automotor

Parametro	Actual DS 2741 Bolivia	Euro IV (2005)
Automaticos (% vol.) max.	42	35
Olefinas (% vol.) max	18	18
Benceno (% vol.) max	3	1
Oxigeno (% peso) max.	2,7	2,7
Azufre (ppm) max.	500	50
TVR (psi) verano / invierno	7-11,5	8,7-10,15
Plomo (gPb/L) max.	0,013	None

Fuente: Elaboración propia

Producción Gasolina Automotor (1990-2019)

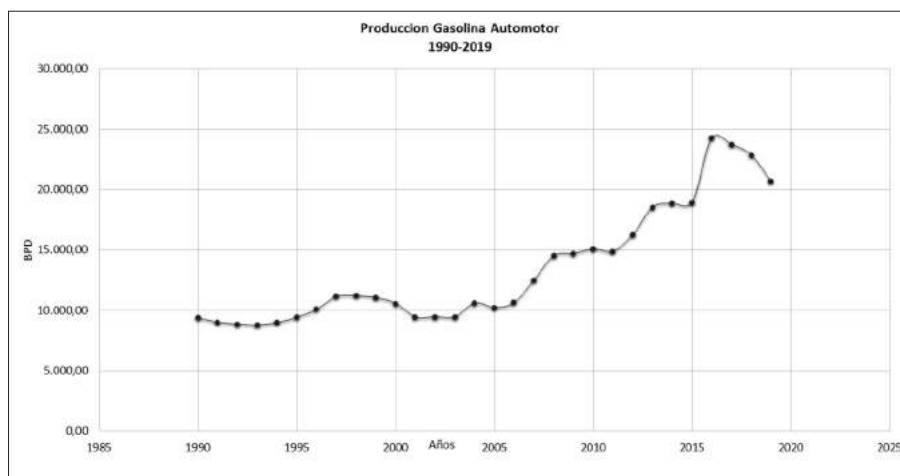
Se muestra la producción de gasolina automotor desde al año 1990 hasta el año 2019, expresada en barriles por día (BPD) (Instituto Nacional de Estadística - INE):

**Tabla 2.4 Producción de Gasolina Automotor
Período: 1990-2019 (BPD)**

PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)	PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)	PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)
1990	9.355,34	2000	10.555,89	2010	15.045,09
1991	8.992,88	2001	9.422,28	2011	14.873,19
1992	8.833,42	2002	9.449,92	2012	16.234,70
1993	8.757,26	2003	9.451,30	2013	18.522,22
1994	8.961,10	2004	10.593,14	2014	18.840,60
1995	9.404,11	2005	10.207,21	2015	18.913,92
1996	10.070,14	2006	10.620,91	2016	24.241,67
1997	11.119,29	2007	12.486,64	2017	23.723,28
1998	11.174,61	2008	14.495,53	2018	22.823,47
1999	11.023,86	2009	14.693,88	2019	20.642,01

Fuente: INE, 2019

**Figura 2.4 Producción de Gasolina Automotor
Período: 1990-2019 (BPD)**



Fuente: INE, 2019

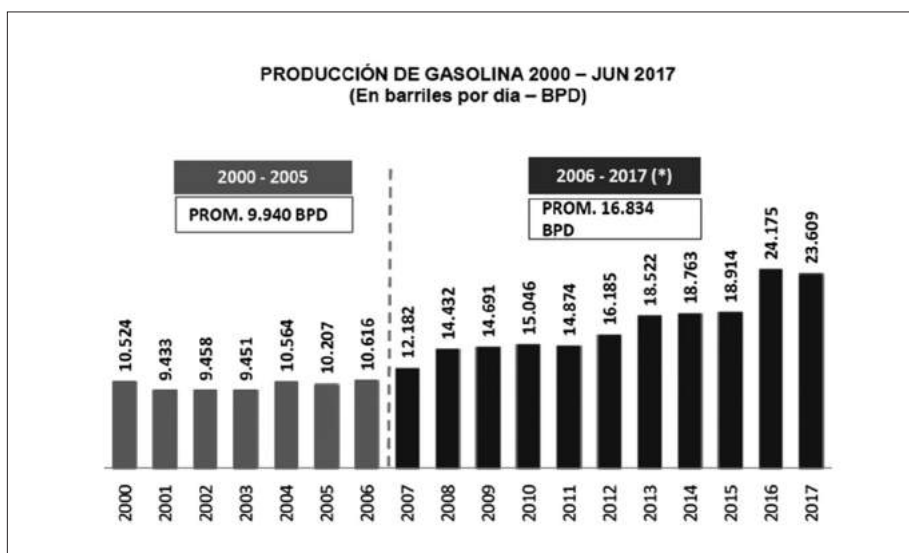
En el periodo 2005-2019, se produce el incremento de producción de gasolina automotor, como consecuencia de la ampliación de las refinerías de la empresa YPFB Refinación y aumento en los volúmenes de procesamiento de petróleo crudo.

A partir del año 2016, se incrementa la producción de gasolina automotor (44% con relación al crudo procesado). En este periodo entra en operación la unidad de reformación catalítica (NURC) de 5.300 BPD en la RGV y la unidad de isomerización (NUIS) de 6.000 BPD en la RGEB, ambas, parte de la empresa YPFB Refinación S.A.

Mediante Ley 1098 del 17 de septiembre de 2018, se autoriza el uso de etanol anhidro como aditivo en la preparación de gasolina automotor, con la finalidad de disminuir los volúmenes de importación de insumos y aditivos para la preparación de gasolinas terminadas.

Se muestra la producción en BPD de gasolinas en el período 2000-2017, (Ministerio de Hidrocarburos (MH), informe “Audiencia de Rendición Pública de Cuentas Final 2017 - Inicial 2018”).

**Figura 2.5 Producción de Gasolina Automotor
Periodo: 2000-2017 (BPD)**



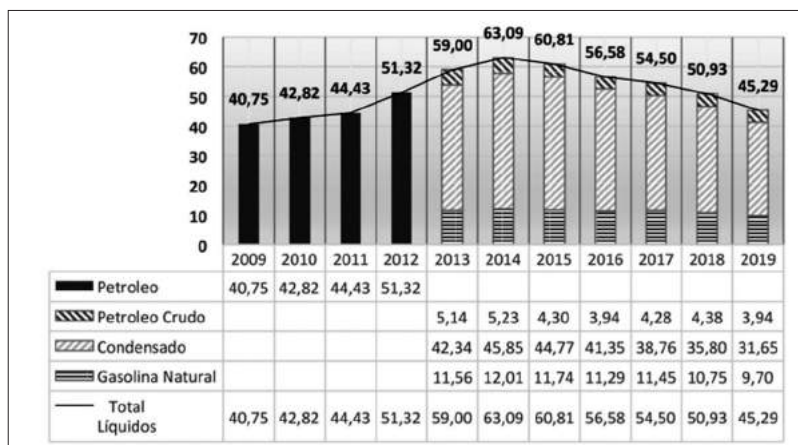
Fuente: MH/ YPFB, 2017

Estimación Producción Crudo y Gasolina Automotor (2020-2025)

La producción de gasolinas está en función de la producción y el procesamiento de petróleo crudo, rendimiento de la producción de gasolinas intermedias de octanaje bajo (LSR, MSR), rendimiento de las unidades de conversión de gasolinas de octanaje bajo a gasolinas de octanaje alto (reformación catalítica e isomerización) y dosificación del aditivo etanol anhidro a la gasolina especial y super etanol 92.

Según el informe del Ministerio de Hidrocarburos “AGENDA DE REACTIVACION HIDROCARBURIFERA DE BOLIVIA”, publicada en octubre de 2020, se visualiza la declinación de la producción de hidrocarburos líquidos a partir del año 2014.

**Figura 2.6 Producción Fiscalizada de Hidrocarburos Líquidos
 Periodo: 2009-2019 (MBPD)**

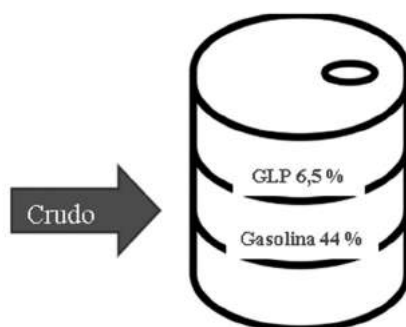


Fuente: MH - VMEEH

Se observa que la producción de hidrocarburos líquidos decreció en el periodo 2014-2019, con una tasa promedio anual del 7%. Esta disminución de la producción de crudo y condensado tiene influencia directa en la disminución de producción de la gasolina automotor.

Para el procesamiento de crudo de 60 grados API en las refinerías, se tienen los rendimientos de producción de GLP y gasolina automotor siguientes:

Figura 2.7 Rendimientos Producción Gasolina y GLP



Fuente: Elaboración propia

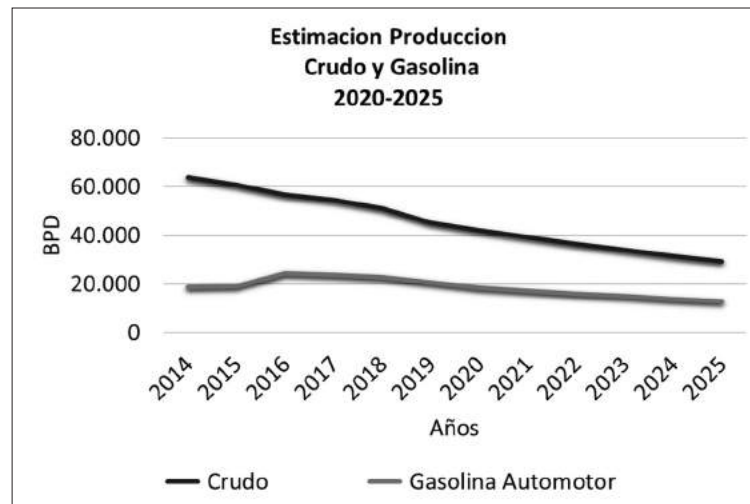
Se muestra la estimación de producción crudo y gasolina automotriz para el periodo 2020-2025.

**Tabla 2.5 Estimación Producción Crudo y Gasolina Automotor
Periodo: 2020-2025**

Periodo	Crudo	Gasolina Automotor
Año	BPD	BPD
2014	63.900	18.841
2015	60.810	18.914
2016	56.580	24.242
2017	54.500	23.723
2018	50.930	22.823
2019	45.290	20.642
2020	42.120	18.533
2021	39.171	17.235
2022	36.429	16.029
2023	33.879	14.907
2024	31.508	13.863
2025	29.302	12.893

Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.8 Estimación Producción Crudo y Gasolina Automotor
Periodo: 2020-2025**



Fuente: Elaboración propia

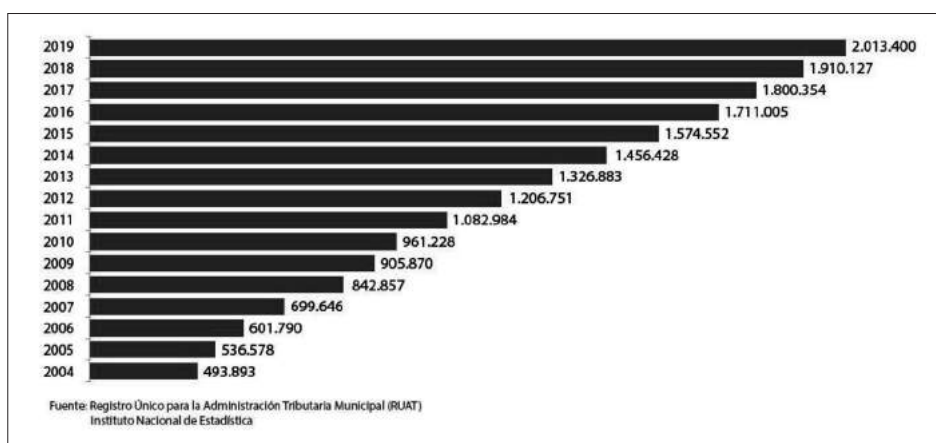
DEMANDA DE GASOLINA AUTOMOTOR

Se analiza:

Crecimiento de parque automotor de Bolivia

Según INE, el parque automotor boliviano, en la gestión 2019 creció un 5,4% con relación al 2018. Este crecimiento sostenido de la cantidad de vehículos (figura 3.1) ocasiona la demanda de combustibles, especialmente, de gasolina automotor, por la mayor cantidad de vehículos que usan este combustible.

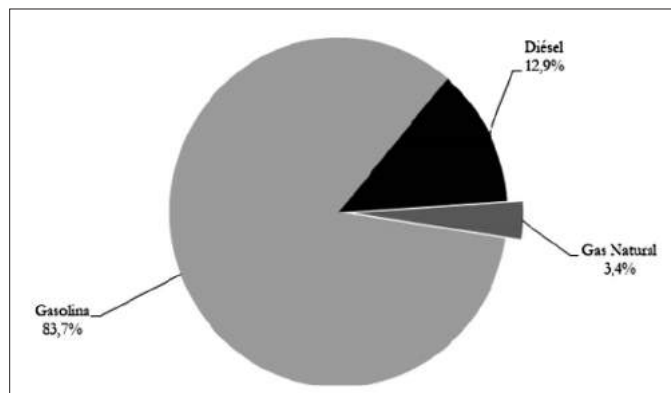
Figura 3.1 Crecimiento Parque Automotor de Bolivia
Periodo: 2004-2019



Fuente: INE, 2019

En la gestión 2017 se determina la participación del uso de combustible en el parque automotor, observándose que el 83,7 % son vehículos que consumen gasolina:

Figura 3.2 Uso de Combustible en el Parque Automotor
Año :2017



Fuente: INE, 2017

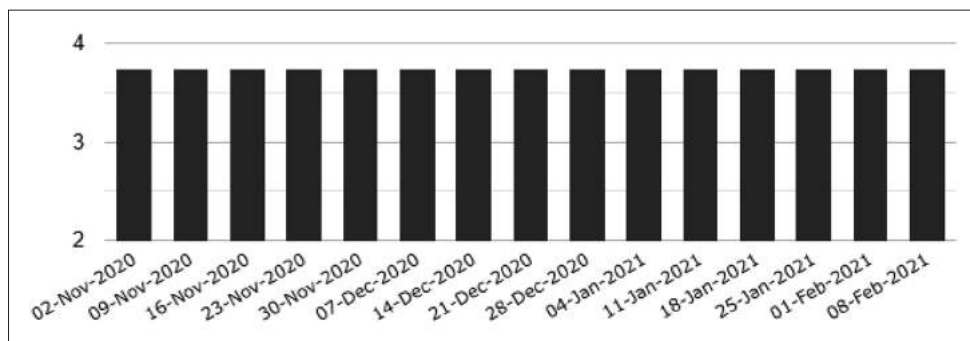
Demanda de Gasolina Automotor (1990-2019)

Según el informe del INE, la comercialización de gasolina automotor en Bolivia ha registrado un crecimiento sostenido desde el año 1990.

La mayor demanda de gasolina automotor se debe fundamentalmente al mayor crecimiento del parque automotor de vehículos a gasolina. La gasolina especial es la de menor octanaje, menor precio y mayor consumo en el mercado nacional.

El precio de la gasolina especial (figura 3.3), está congelado desde el año 2004, con un precio de 3,74 Bs/L (0,543 \$US/L / 2,005 \$US/GUS), precio inferior al de otros países lo que incentiva la importación de vehículos nuevos y usados a gasolina.

Figura 3.3 Precio Gasolina Especial en Bolivia
3,74 Bs/L (0,543 \$US/L/2,005 \$US/GUS)



Fuente: globalpetrolprices, 2021

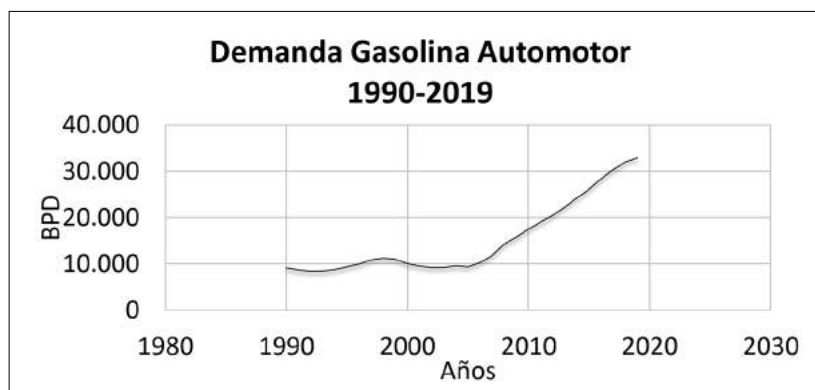
Se muestra la demanda de gasolina automotor, años 1990 a 2019, expresado en BPD, observándose una tasa de crecimiento anual del 7%.

**Tabla 3.1 Demanda de Gasolina Automotor
 Periodo 1990-2019 (BPD)**

PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)	PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)	PERIODO	GASOLINA AUTOMOTOR (BPD)
1990	9.128	2000	10.030	2010	17.440
1991	8.656	2001	9.474	2011	19.057
1992	8.420	2002	9.200	2012	20.484
1993	8.430	2003	9.183	2013	22.301
1994	8.790	2004	9.569	2014	24.204
1995	9.377	2005	9.372	2015	26.095
1996	9.999	2006	10.271	2016	28.440
1997	10.835	2007	11.849	2017	30.341
1998	11.255	2008	14.281	2018	32.044
1999	11.049	2009	15.789	2019	32.957

Fuente: INE, 2019

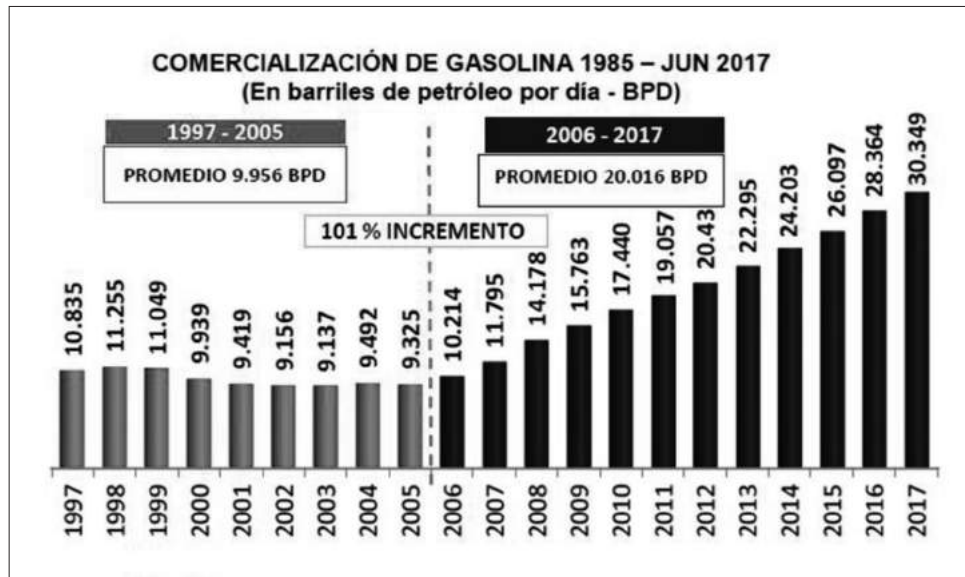
**Figura 3.4 Demanda de Gasolina Automotor
 Periodo 1990-2019 (BPD)**



Fuente: INE, 2019

Se muestra la comercialización de gasolinas (BPD), periodo 1997-2017. Miniisterio de Hidrocarburos, informe “Audencia de Rendición Pública de Cuentas Final 2017 – Inicial 2018”.

Figura 3.5 Comercialización de Gasolina Automotor
Periodo 1985-2017 (BPD)

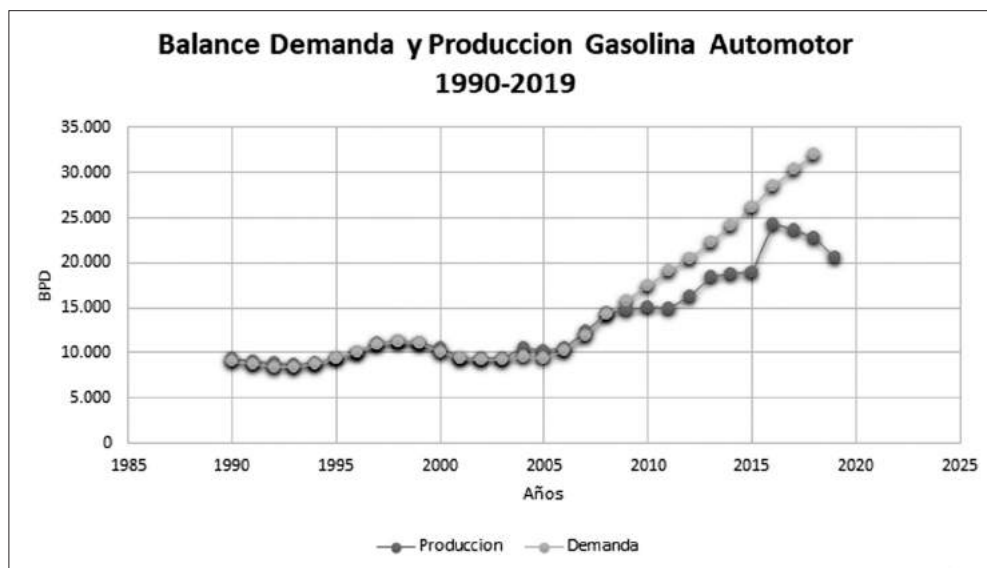


Fuente: MH/YPFB, 2017

Balance Demanda y Producción Gasolina Automotor (1990-2019)

Se presenta el balance de oferta y demanda de gasolina automotor en el período 1990-2019, observándose un déficit de producción a partir del 2009.

Figura 3.6 Demanda y Producción Gasolina Automotor
Periodo: 1990-2019 (BPD)

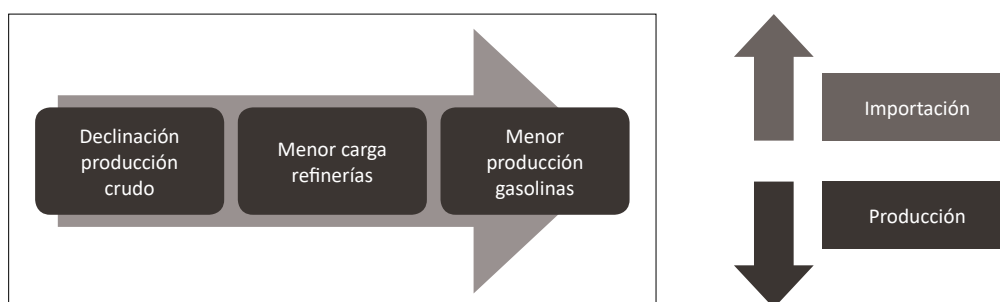


Fuente: INE, 2019

El déficit de producción de gasolina automotor se origina como consecuencia del crecimiento del parque automotor, aumento sostenido de la demanda de gasolina automotor, declinación de la producción de hidrocarburos líquido y gaseosos de los campos de hidrocarburos, disminución del crudo de carga a las refinerías (las refinerías solo procesan crudo de producción nacional), disminución de la producción de gasolinas intermedias, disminución de la producción de gasolinas terminadas.

El déficit de producción de gasolina cubre con la importación de insumos y aditivos(gasolina) para abastecer la demanda nacional.

Figura 3.6 Importación de insumos



Fuente: Elaboración propia

3.4. Estimación de Demanda, Producción e Importación Gasolina Automotor (2020-2025)

Para la estimación de la demanda, producción e importación de gasolina automotor, período 2020-2025, se toma en consideración los parámetros:

- Tasa anual producción gasolina automotor: -7%
- Tasa anual demanda gasolina automotor: +7%

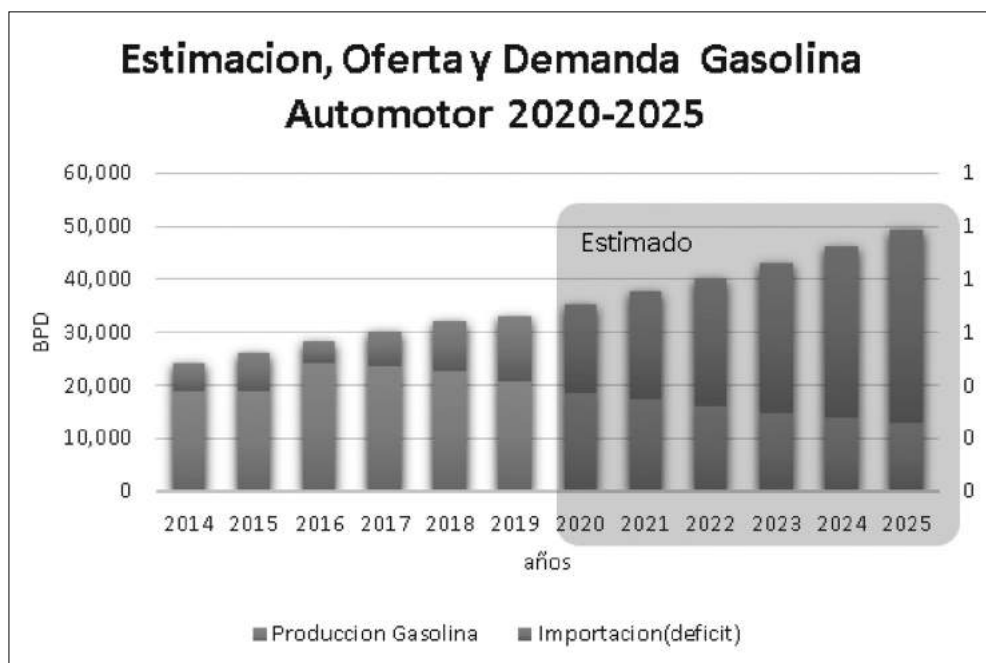
Se presentan los volúmenes estimados de producción y demanda de gasolina automotor para el período 2020-2025, observándose con déficit mayor de producción y, como consecuencia, mayores volúmenes de importación, llegando a 36,4 BPD el requerimiento de importación de gasolina automotor para el año 2025.

Tabla 3.2 Estimación Demanda, Producción e Importación Gasolina Automotor, BPD (2020-2025)

Periodo	Demanda Gasolina	Producción Gasolina	Importación (deficit)
2014	24.204	18.841	5.363
2015	26.095	18.914	7.181
2016	28.440	24.242	4.198
2017	30.341	23.723	6.618
2018	32.044	22.823	9.221
2019	32.957	20.642	12.315
2020	35.264	18.533	16.731
2021	37.733	17.235	20.497
2022	40.374	16.029	24.345
2023	43.200	14.907	28.293
2024	46.224	13.863	32.361
2025	49.460	12.893	36.567

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Estimación Demanda, Producción e Importación Gasolina Automotor (2020-2025)



Fuente: Elaboración propia

IMPORTACIÓN DE GASOLINA AUTOMOTOR

El déficit de producción de gasolina automotor se importa de occidente (Chile, Perú), oriente (Paraguay) y sur (Argentina).

Según el boletín ELECTRONICO IBCE -CIFRAS, publicado por el Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE), en el período 2006-2020, Bolivia importó combustibles (Gasolina y Diesel Óil) por la suma de 12.800 millones de dólares.

Figura 4.1 Importaciones de Combustibles



Fuente: IBCE, 2020

Figura 4.2 Importaciones de Gasolina Gestión 2019(P)



Fuente: IBCE, 2020

YPFB importa gasolina automotriz con la denominación de “Insumos y aditivos (I&A) “con especificación es contenidas en la Licitación YPFB, CODIGO: DCO-CDL-GPDI-667-18, donde se destaca la especificación de parámetros compatibles con la especificación de las gasolinas automotrices de producción nacional.

- **Octanaje (RON):** 85-91
- **Tensión Vapor Reid (TVR):** 5,5psi - 9,0 psi
- **Contenido Azufre(S):** 0,05% Peso Máx. (500 ppm)
- **Contenido Aromáticos:** 42% Vol. Max.
- **Contenido Benceno:** 3% Vol. Max.

Se presenta la especificación completa para la importación de insumos y aditivos según licitación de YPFB, CODIGO: DCO-CDL-GPDI-667-18.

Tabla 4.1 Importación Insumos y Aditivos para la Elaboración de Gasolina Especial

Insumos y Aditivos	VERANO (*)		INVIERNO		UNIDAD	MÉTODO ASTM			
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.		Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4
Gravedad Específica 15,6/15,6°C	Informar		Informar		-	D - 1298	D - 4052		
Relación V/L=20 (760 mmHg)	51 (124)		51 (124)		°C (°F)	D - 2533	D - 2533		
Tensión de Vapor Reid a 100 °F (37,8°C)	5,5	9	5,5	9	p sig	D - 323	D - 4953	D - 5191	
Contenido de Plomo (**)		0,013		0,013	g PB/L	D - 3237	D - 5059		
Corrosión lámina de Cobre		1		1	-	D - 130			
Gomas Existentes		5		5	mg/100mL	D - 381			
Azufre Total		0,05		0,05	% Peso	D - 1266	D - 2622	D - 4294	
Octanaje RON	85	91	85	91	-	D - 2699			
Octanaje RON	Informar		Informar		-	D - 2700			
Índice Antidetonante (RON+MON)/2	Informar		Informar		-				
Color	Incoloro a Ligeramente Amarillo				-	Visual			
Apariencia	Cristalina		Cristalina		-	Visual			
Poder Calorífico	Informar		Informar		Btu/Lb	D - 240			
Destilación Engler (760 mmHg)					-	D - 86			
10% Vol		65 (149)		60 (140)	°C (°F)				
50% Vol	77 (170)	118 (245)	77 (170)	116 (240)	°C (°F)				
90% Vol		190 (374)		185 (365)	°C (°F)				
Punto Final		225 (437)		225 (437)	°C (°F)				
Residuo		2		2	% Vol				
Contenido de Aromáticos Totales		42		42	% Vol	D - 1319	D - 5134	D - 5769	D - 6729
Contenido de Olefinas		18		18	% Vol	D - 1319	D - 5134	D - 6729	
Contenido de Benceno		3		3	% Vol	D - 4053	D - 5134	D - 3606	D - 5769
Contenido de Manganeseo		18		18	mg Mn/L	D - 3831			
Contenido de Oxígeno		2,7		2,7	% Peso	D - 2504	D - 4815		

(*) Verano se define del 1° de septiembre al 31 de marzo e invierno se define del 1° de abril al 31 de agosto.

(**) El contenido de plomo especificado es un valor intrínseco de la materia prima sin haberse adicionado cantidad alguna del mismo con fines de mejorar su octanaje.

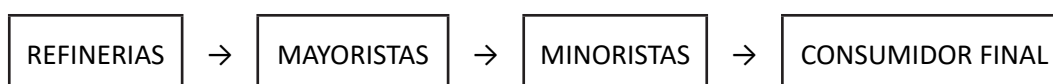
Fuente: YPFB

PRECIOS GASOLINA AUTOMOTOR

Se analiza:

Precio gasolina mercado interno

Las refinerías comercializan la gasolina especial (GE) a Precio Pre-Terminal (PPT) de 3,38 bolivianos/litro, entregando el producto al mayorista (YPFB) en las plantas de almacenaje que están instaladas en el territorio nacional. El distribuidor mayorista comercializa el producto a Precio Mayorista (Pr.May.) y entrega el producto al comercializador minorista. El minorista (EESS) comercializa el producto al consumidor final a Precio Minorista (Prion) de 3,74 bolivianos/litro.



Se presentan los precios de Gasolina Especial, Gasolina Super Etanol 92, Gasolina Premium, GLP y GNV. Estos precios son regulados por el ente regulador (ANH) y rigen en todo el territorio nacional:

Tabla 5.1 Precios Mercado Interno Combustibles Regulados Consumidor Final

PRECIO MERCADO INTERNO PRODUCTOS REGULADOS AL CONSUMIDOR FINAL					
Gestión	Gasolina Especial	Gasolina Super Etanol 92	Gasolina Premium	GLP	GNV
	Bs/L	Bs/L	Bs/L	Bs/Kg	Bs/m3
2010	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2011	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2012	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2013	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2014	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2015	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2016	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2017	3,74	-	4,57	2,25	1,66
2018	3,74	4,5	4,57	2,25	1,66
2019	3,74	4,5	4,57	2,25	1,66
2020	3,74	4,5	4,57	2,25	1,66

Fuente: ANH, 2020

Precio gasolina importada

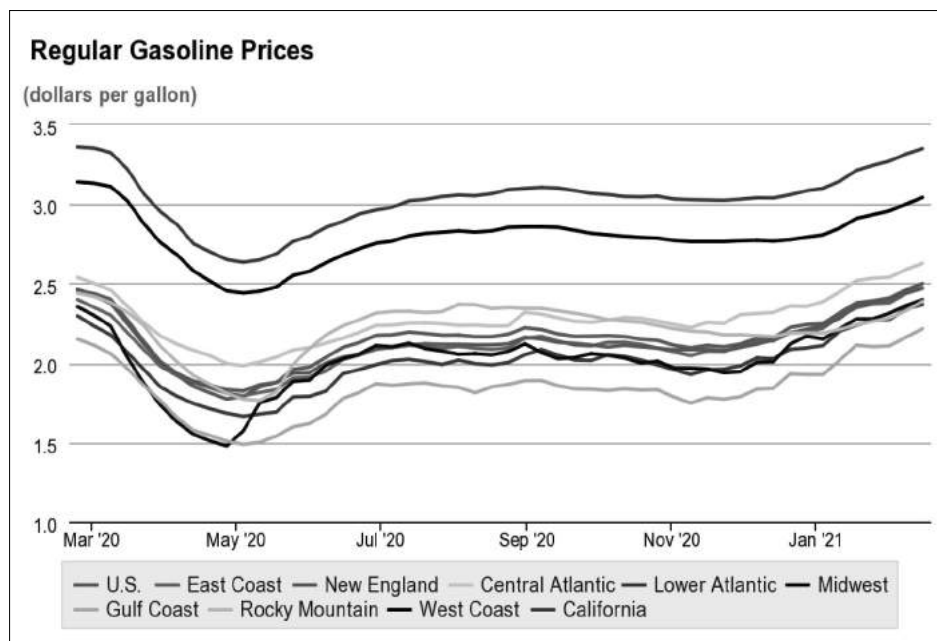
Para la determinación del precio de la gasolina importada, se considera la cadena de suministro y logística de transporte desde el punto de entrega del proveedor hasta las plantas de almacenaje.

El precio de la gasolina importada puesta en Terminal Arica, Chile, se determina tomando como referencia el precio promedio de las cotizaciones diarias de la gasolina Unleaded 87, USGC, Houston, Waterborne, en dólares por galón, publicada por Platt's US MarketScan+ Premio.



El precio de la gasolina regular en la costa del golfo de los EE.UU. (USGC) es variable y fluctúa con el precio del petróleo crudo. Se muestra, la variación del precio de la gasolina regular (USGC) con el tiempo, que fluctúa alrededor de 2 USD/GUS.

Figura 5.1 Precio Gasolina Regular (Costa del golfo de EE.UU.) (2020-2021)



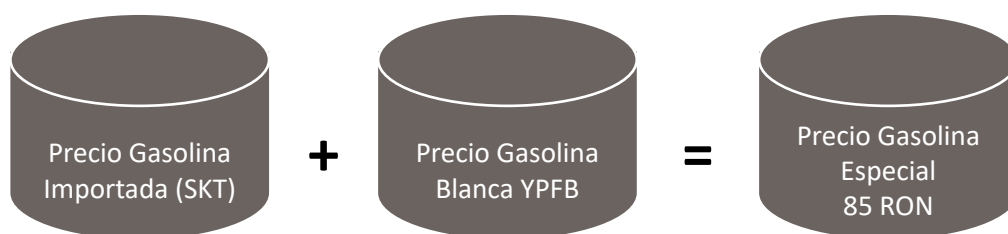
Fuente: EIA - Energy Information Administration, 2021

El precio incluye Flete, Seguro de transporte, gastos y costos emergentes de la operación que no podrán ser cargados a YPFB en ninguna circunstancia, más utilidades que considere el PROPONENTE, para entregas DAP-Arica Chile, con base a RON 85.

Al precio final de la gasolina, en el puerto de Arica, Chile, se suma los costos de transporte vía cisternas desde Arica hasta la Planta de YPFB Logística S.A.(SENKATA), ciudad de El Alto, gastos aduaneros y gastos de almacenaje.



El producto importado se mezcla con gasolina blanca (31,29 dólares/barril según DS 29122) de YPFB en planta SENKATA, en proporciones adecuadas, según RM MH No 048 17 de 19/04/2017, para obtener gasolina especial de 85 RON, que cumpla las especificaciones del DS 2741.



31,29 US\$/bbl

La gasolina especial 85 RON, resultante de la mezcla de gasolina importada + gasolina blanca, tiene un precio mayor que los precios de venta de la gasolina especial que comercializan las refinerías de Bolivia a Precio Pre-Terminal (PPT) de 3,38 Bs/L y esta diferencia es subvencionada por el estado de acuerdo con al artículo 5 del DS No 286 del 09 de septiembre 2009.

Subvención = Precio GE Importada - Precio Pre-Terminal GE Refinerías (3,38 Bs/L)

Según la ANH, se tiene los precios unitarios de la GE 85 RON (mezcla gasolina Importada+ Gasolina Blanca) según la logística de importación, Occidente, Oriente y Sur.

Tabla 5.2 Costo unitario Gasolina Especial Importada 85 RON (Bs/L)

GESTIÓN	2015	2016	2017	2018	2019
OCCIDENTE	5,62	6,54	4,64	5,20	4,30
ORIENTE	5,06	5,54	5,37	5,81	4,43
SUR	5,64	5,55	5,31	5,60	4,12

Fuente: ANH, 2018

CARACTERÍSTICAS DEL GLP

Se considera:

Composición

El GLP está compuesto por hidrocarburos livianos de 3 átomos y 4 átomos de carbono, propano (C₃H₈) y butano(C₄H₁₀), en proporciones variables. Están presentes concentraciones pequeños de etano y otros hidrocarburos pesados como pentano y superiores(C₅+). También se agrega a su composición, un odorante (etil o metil-mercaptano) para que sea detectado en caso de fuga.

Especificación

En Bolivia, la especificación del GLP está contenida en el Anexo A del DS No 1499 del 20 de febrero de 2013.

Tabla 6.1 Especificaciones del Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Prueba	Especificaciones		Unidad	Método ASTM	
	Min.	Max.		Altern. 1	Altern. 2
Gravedad específica a 15,6/15,6°C	0,52	0,57		D 1657	D 2598
Tensión de vapor a 100 °F (38°C)	80	170	psig	D 1267	D 2598
REsiduo volátil, 95% vol.		2,2 (36)	°C (°F)	D 1837	
Pentaon y más pesados		2,0	% vol.	D 2163	
Residuo por evaporación 100 mL		0,05	mL	D 2158	
Corrosión lámina de cobre		1		D 1838	
Azufre total (*)		200	ppm	D 2784	
Humedad	Cumple			D 2713	
Poder calorífico superior	Informar		BTU/lb	D 3588	
Cpntenido de Etano		3	% vol.	D 2163	

(*) En este valor está incluido el aporte de azufre del odorante

Fuente: ANH, 2018

Poder calorífico inferior (PCI)

Se muestra que el GLP tiene un contenido energético en base masa (BTU/lb) similar al de la gasolina y gas natural.

Tabla 6.2 Contenido Energético Combustibles

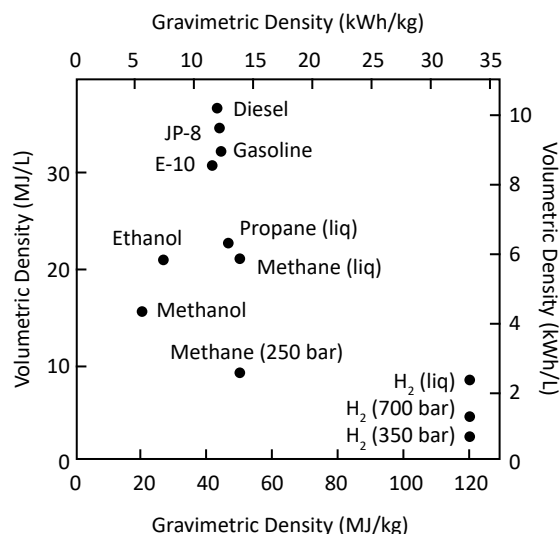
Combustibles	Densidad	Valor calorífico neto			
		Base de masa		Base de volumen	
Combustibles gaseosos a 0 °C / 32 °F y 1 atm	kg / m ³	MJ / kg	Btu / lb	MJ / m ³	Btu / pie ³
Gas natural (95% de metano)*	0,747	48,7	20,956		
Hidrógeno	0,09	120,2	51,682	10,81	290
Combustibles líquidos	kg / m ³	MJ / kg	Btu / lb	MJ / m ³	Btu / pie ³
Gasolina convencional	744	43,4	18,679	32,317	116,09
Gas licuado de petróleo (GLP)	507	46,6	20,038	23,648	84,95
Gas natural licuado (GNL)	428	48,6	20,908	20,8	74,72
Hidrógeno líquido	71	120,1	51,621	8.490	30,5

Fuente: engineeringtoolbox, 2001

Densidad energética

Se muestra la comparación de energía específica por unidad de masa (MJ/Kg) y la energía específica por unidad de volumen (MJ/L) para varios combustibles basada en valores del poder calorífico inferior.

Figura 6.1 Energía Específica Combustibles



Fuente: U.S.Department of Energy

Desde el punto de vista del contenido energético por unidad de volumen (MJ/L), la gasolina tiene mayor energía que el GLP. Debido a esta diferencia energética, para una misma distancia de recorrido del vehículo, el consumo de GLP siempre será superior al de la gasolina. Se muestra que la gasolina (32,32 MJ/L) tiene mayor poder calorífico por unidad de volumen que el GLP(23,6 MJ/L). Esto confirma el mayor consumo de GLP que gasolina para el mismo recorrido del vehículo (tabla 6.2).

Los vehículos que usan GLP tienen dos depósitos de combustible: uno de GLP y otro de gasolina, lo cual proporciona al vehículo mayor autonomía de recorrido.

6.5. Equivalencia energética del GNV y GLP respecto a la Gasolina

En base al poder calorífico de los combustibles se tienen los volúmenes equivalentes de GNV, GLP y Gasolina con el mismo rendimiento energético. Se observa que, para precios actuales y el mismo contenido energético es más económico el uso de los combustibles en el orden: GNV < GLP < Gasolina:

Tabla 6.3 Equivalencias Energéticas: GNV, GLP y Gasolina

Producto	GNV	GLP	Gasolina
Poder calorífico BTU/lb	20.956	20.038	18.679
Equivalencia Energética	3,17 m3	4,6 L	1 GUS
Equivalencia Energética*	0,84 m3	1,22 L	1 L
Precio	1,66 Bs/m3	1,22 Bs/L	3,74 Bs/L
Costo* Bs	1,39	1,49	3,74

*Costo equivalente 1 l gasolina

Fuente: Elaboración Propia

Contaminación ambiental

El GN es menos contaminante que el GLP y este último, menos contaminante que la gasolina, esto por contener menor cantidad de átomos de carbono en su composición. La combustión del GLP, libera menor cantidad de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente que la gasolina:

- Combustión **GN**: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow 1 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CALOR}$
- Combustión **PROPANO**: $\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} + \text{CALOR}$
- Combustión **BUTANO**: $2\text{C}_4\text{H}_{10} + 13 \text{O}_2 \rightarrow 8 \text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + \text{CALOR}$
- Combustión **GASOLINA**: $2 \text{C}_8\text{H}_{18} + 25 \text{O}_2 \rightarrow 16 \text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + \text{CALOR}$

Almacenaje

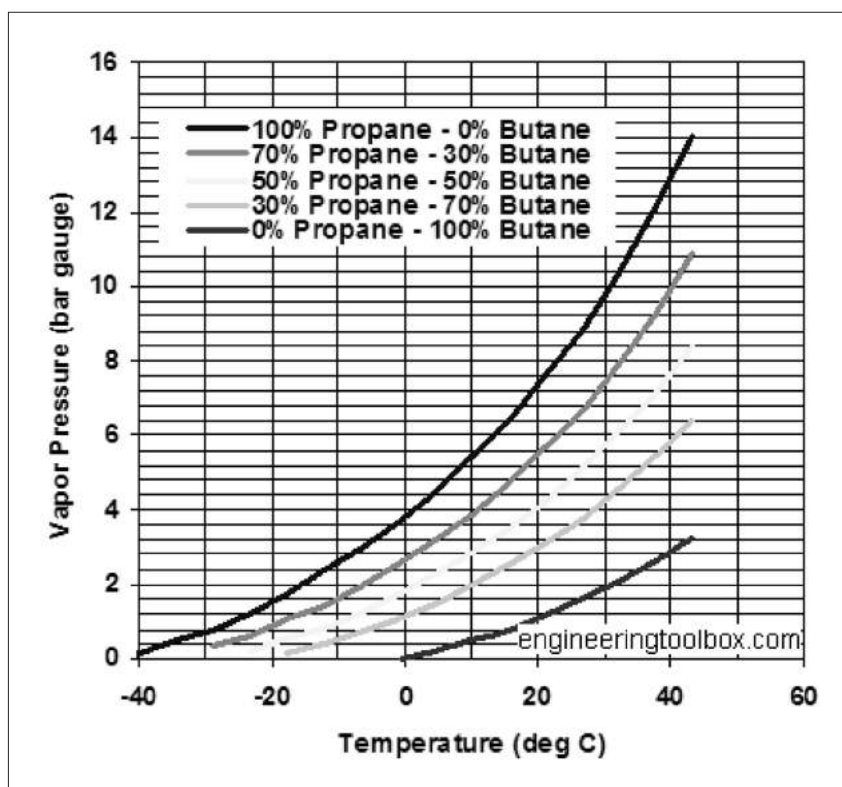
El propano(C₃) y el butano(C₄) son gases a presión y temperatura ambiente, pero pueden licuarse a presión y temperatura atmosférica bajas. El gas licuado de petróleo se almacena en recipientes de acero cerrado y presurizado (7 bar) a temperatura ambiente. Según la norma de la Secretaría de Energía de Argentina (SE 131/03), la capacidad máxima de llenado en volumen con GLPA del recipiente no es mayor al OCHENTA POR CIENTO (80%) de la capacidad en volumen de agua de éste.

Presión de vapor

La tensión de vapor del GLP a 100°F (38 °C), según DS 1499, está en el rango de 80 psig - 170 psig. Esta especificación de la presión de vapor es de importancia para los diseños de los recipientes presurizados que almacenan GLP.

Se presenta la variación de la presión de vapor de propano, butano y mezclas de ambos hidrocarburos con la temperatura. La composición 70% de C_3 y 30% de C_4 , es la composición recomendada para lograr una vaporización eficiente durante su utilización del GLP, especialmente, en lugares de temperatura baja.

Figura 6.2. **Presión de Vapor Mezclas Propano-Butano**



Fuente: engineeringtoolbox, 2001

Inflamabilidad

Para una mezcla GLP-AIRE se tiene los límites de inflamabilidad siguientes:

- Límite inferior (Leer Flammable Limit) 2,1% de GLP
- Límite superior (Upper Flammable Limit) 9,5% de GLP

El GLP solamente es inflamable en presencia de aire en el rango (2,1%-9,5%)

Punto de ebullición

A presión normal se tienen los puntos de ebullición del propano y butano siguientes:

- Propano: -42,10 °C
- Butano: -0,50 °C

El punto de ebullición está relacionado con la evaporación del producto, siendo recomendable para la comercialización de GLP doméstico en el área occidental del país, tener en la mezcla con mayor proporción de propano.

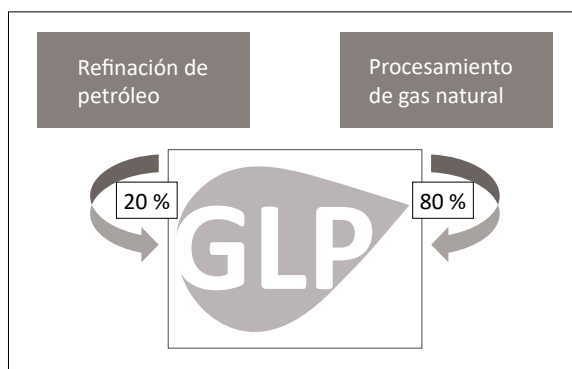
PRODUCCIÓN DE GLP

Se analiza la producción de GLP.

Producción de GLP en refinerías de petróleo

El GLP producido proviene del proceso de refinación del petróleo crudo (20%) y de las plantas de separadoras de líquidos (80%).

Figura 7.1 Fuentes de la Producción de GLP

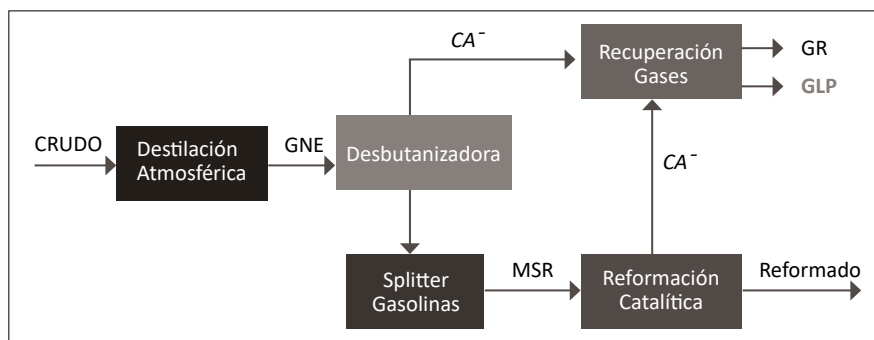


Fuente: Elaboración Propia

El GLP que producen las refinerías proviene de las unidades de destilación y reformación catalítica. Estas unidades envían el butano e inferiores (C_4^-) a la unidad de recuperación de gases, donde se separa el gas de refinería (GR) que se usa como gas combustible y el GLP que se envía a tanques de almacenamiento.

Segun reportes de YPF, el porcentaje global de GLP que producen las tres refinerías es el 6,5% con relacion al petróleo crudo procesado.

Figura 7.2 Producción GLP en Refinerías



Fuente: Elaboración Propia

Producción de GLP en plantas separadoras de líquidos

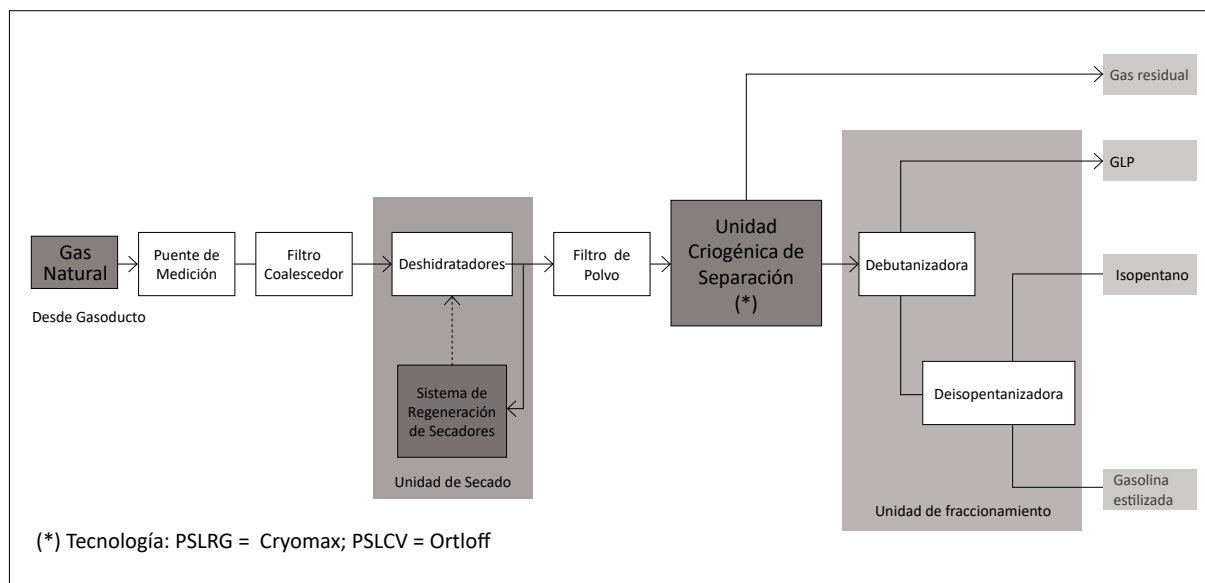
En las plantas separadoras de líquidos, se procesa el gas natural húmedo (contenido de licuables alto) mediante procesos criogénicos para obtener gas natural seco (contenido de metano alto), GLP, gasolina natural e isopentano (IC5):

Figura 7.3 Producción de GLP en Plantas Separadoras de Líquidos (PSL)



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.4 Plantas Separadoras de Líquidos: PSLRG y PSLCV



Fuente: YPFB, 2021

Planta Separadora Líquidos Rio Grande

La nueva Planta Separadora de Líquidos de Rio Grande (PSLRG) inició su construcción el año 2011 y entró en operación el año 2013. Esta planta tiene una capacidad de procesamiento de GN de 5,6 MMMCD y está diseñada para producir:

- GLP: 361 TMD
- Isopentano: 195 BPD
- Gasolina Natural: 350 BPD

Figura 7.5 Área de Procesos de la Planta Separadora de Líquidos de Rio Grande (PSLRG)



Fuente: YPFB, 2021

Figura 7.6 Área de Almacenaje de la Planta Separadora de Líquidos de Rio Grande

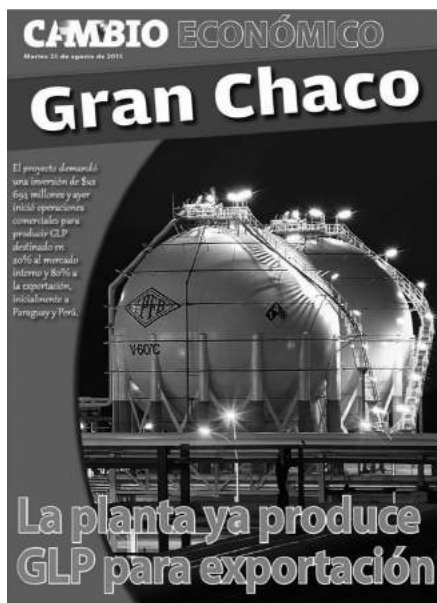


Fuente: YPFB, 2021

Planta Separadora de Líquidos Gran Chaco

La Planta Separadora de Líquidos de Gran Chaco, hoy llamada Planta Separadora de Líquido "Carlos Villegas" (PSLCV) inició su construcción el año 2012 y entró en operación el año 2015.

Figura 7.7 Planta Separadora de Líquido Carlos Villegas (PSLCV)



Fuente: YPFB, 2021

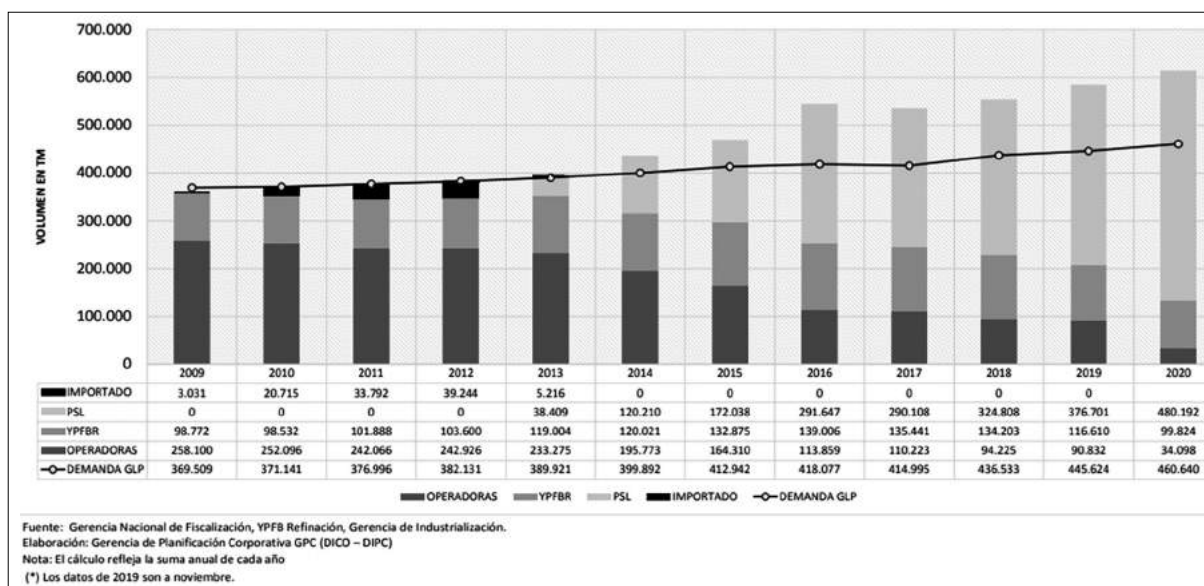
La PSLCV tiene una capacidad de procesamiento de GN de 32,19 MMMCD, seis veces mayor que la nueva planta de Rio Grande, y está diseñada para producir:

- Etano: 3.144 TMD
- GLP: 2.247 TMD
- Isopentano: 1.044 BPD
- Gasolina Natural: 1.658 BPD

Producción Nacional de GLP

Con las nuevas plantas separadoras de líquido de Rio Grande y Carlos Villegas y el aumento de la producción y procesamiento de gas natural, a partir del 2013, se tiene excedentes de producción que son comercializados en el mercado externo.

Figura 7.8 Producción y Demanda de GLP (2009-2019)



Fuente: YPFB, 2021

DEMANDA DE GLP

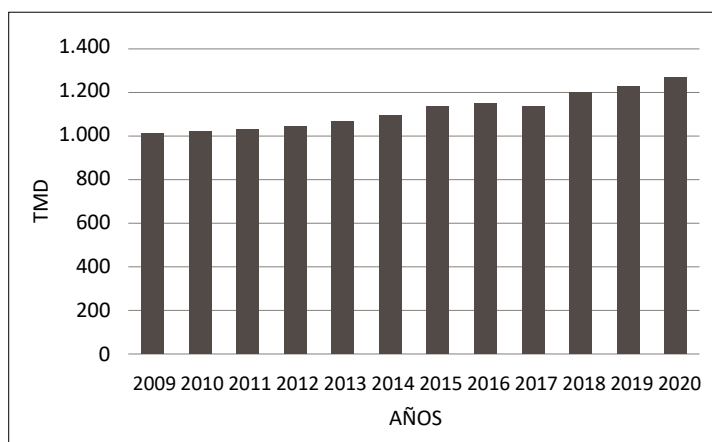
La demanda en el GLP del mercado interno proviene de los sectores industrial, comercial y doméstico. La demanda tiene una tasa de crecimiento moderada de aproximadamente 2%, por la creciente sustitución del GLP por el GN mediante distribución de gas natural por redes.

Tabla 8.1 Comercialización de GLP en Bolivia en TMD (2009-2020)

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1.012	1.017	1.033	1.047	1.068	1.096	1.131	1.145	1.137	1.196	1.221	1.262

Fuente: YPFB, 2021

Figura 8.1 Comercialización de GLP en Bolivia en TMD (2009-2020)

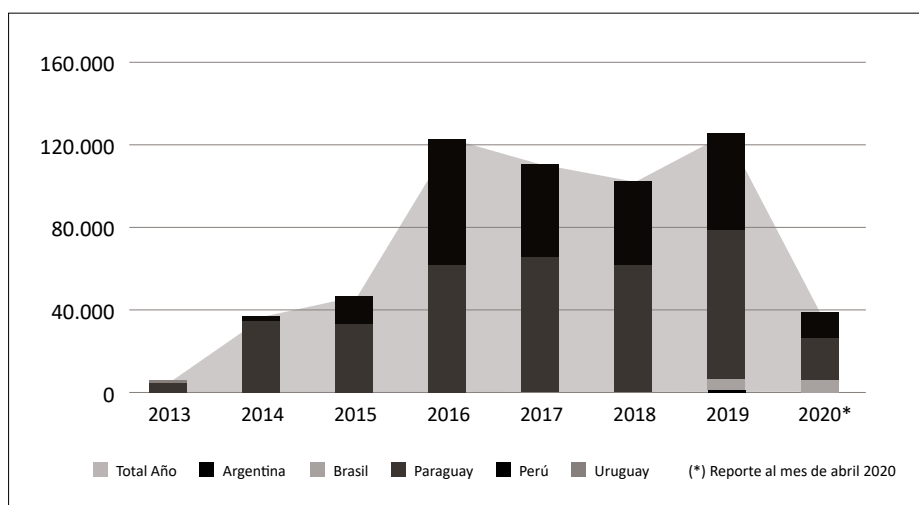


Fuente: YPFB, 2021

EXPORTACIÓN DE GLP

Bolivia exporta GLP, desde el 2013, a los mercados de Argentina, Brasil, Paraguay, Perú y Uruguay:

**Figura 9.1 Comercialización GLP Mercado Externo
 Periodo:2013-2020 (TM)**



Fuente: MH, 2020

Para este estudio se toma como referencia la exportación de GLP del año 2018, por ser un año de operación estable en comparación con los años 2019 y 2020 afectados por la pandemia del Covid-19.

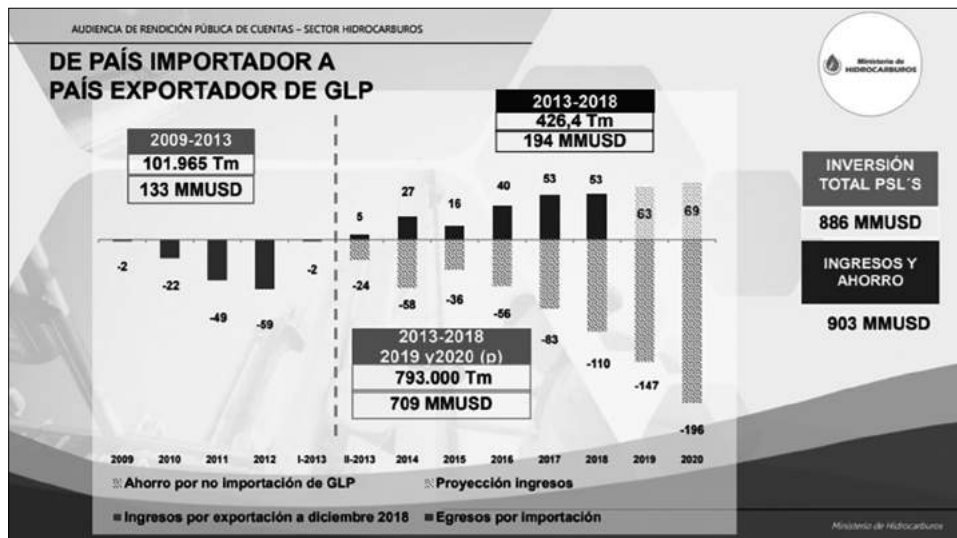
Según informe del MH durante la gestión 2018 se exportó 102.527 TM de GLP a los países vecinos, por lo cual YPFB recibió un ingreso de 53.000.000 dólares estadounidenses:

Tabla 9.1 Exportación de GLP Periodo 2013-2020 (TM)

Año	Argentina	Brasil	Paraguay	Perú	Uruguay	Total Año
2013			5.424		-904	6.328
2014			34.714	2.089	602	37.406
2015			33.574	13.136		46.711
2016			61.867	60.666		122.533
2017			65.765	45.161		110.927
2018	494		61.186	40.847		102.527
2019	2.307	4.623	72.129	46.920		125.981
2020*		7.003	20.130	11.727		38.860

Fuente: MH, 2020

Figura 9.2 Ingresos por exportación de GLP Periodo 2013-2020 (TM)



Fuente: MH, 2020

PRECIOS DEL GLP

Se analizan los precios del GLP.

Precio del GLP en el mercado interno

Las refinерías y las plantas de separación de líquidos comercializan el GLP en el mercado interno al Precio Pre-Terminal (PPT), precio diferenciado según el sector de producción. Para obtener el precio final, hay que sumar al PPT el Margen Almacenaje (Mg Alma), el Margen Mayorista (Mg May), el Margen Minorista (Mg Min) y el IVA. El precio del GLP al consumidor final es 2,25 Bs/Kg equivalente a 1,22 Bs /L(SG:0,54).

Tabla 10.1 Precio del GLP en el Mercado Interno en Bs/kg

Producto	Pr. Pre Terminal Bs/Kg	Mg Alm Bs/Kg	IVA Mg Alm Bs/Kg	Pr. May Bs/Kg	IVA Mg May Bs/Kg	Pr. May Bs/Kg	Mg Min Bs/Kg	IVA Mg Min Bs/Kg	Pr. Min Bs/Kg
GLP Refinerías	1,04	0,31	0,05	0,31	0,05	1,75	0,43	0,06	2,25
GLP PSL	1,19	0,27	0,04	0,27	0,04	1,81	0,38	0,06	2,25

Fuente: ANH, 2020

Precio GLP mercado exportación

Se describen precios de referencias y de exportación

10.2.1. Precio de referencia (PR).

El precio de venta del GLP para el mercado de exportación se determina, tomando como base el PR de la cotización semanal de Precio Internacional Mont Belvieu (MB) publicado por el platt's, más un adicional(premio) por costos de logística y suministro de parte del proveedor.

El producto es exportado desde la Planta de Separación de Líquidos "Carlos Villegas", ubicada en la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija.

Por ser el GLP un subproducto del procesamiento del gas natural y el petróleo, la evolución del PR internacional Mont Belvieu es dependiente de las variaciones de precio de estos productos:

Figura 10.1 Mont Belvieu, TX Propane Spot Price FOB
 Periodo:1994-2020 (USD/GUS)



Fuente: EIA

Precio de exportación YPFB

Según documentos base de selección de compradores de GLP(YPFB) se tienen las especificaciones siguientes para las exportaciones de GLP:

- **Modalidad de entrega:** FCA (Incoterm 2010) Planta Separadora de Líquido
- **Punto entrega:** Planta Separadora de Líquidos
- **Calidad GLP:** Según DS 1499
- **Unidad de medición:** Toneladas Métricas (TM)
- **Precio de referencia:** Precio Internacional Mont Belvieu(MB) publicado por el platt's
- **Precio Base**

$$\text{Precio Base: } MTB \left(\frac{\text{US\$}}{\text{TM}} \right) = (60\% * C3 * 5,21 + 40\% * C4 * 4,53) \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

C3: Precio promedio de las cotizaciones "bajas" y "alta" efectivas de lunes a viernes en CPG

C4: Precio promedio de las cotizaciones "bajas" y "alta" efectivas de lunes a viernes en CPG

Para el año 2018 se determina el precio de exportación unitario de GLP(\$US/TM), para lo cual se toma la información del MH sobre los ingresos anuales recibidos (US\$/Año) el volumen exportado (TM/Año):

Tabla 10.2. **Precio GLP Mercado Exportación**

Precio Promedio GLP Exportación 2018		
Exportación	Ingresos	Precio Unitario
TM/Año	\$US/Año	\$US/TM
102.527	53.000.000	517

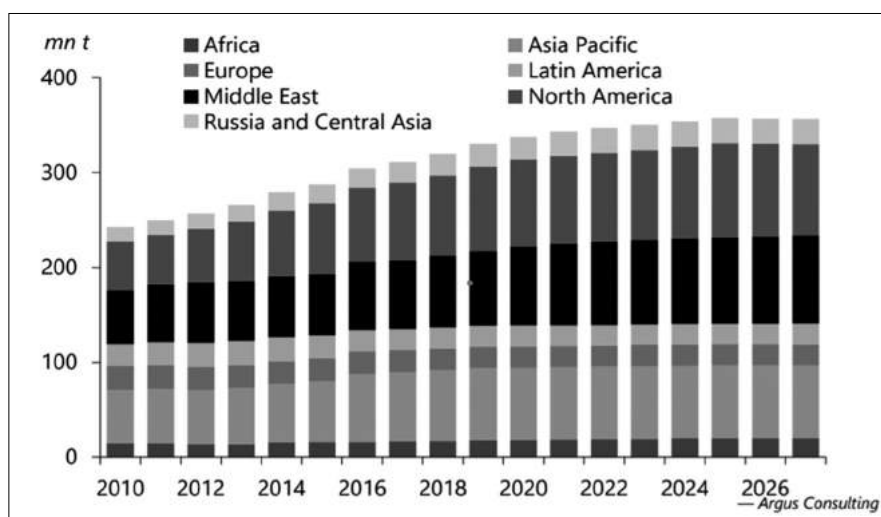
Fuente: Elaboración Propia

OFERTA Y DEMANDA MUNDIAL DE GLP

Se describe la producción y demanda por regiones.

Producción mundial por regiones

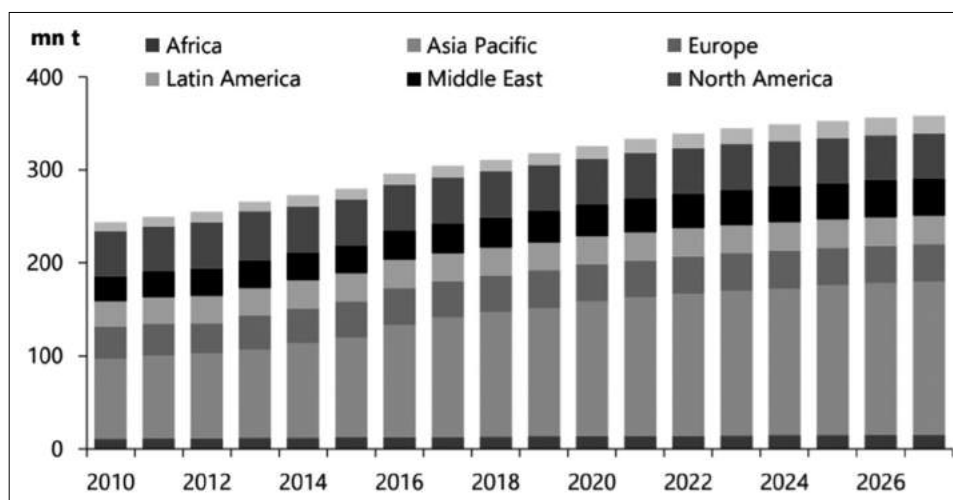
Figura 11.1 Global LPG Production by Region, 2010-27 (MMTM)



Fuente: Argus.org/aiglp, 2018

Demanda mundial por regiones

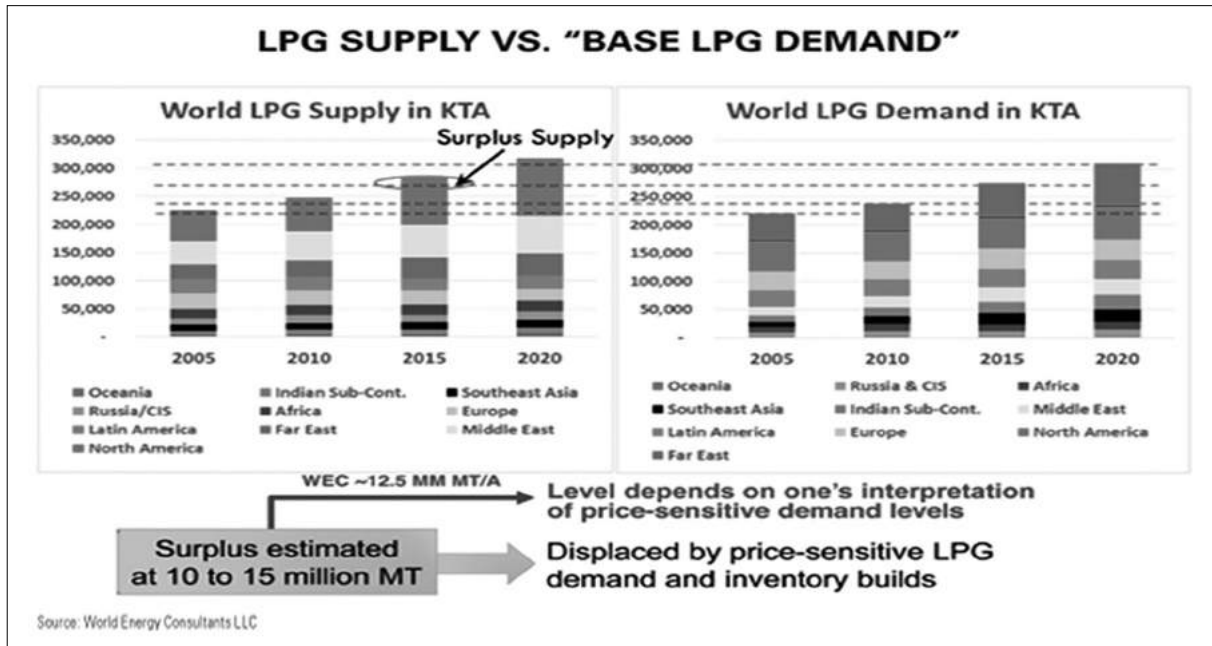
Figura 11.2 Global LPG Consumption by Region, 2010-27 (MM TM)



Fuente: Argus.org/aiglp, 2018

Producción y demanda mundial por regiones

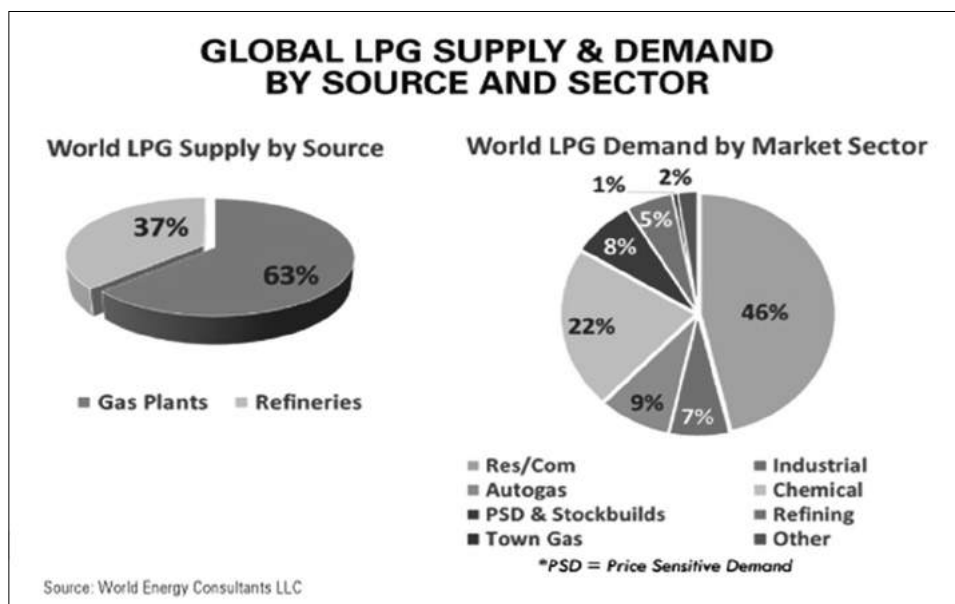
Figura 11.3 Oferta y Demanda Mundial de GLP (KTA)



Fuente: bpnews, 2016

Oferta y demanda mundial de GLP

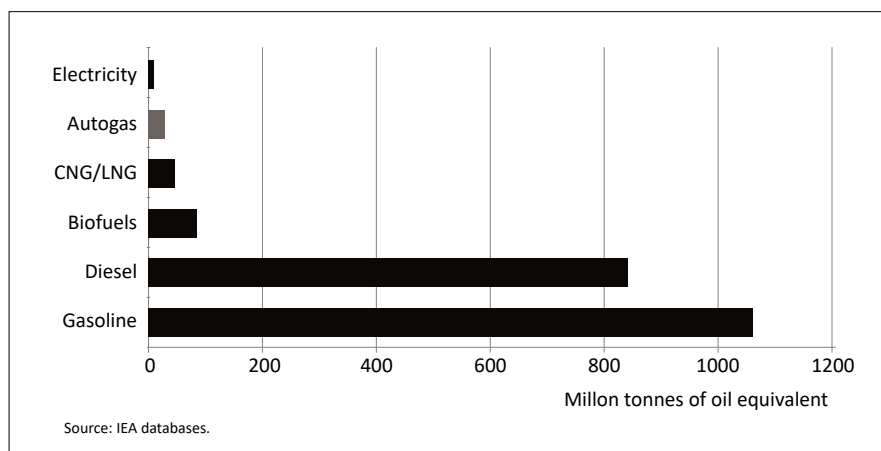
Figura 11.4 Oferta y Demanda Mundial de GLP (%)



Fuente: bpnews, 2016

Consumo mundial de energía en el sector transporte por carretera

Figura 11.5 Consumo Mundial de Energía en el Sector Transporte por Carretera



Fuente: wlpga, 2021

Consumo Mundial de GLP en Vehículos por Países

Tabla 11.1 Consumo Mundial de GLP en Vehículos por Países

Country	Consumption (thousand tonnes)	Vehicles (thousands)	Refuelling sites
Turkey	3 283	4 696	10 390
Russia	3 150	3 000	4 900
Korea	3 093	2 053	1 964
Poland	1 835	3 135	7 432
Ukraine	1 638	2 250	5 000
Italy	1 615	2 410	4 120
Mexico	1 293	420	2 150
Thailand	1 170	982	1 850
China	750	160	560
Japan	717	183	1 404
<i>Rest of the World</i>	<i>7 762</i>	<i>7 699</i>	<i>40 924</i>
World	26 245	26 987	80 694

Fuente: wlpga, 2021

Nómina de Países de América que Utilizan GLP en Automotores

Argentina, Canadá, Chile, Colombia, Estados Unidos, México, Paraguay Perú, Uruguay.

Precios GLP Automotor

Tabla 11.2 Precios de GLP Automotor

Precios del autogas, 19-jul-2021 (litro, U.S. Dollar)	
País	Precio
Bolivia	0,170
Paraguay	0,554
Perú	0,599
Chile	0,683
Canadá	0,702
Corea del Sur	0,798
Alemania	0,841
Reino Unido	0,902
Grecia	1,000
Francia	1,028

Fuente: Globalpetrolprices, 2021

EL GLP COMO COMBUSTIBLE AUTOMOTOR

Se describen características físicas.

Composición del GLP

El GLP es una mezcla de propano y butano que se obtiene del procesamiento del gas natural y petróleo y se almacena en estado líquido a temperatura ambiente y a presión relativamente baja (7 bar). Su valor energético está en función de la composición de la mezcla propano butano.

Poder Calorífico Inferior del GLP

El poder calorífico inferior (PCI) del GLP es similar al de la gasolina y GNV.

- GLP: 10.990 Kcal/Kg (SG;0,54)
- GNV: 11.259 Kcal/Kg
- GASOLINA: 10.510 Kcal/Kg (SG:0,68)

Su densidad baja del GLP da lugar a una densidad de energía por unidad de volumen reducida. Un volumen dado de GLP contiene menos energía que el mismo volumen de gasolina.

Punto de inflamación del GLP

El GLP tiene un punto de inflamación (-107,5C) inferior al de la gasolina (-46 C) por lo que se lo considera más inflamable que ésta.

Conversión de Vehículos de Gasolina a GLP

Los vehículos a gasolina pueden ser adaptados para que funcionen con GLP, mediante la instalación de dispositivos denominados Kits, que permiten al vehículo funcionar con gasolina o GLP, usando un combustible a la vez, no mezclados, que se puede cambiar de combustible estando el vehículo en funcionamiento.

Vehículos que pueden ser Convertidos a GLP

Los vehículos a gasolina (EURO 3 en adelante) con la instalación adicional del KIT de conversión.

Componentes del KIT de Conversión a GLP

Estos son:

- Tanque de GLP
- Unidad de control electrónico (ECU: Electronic Control Unit)
- Interruptor
- Evaporador
- Filtro
- Inyectores

Procedimiento de Encendido de los Vehículos de GLP

Los vehículos que utilizan gasolina y GLP son denominados Bi-Fuel. El encendido siempre se realiza con gasolina hasta que el agua refrigerante alcance la temperatura deseada y permita la evaporación del GLP. Estos vehículos tienen instalados dos tanques de combustible, uno de gasolina y otro de GLP.

Adquisición de Vehículos Bi-Fuel directamente del fabricante

Los vehículos Bi-Fuel a Gasolina y GLP, pueden ser adquiridos directamente de fábrica y en este caso, no es necesario realizar transformación alguna.

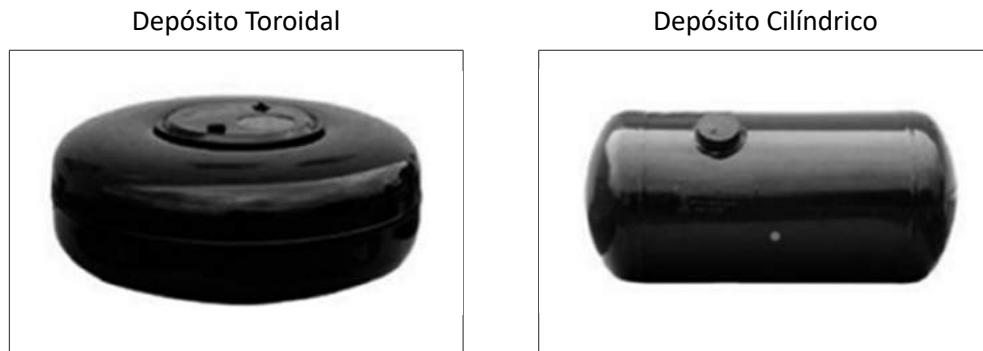
12.9. Características del Tanque de GLP de un Vehículo Convertido

Los tanques de GLP trabajan a presiones bajas (7 bar). Son fabricados de acero, con menor espesor de chapa del cuerpo y cabezales. Por lo tanto, son de menor peso, haciendo que la instalación del sistema de GLP sea más económica que su similar de GNV, que trabajan a mayor presión (200 bar). Los tanques son contruidos de acuerdo con la norma ASME Sección VIII División I.

Según la norma de la Secretaría de Energía de Argentina, GLP Automotor - Res. SE 131/2003(18), la capacidad máxima de llenado en volumen de GLP no será superior al 80%, para evitar sobrepresión por dilatación del líquido por efecto de la temperatura. El combustible en estado líquido se dilata aproximadamente el 2% por cada incremento de 10 °C de temperatura. Al tener un espacio en volumen de 20% en fase vapor, cualquier dilatación del líquido comprime la fase gaseosa y no compromete esfuerzos sobre la pared del tanque.

Cada tanque tendrá un indicador de nivel de líquido y dispositivo automático de corte al 80% de la capacidad del recipiente.

Figura 12.1 Tanques de GLP



Fuente: gencat.cat, 2014

Capacidad Típica de los Tanques Toroidales de GLP

Según gascomb, los tanques tienen una capacidad entre 32 ñitros a 120 litros.

Instalación Tanque de GLP

En el lugar de la rueda de repuesto, siempre que este espacio sea suficiente. Si el depósito es cilíndrico se instala en el maletero.

Emisión Gases de Escape Vehículos Convertidos a GLP

Los gases de escape de los motores de combustión interna que funcionan con GLP emiten al medio ambiente , una cantidad menor de dióxido de carbono (CO_2) y cantidad de óxidos de nitrógeno (NO_x) menor, por lo tanto, son menos contaminantes. El GLP emite 13% menos de CO_2 de carbono que la gasolina.

Tabla 12.1. Libras (Lb) de CO_2 emitidas por MM de BTU

Carbón (antracita)	228,6
Carbón (bituminoso)	205,7
Carbón (lignito)	215,4
Carbón (subbituminoso)	214,3
Combustible diesel y aceite de calefacción	161,3
Gasolina (sin etanol)	157,2
Propano (GLP)	139,0
Gas natural	117,0

Fuente: EIA, 2021

CO₂ (en kilogramos) que emiten los Combustibles GLP y Gasolina

Según la Agencia de Energía (EIA) de Estados Unidos de América, un litro de gasolina emite 2,35 Kilogramos de CO₂ y un litro de GLP emite 1,64 Kilogramos de CO₂:

Tabla 12.2 Emisiones de Dióxido de Carbono de Combustibles

Carbon Dioxide Emissions Coefficients by Fuel						
Carbon Dioxide (CO2) Factors:	Pounds CO2		Kilograms CO2		Pounds CO2	Kilograms CO2
	Volume or Mass		Volume or Mass		Million Btu	Million Btu
	For homes and businesses					
Propane	12,70	gallon	5,76	gallon	139,05	63,07
Butane	14,80	gallon	6,71	gallon	143,20	64,95
Butane/Propane Mix	13,70	gallon	6,21	gallon	141,12	64,01
Home Heating and Disel Fuel (Distillate)	22,40	gallon	10,16	gallon	161,30	73,16
Kerosene	21,50	gallon	9,75	gallon	159,40	72,30
Coal (All types)	4.631,50	short ton	2.100,82	short ton	210,20	95,35
Natural Gas	117,10	thousand cubic feet	53,12	thousand cubic feet	117,00	53,07
Gasoline	19,60	gallon	8,89	gallon	157,20	71,30
Residual Heating Fuel (Businesses only)	26,00	gallon	11,79	gallon	173,70	78,79
Source: U.S. Enetgy Information Administration estimates. Note: To convert to carbon equivalents multiply by 12/44. Coefficients may vary slightly with estimation method and across time.						

Fuente: EIA

Se presentan las emisiones de dióxido de carbono por litro de combustible consumido, mostrando que el GLP emite un 30% menos de CO₂ que la gasolina.

$$\text{Butane/Propane Mix} / 6,21 \frac{\text{Kg}}{\text{GUS}} * \frac{\text{GUS}}{3,785\text{L}} = 1,64 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{L}} \quad \text{ecuación 2}$$

$$\text{Gasoline} / 8,89 \frac{\text{Kg}}{\text{GUS}} * \frac{\text{GUS}}{3,785\text{L}} = 2,35 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{L}} \quad \text{ecuación 3}$$

Octanaje del GLP

El octanaje del GLP es superior al de la gasolina (100 RON - 110 RON), calidad antidetonante que garantiza el funcionamiento adecuado del motor de combustión interna.

Repostaje de GLP

El GLP se recarga al vehículo en estado líquido, en estaciones de servicio (EESS) mediante dispensadores similares a los de otros combustibles, con su respectivo medidor volumétrico y válvula de exceso de flujo. La válvula de exceso de flujo corta o limita el flujo de combustible, cuando el mismo excede un

valor de ajuste. Normalmente estas válvulas están calibradas para actuar cuando el caudal sobrepase el 10% del caudal normal de funcionamiento.

Consumo de GLP Vs. Consumo de Gasolina

Un vehículo a GLP registra un mayor consumo de combustible, aproximadamente, un 22% superior al de la gasolina. Esto se debe a su menor poder calorífico por unidad de volumen de GLP con relación a la gasolina.

- Gasolina: 116.000 BTU/gal
- GLP: 92.000 BTU/gal

Costo de Conversión Vehículo de Gasolina a GLP

Según Highmotor (2021), el costo del Kit de conversión está entre 1.500 Euros y 3.000 Euros y el costo depende del tipo de vehículo y del tipo de inyección.

Seguridad de los Vehículos Convertido a GLP

El GLP esta almacenado en fase liquida en un tanque completamente hermético y presurizado, lo que limita el peligro de fugas. La gasolina es propensa a fugas porque está almacenada en fase líquida en un tanque no hermético. El tanque de GLP es fabricado de acero de alta resistencia, siendo capaz de soportar presiones externas de hasta 30 bares. Es más resistente que el tanque de gasolina al esfuerzo externo. Por cuestiones de seguridad, el tanque solamente se llena a un 80% de su volumen total.

El GLP es el combustible alternativo que más se utiliza en el mundo, entre otros países en Argentina, Colombia, Chile y Perú, siguiendo normas de instalación homologadas y certificadas que garantizan una operación segura.

Vehículos que utilizan GLP en el Mundo

En la actualidad, hay más de 27 millones de vehículos de GLP en uso en todo el mundo, casi cuatro veces más que en el año 2000.

Inversión de la conversión de vehículos a GLP

Al tener el GLP menor precio que la gasolina, el ahorro en combustible se considera un beneficio que a corto plazo permite a los usuarios recuperar la inversión realizada en la adquisición del KIT de conversión.

Características de un vehículo convertido a GLP

Estas son de:

- Mantiene un sistema de inyección en paralelo, gasolina y GLP.
- La gasolina se inyecta al motor en fase liquida y el GLP en fase Gaseosa.
- Al disponer de dos combustibles se aumenta la autonomía del vehículo.

Consumo Promedio de GLP por cada 100 kilómetros de Recorrido

El consumo de GLP por cada 100 kilómetros es de 9,20 litros promedio, por lo que con un litro de GLP se recorre 11 kilómetros.

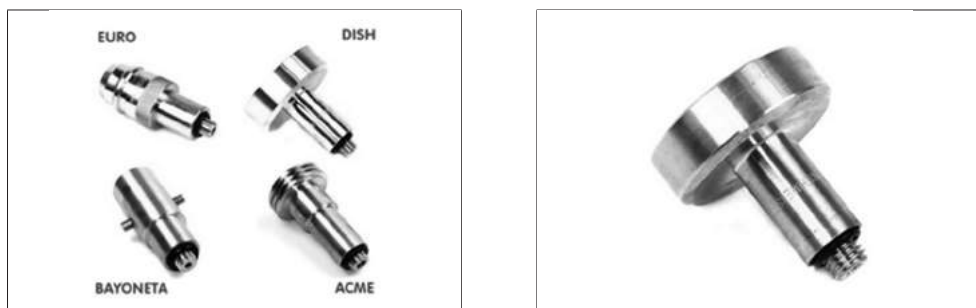
Operación de Repostaje o Recarga de GLP al Vehículo

La operación de llenado del depósito del vehículo es similar a la de un vehículo con gasolina. La mayor diferencia es que debe atornillarse un adaptador a la toma de llenado del depósito para poder así fijar a presión la manguera, asegurando su estanqueidad. La manguera de suministro el GLP está colocada en el mismo poste que el resto de los combustibles.

Los vehículos convertidos a GLP incorporan una segunda toma con una boquilla o un adaptador, situada junto a la boca de llenado del depósito de gasolina. La conexión de la pistola de la manguera del surtidor a la boquilla es una operación fácil que no requiere más esfuerzo que repostar gasolina, y los tiempos de repostaje también son similares.

Adaptadores o Boquillas que se Utilizan para la Recarga de GLP

Figura 12.2 Adaptadores de GLP



Fuente: glpautogas

El Adaptador ACME, es el más común en Latinoamérica. Se utiliza en Argentina, Chile, Colombia, México, Paraguay, Uruguay y Estados Unidos de América, así como en países europeos como Austria, Alemania, Bélgica, Irlanda, Suiza o Reino Unido.

Taller de Conversión de Vehículos a GLP

Taller de mecánica automotriz, que cuenta con infraestructura, equipos, máquinas, capacidad técnica, operativa y administrativa, para la conversión de vehículos de gasolina a GLP, autorizado por autoridad competente.

Taller de Recalificación de Cilindros o Depósitos GLP

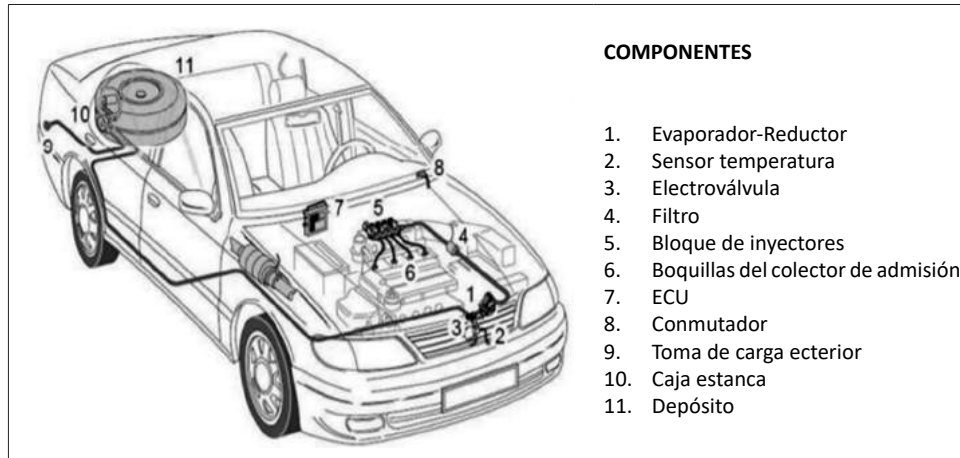
Taller de mecánica automotriz, autorizado para la inspección externa e interna, prueba hidráulica y terminado de tanques o depósitos de GLP de vehículos convertidos y la emisión de certificado, que acredita que el cilindro cumple con las normas de funcionamiento correspondiente.

Kit de Conversión de Vehículos de Gasolina a GLP

Conjunto de partes o elementos a instalarse en un vehículo, que se adaptan al sistema de combustión original para el uso de GLP.

Se presentan los componentes del Kit de conversión GLP.

Figura 13.1 Componentes Kit de Conversión GLP



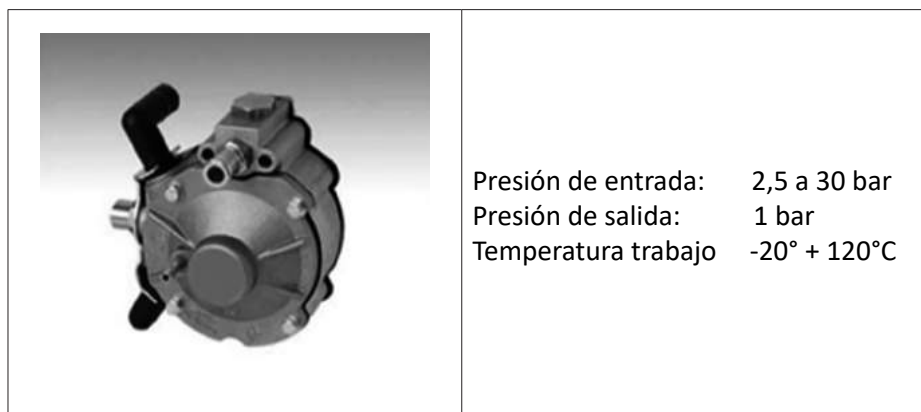
Fuente: transvegas

Evaporador -Reductor

Sus funciones son:

- El GLP llega al Evaporador- Reductor en estado líquido por tuberías de alta presión y sale en estado gaseoso por tuberías de baja presión.
- Cambia de estado líquido a gaseoso el GLP y, para ello, se utiliza intercambio de calor con el circuito de agua de refrigeración del vehículo.

Figura 13.2 Evaporador-Reductor



Fuente: glpautogas, 2018

Sensor de Temperatura

- Toma la temperatura del agua del circuito para determinar el paso del vehículo a modo GLP.

Figura 13.3 Sensor de temperatura



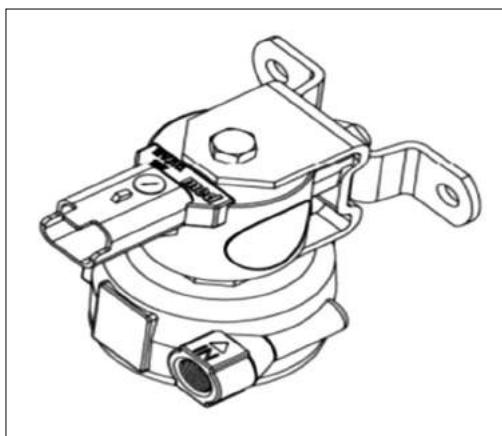
Fuente: glpautogas, 2018

Electroválvula de Corte

Sus funciones son:

- Se coloca junto al reductor para cortar el paso de GLP en estado líquido al sistema.
- Por normativa y seguridad, ante cualquier imprevisto cierra el paso de gas.

Figura 13.4 Electroválvula de corte

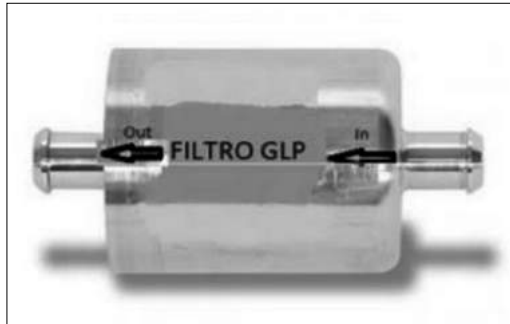


Fuente: glpautogas, 2018

Filtro de GLP

- Filtro a presión baja para eliminar impurezas del GLP en estado gaseoso antes de llegar a los inyectores.

Figura 13.5 **Electroválvula de corte**



Fuente: glpautogas, 2018

Bloque de Inyectores

Sus funciones son:

- Llega ya el gas en estado gaseoso y los inyectores mandan la cantidad correcta de gas en cada cilindro.
- Incluye una sonda de temperatura y otra de presión para controlar dichos valores antes de inyectar el gas en el colector e informar a la ECU.

Figura 13.6 **Bloque de Inyectores**



Fuente: glpautogas, 2018

Boquillas del Colector de Admisión

Sus funciones son:

- Van colocadas en el colector de admisión, lo más cercanas posible a la cámara de combustión y por ellas entra el GLP en estado gaseoso.
- Están unidas al rail de inyectores por tubería flexible, entrando por la parte A.
- La parte B es la que se une al colector de admisión.

Figura 13.7 Boquillas del colector de admisión



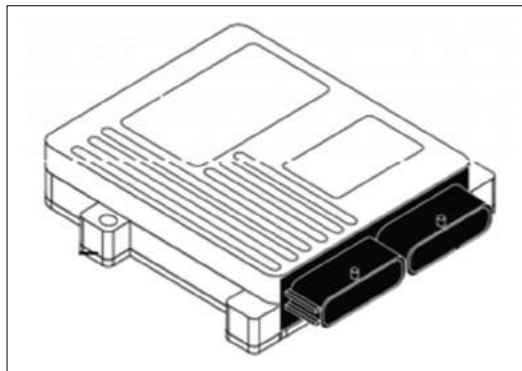
Fuente: glpautogas, 2018

Centralita Electrónica (ECU: Electronic Control Unit)

Sus funciones son:

- Recibe y gestiona la señal de diferentes sensores y es la encargada de controlar la relación estequiométrica de gas/aire a inyecta.
- También se encarga de emular las señales para informar a la ECU del vehículo de gasolina que no hay ninguna avería, aunque el vehículo vaya a GLP.

Figura 13.8 ECU



Fuente: glpautogas, 2018

Conmutador

Sus funciones son:

- Permite pasar el vehículo indistintamente a GLP o Gasolina, según nuestra preferencia.
- El sistema está en automático y cambia automáticamente al llegar a la temperatura necesaria.
- Indica mediante leds u otros, el nivel de carburante en el depósito.
- Avisa acústicamente de averías y falta de GLP en el depósito.

Figura 13.9 Conmutador



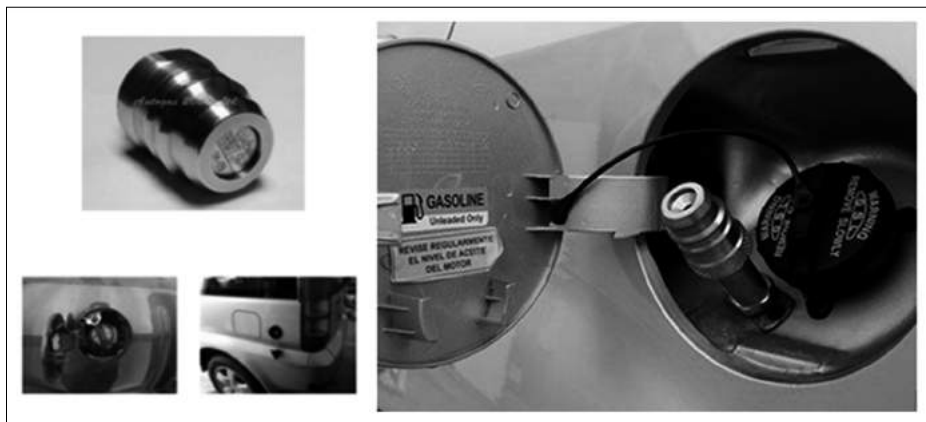
Fuente: www.glpautogas.info

Toma de Carga Exterior

Sus funciones son:

- En España se utiliza la toma estándar europea, que en ocasiones puede ir integrada en la trampilla de la toma de gasolina, si hay espacio suficiente.
- Está dotado de una válvula antirretorno.
- Se puede colocar en una toma externa complementaria a la de gasolina.
- En ocasiones, puede ir integrada en la trampilla de la toma de gasolina. Si no hay espacio suficiente se utiliza el adaptador de carga europeo.

Figura 13.10 Toma de Carga Exterior



Fuente: glpautogas, 2018

Caja Estanca

Sus funciones son:

- Tiene como finalidad proporcionar estanqueidad al sistema.
- Cubre la válvula o válvulas del depósito de GLP.
- Es muy importante que este elemento sólo sea manipulado por personas autorizadas para garantizar la eficiencia de uso.

Figura 13.11 Caja estanca



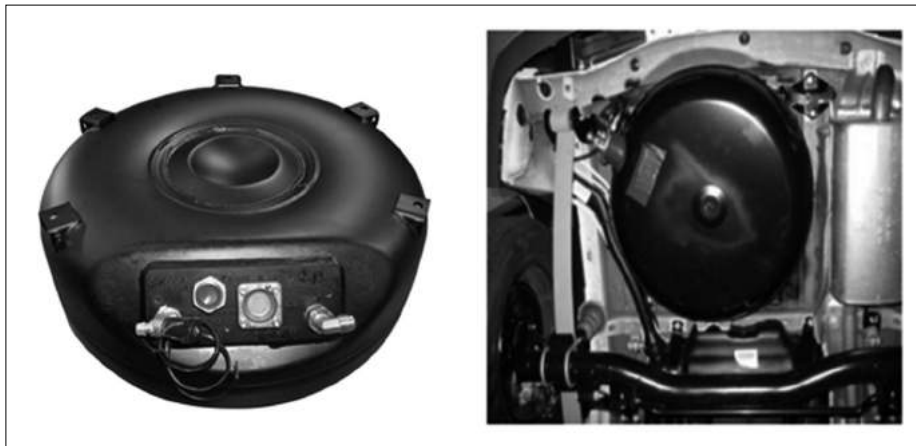
Fuente: glpautogas, 2018

Deposito GLP

Sus funciones son:

- Almacena el GLP en estado líquido.
- De forma visible debe llevar grabada la información siguiente.
 - ✓ N.º de serie
 - ✓ Capacidad en litros y dimensiones
 - ✓ Inscripción GLP
 - ✓ Presión de prueba
 - ✓ Frase: "llenado máximo 80%"
 - ✓ Número de homologación
 - ✓ Fecha de producción

Figura 13.12 Deposito GLP



Fuente: glpautogas, 2018

NORMATIVA RELACIONADA CON EL USO DE GLP

Normativa Nacional

Se detallaron leyes y decretos:

- Ley de Hidrocarburos No. 3058, 17 de mayo de 2005.
- Ley del Medio Ambiente No. 1333, 27 de marzo de 1992.
- Decreto Supremo No. 24176, de 8 de diciembre de 1995, que reglamenta la Ley del Medio Ambiente No. 1333.
- Ley de Derechos de la Madre Tierra No. 71, 21 diciembre de 2010.
- Ley General del Transporte No. 821, 16 de agosto de 2016.

- Resolución Ministerial No. 450 de 30 de noviembre de 2017, “Reglamento para la emisión de las Autorizaciones Previas para vehículos automotores nuevos”
- Decreto Supremo No. 2427A de 23 de julio de 1997, Reglamento para Construcción y Operación de Plantas de Engarrafado de Gas Licuado de Petróleo (GLP).
- Decreto Supremo 28380 de 05 de octubre del 2005, que establece mecanismos que impiden el uso de GLP como combustible en vehículos y prohíbe, la instalación y operación de talleres de conversión.
- Decreto Supremo 0675 del 23 de octubre del 2010, que crea una Entidad Ejecutora de Conversión de GNV y en su Disposición Transitoria Tercera, reitera la prohibición del uso de GLP en automotores.
- Decreto Supremo reglamentario que establece los parámetros técnicos de conversión de vehículos de gasolina a GLP y construcción y operación de estaciones de servicio de GLP.

Normativa Internacional (última edición vigente)

Se detallaron normas internacionales:

- Reglamento No. 67 de la Comisión Económica para Europa (CEPE)
- NFPA 10 (“Standard for Portable Fire Extinguishers”).
- NFPA 15 (“Standard for Water Spray Fixed Systems”).
- NFPA 30 (“Flammable and Combustible Liquids Code”).
- NFPA 30A (“Code for Motor Fuel Dispensing Facilities and Repair Garages”).
- NFPA 58 Código de gas licuado de petróleo.
- NFPA59 Código de planta de gas LP de servicios públicos.
- Estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA).
- ASME BPVC Section VIII, Division 1 (“ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessel”).
- Normas API 2510 y API 2510A.
- Normas anticontaminantes Euro.
- Normativa Técnica Europea (ETN, por sus siglas en inglés).
- NFPA 70 (“National Electrical Code, NEC”).
- 49 CFR 100 – 185 (“Title 49 – Transportation, Subtitle B -Other Regulations Relating to Transportation, Chapter 1 –Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Department of Transportation, Subchapter A – Hazardous Materials and Oil Transportation”).
- US standard ASTM D 1835-97. Especificaciones para gases licuados de petróleo.
- European Standard EN 589: 2018 - Combustibles de automoción - GLP - Requisitos y métodos de ensayo.
- Japan Industrial Standard, JIS K 2240, 13a edición, 20 de octubre de 2017 – Gases.
- BS EN 12806: 2003. Componentes de gas licuado de petróleo para automoción. Aparte de los contenedores.

Normativa países que utilizan GLP en automotores

Se presenta la normativa para los siguientes países: Argentina, Canadá, Chile, Colombia, México, Paraguay, Perú, Uruguay, Estados Unidos de América, Australia, España. Alemania.

Tabla 14.1 Normativa de GLP

Norma (país)	Objeto de la Norma
DECRETO SUPREMO No. 01997EM (Perú)	Reglamento de Establecimientos de Venta de Gas Licuado de Petróleo para Uso Automotor -Gasocentros-, que consta de nueve (9) títulos, ocho (8) capítulos, ciento veintiún (121) artículos, seis (6) disposiciones complementarias y dos (2) disposiciones transitorias, que forma parte integrante de este Decreto Supremo
Resolución 131/2003 (Argentina)	Normas Técnicas y de Seguridad para GAS LICUADO DE PETROLEO AUTOMOTOR (GLPA) que, como ANEXOS I, II, III, IV y V, forman parte de la presente Resolución, que funcionarán bajo la órbita de la SUBSECRETARIA DE COMBUSTIBLES dependiente de la SECRETARIA DE ENERGIA.
Norma Chilena NCh2102-2004 (Chile)	Requisitos mínimos de seguridad que debe cumplir un sistema para el uso de gases licuados de petróleo (GLP) como combustible de vehículos motorizados.
Ley No. 1753 del 2015 (Colombia)	Requisitos, obligaciones y parámetros de calidad del Gas Licuado del Petróleo (GLP) en uso como carburante en motores de combustión interna en medios de transporte automotor (Auto GLP y Nauti GLP).
LEY No. 2639/2005 (Paraguay)	Reglamenta la carga de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en vehículos automotores y garrafas de uso doméstico en las estaciones de servicio.
US Standard ASTM D1835-97 (USA)	Valores máximos permisibles en las propiedades de gases licuados de petróleo como propano, butano y la mezcla entre ellos.
European standard EN589 (Países Europeos)	Valores límites en las propiedades fisicoquímicas del gas licuado de petróleo para uso vehicular.
BS EN 12806:2003 (Inglaterra)	Regulación sobre los componentes a partir de parámetros de diseño y requerimientos a partir de ensayos
Japan Industrial standards K2240-91 (Japón)	Límites de componentes en el GLP dados por la clase numero dos para aplicaciones industriales y en automóviles. La clase número uno es para GLP en uso residencial y comercial.
BS EN 12979:2002 (Inglaterra)	Requisitos para la instalación de componentes de sistemas de GLP vehicular, guiados a garantizar la seguridad de la operación de los componentes incluyendo componentes mecánicos.

Fuente: Elaboración Propia

ANÁLISIS FODA PARA LA CONVERSIÓN DE VEHÍCULOS DE GASOLINA A GLP

Se describe el análisis FODA:

FORTALEZA	DEBILIDADES
- Poder calorífico alto. - Octanaje (RON) superior a 100. - Seguridad de uso. - Suficiente capacidad instalada y excedentes de producción en las plantas separadoras de líquidos para producción de GLP. - Facilidad de transporte por red de oleoductos, poliductos y cisternas. - Experiencia en los procesos de producción, transporte y comercialización del GLP. - Precio de venta menor que la gasolina especial. - Potencia del motor mayor con relación al GNV. - Reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente. - Tanques de GLP con aceros de menor espesor que los tanques de GNV. Por lo tanto, son más livianos y de menor costo. - Ahorro económico para los usuarios de GLP. - Costo de conversión bajo de los motores ciclo otto para funcionar con GLP. - Autonomía doble (Gasolina +GLP) - Recarga inmediata en las EESS, similar a la gasolina. - Costo de mantenimiento de vehículos menor.	- No se tiene estaciones de servicio (EESS) de GLP. - Nivel bajo de reservas de hidrocarburos. - Nivel bajo de producción hidrocarburos líquidos y gaseosos. - Operación de las PSL y refinerías por debajo de su capacidad instalada. - Costos mayores de producción. - Falta de experiencia en el manejo de dispensadores de GLP. - Necesidad de realizar inspecciones periódicas de los envases de GLP. - Tanque de GLP que reduce el espacio del maletero. - El GLP en estado gaseoso es un gas más pesado que el aire, y, por tanto, en caso de fuga o escape, tendera a acumularse en las partes más bajas de la instalación. - Potencia del motor menor con relación a la gasolina. - Consumo de GLP mayor que gasolina para el mismo recorrido.
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
- Sustitución segura y económica del combustible gasolina por GLP. - Disminución de los volúmenes de importación de gasolina automotor. - Posibilidad de comercializar un combustible poco contaminante. - Disminución de las emisiones de Dióxido de carbono al medio ambiente.	- Posibilidad de mal uso de GLP en garrafas como combustible para vehículos automotores lo cual no está permitido, dada la peligrosidad que conlleva para la seguridad de los ocupantes o pasajeros, conforme lo establece la Resolución Ministerial N° 009/2002 de 14 de octubre de 2002, aprobada por el Ministerio de Hidrocarburos y Energía, ver Decreto Supremo No 28380(DS 28380). - Restricciones ambientales a nivel mundial con relación al cambio climático (limitación de contaminantes y gases de efecto invernadero) - Desarrollo acelerado de energías limpias.

VIABILIDAD LEGAL CONVERSIÓN DE VEHÍCULOS DE GASOLINA A GLP

- El Decreto Supremo 28380 de 05 de octubre del 2005, establece mecanismos que impiden el uso de GLP como combustible en vehículos y prohíbe, la instalación y operación de talleres de conversión.
- Para la viabilidad legal del proyecto de uso de Gas licuado de Petróleo Automotor (GLPA), se debe revisar los antecedentes que dieron lugar a su prohibición, considerar la situación actual, los excedentes de producción de GLP, aspectos de seguridad, abastecimiento al mercado interno, disminución de la contaminación por menor emisión de CO₂, contribución a la reducción de efecto invernadero, seguridad energética nacional y aprobar nueva norma legal que permita el uso de GLP en automotores de combustión interna.
- Para la viabilidad del proyecto de conversión de vehículos de gasolina a GLP, se debe normar la construcción y operación de nuevas estaciones de servicio y todo lo relacionado al sistema de talleres de conversión.

VIABILIDAD AMBIENTAL CONVERSIÓN DE VEHÍCULOS DE GASOLINA A GLP

- La viabilidad ambiental está determinada por el cumplimiento de los límites máximos de las emisiones para vehículos de gasolina y convertidos a GLP establecidos en la legislación nacional e internacional.
- En general, las emisiones de los vehículos están compuestas por:
 - ✓ **Dióxido de carbono (CO₂).** Gas inerte, que se genera a partir de la combustión.
 - ✓ **Vapor de agua:** Se genera por la evaporación del agua.
 - ✓ **Monóxido de carbono (CO).** Producido por los compuestos del carbono, y cuando se oxida produce el dióxido de carbono.
 - ✓ **Hidrocarburos no quemados (HC).** Emisiones de Hidrocarburo provenientes de una combustión mala de componentes del petróleo.
 - ✓ **Óxidos de Nitrógeno (NOx).** Se da producto de la combustión de fósiles, causado por los vehículos en particular generando emisiones de NOx.
 - ✓ **Óxidos de azufre (SOx).** Produce una lluvia ácida y disminuye la visibilidad, a causa de la combustión del azufre en el carbón y el petróleo.
- El GLP se considera un combustible alternativo de transición en el objetivo de disminuir la contaminación de aire urbano y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), debido a que durante la combustión emite cantidad menor de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx).
- El GLP tampoco contiene plomo, azufre ni hidrocarburos aromáticos.
- El GLP es un combustible limpio, no emite material particulado (PM), en comparación con la gasolina y el diésel.
- La reducción de las emisiones de CO₂ con el uso de GLP en automotores, siempre será pequeña si la comparamos con el uso de hidrógeno(H₂) en celdas de combustible o vehículos a batería (EV) con energía eléctrica renovable con reducción de emisiones de CO₂ de hasta el 100%.
- La Ley General Del Transporte el Estado Plurinacional de Bolivia No 821 del 16 de agosto del 2016, estableció un plazo de 5 años para adecuar la calidad de los combustibles en el marco de las normas EURO IV o sus equivalentes, precautelando la calidad del aire y el requerimiento de vehículos con menores emisiones de contaminantes, como monóxidos de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (THC) y los óxidos de nitrógeno (NOx).
- Según la norma EURO, se muestran las especificaciones máximas para emisiones de contaminantes expresado en gramos/kilómetro.

Tabla 17.1 Gases Contaminantes Motores a Gasolina-Normas EURO 1-6

Límites de emisiones para vehículos pasajeros						
Etapas	Año	Límite de emisiones (g/km)				
		CO	HC	NOx	PM	PN (1/km)
EURO 1	1992	2,72	0,97	-	-	-
EURO 2	1996	2,20	0,50	-	-	-
EURO 3	2000	2,30	0,20	0,15	-	-
EURO 4	2005	1,00	0,10	0,08	-	-
EURO 5	2009	1,00	0,10	0,06	0,005	-
EURO 6	2014	1,00	0,10	0,06	0,005	6x10 ¹¹

Fuente: imt.mx

Otra versión de la norma EURO es la tabla de la tabla 17.2, donde se muestra el límite de contaminantes en g/KW-h.

- Según la Ley No 821, a partir del 16 de agosto del presente año 2021, determina que, para la importación de vehículos automotores, se deberá cumplir con las Normas de Emisiones Atmosféricas EURO o equivalentes. La Norma de Emisiones Atmosféricas EURO IV (TIER II) o equivalentes y otras posteriores, serán aplicadas una vez que los combustibles producidos e importados por el Estado Plurinacional de Bolivia cumplan con la calidad exigida por estas Normas. Entre tanto, solamente se permitirá la importación de vehículos automotores que cumplan con la Norma de Emisiones Atmosféricas a partir de la EURO II o equivalentes.
- La Resolución Ministerial de 16 de mayo de 2018, Resolución Ministerial No. 450 (31,32) del Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, aprueba el Reglamento para la emisión de las autorizaciones previas para vehículos automotores nuevos, que se indican en la tabla 17.3:

Tabla 17.2 Límites de Emisiones para Vehículos Comerciales-Legislación EURO

Etapas	Año	Límite de emisiones (g/kW-h)					Combustible (ppm)
		CO	HC	NOx	PM	Humo	
EURO 0	1998	12,30	2,60	15,80	-	-	
EURO I	1992 <85 kW >86kW	4,50	1,10	8,00	0,612	-	2 000
		4,50	1,10	8,00	0,36	-	
EURO II	1996	4,00	1,10	7,00	0,25	-	500
	1998	4,00	1,10	7,00	0,15	-	
EURO III	2000	2,10	0,66	5,00	0,20/0,13	0,80	350
EURO IV	2005	1,50	0,46	3,50	0,02	0,5	50
EURO V	2008	1,50	0,46	2,00	0,02	0,5	10
EURO VI	2013	1,50	0,13	0,40	0,01	0,5	10

Fuente: Modern Automotive Technology (Europa Lehrmittel, 2014). Fuente de la calidad de combustible ANPACT

Tabla 17.3 Límites Máximos de Emisiones Contaminantes Vehículos a Gasolina

Categoría del vehículo	Peso bruto del vehículo	Peso del vehículo Cargado Kg	CO g/km	THC g/km	NOx g/km	Ciclos de prueba	Emisiones de Evaporación g/ ensayo SHED
Livianos	Todos	Todos	2,10	0,25**	0,25	FTP 75	2
Medianos	≤ 3 860	≤1 700	2,10	0,16***	0,25	FTP 75	2
		1 700 - 3 860	2,75	0,20	0,44	FTP 75	2
Pesados***	> 3 860 ≤ 6 350	Todos	2,75	0,20	0,44	TRANSITORIO PESADO	3
	> 6 350	Todos	3,13	0,24	0,69	TRANSITORIO PESADO	4
* Prueba realizada a nivel del mar ** Para NMHC el límite es 0,16 *** Como NMHC únicamente **** En g/bHP-h (gramos/brake Horse Power-hora)							

Fuente: Resolución Ministerial No 450

- Los vehículos convertidos a GLP también deberán cumplir las normas de emisiones máximas de los vehículos a gasolina, con la ventaja que el combustible GLP emite menos gases de efecto invernadero (GEI) y menos gases contaminantes.
- Al igual que el gas natural (GN), al GLP se lo considera un combustible de transición en el objetivo de disminuir el calentamiento global por efecto de los gases de efecto invernadero (GEI).

VIABILIDAD ECONÓMICA CONVERSIÓN DE VEHÍCULOS DE GASOLINA A GLP

La viabilidad económica del uso de GLP como combustible automotor, se evalúa tomando en cuenta el beneficio de los usuarios de GLP, el beneficio de YPF que deja de importar gasolina automotriz y el beneficio del distribuidor minorista de GLP (EESS).

Beneficio Económico para los Usuarios de GLP

Para analizar el beneficio económico de los futuros usuarios de GLP, se realiza una comparación entre el costo del consumo de gasolina y el costo del consumo de GLP, considerando la inversión inicial de adquisición del KIT de conversión, costos de mantenimiento durante la vida útil del vehículo convertido y ahorro (ingresos) que se generan por el uso de un combustible de precio menor.

Se muestra la información necesaria para la determinación del flujo de fondos.

Tabla 18.1 **Datos Determinación Flujo de Fondos Conversión Vehículos a GLP**

Kilometraje anual	20.000 km			
Costo Kit GLP	11.136	Bs	1.600	\$US
Costo Gasolina	3,74	Bs/L	0,54	\$US/L
Costo GLP	2,25	Bs/Kg	0,32	\$US/kg
SG, GLP	0,54			
Coto GLP	1,22	Bs/L	0,17	\$US/L
Consumo Gasolina	8,00	L/100 km		
Consumo GLP (8*1,22)	9,76	L/100 km		
Costo de servicio	210	Bs/año	30,17	\$US/year

Fuente: Elaboración Propia

Los precios del GLP y Gasolina automotor al usuario final, son fijados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, los cuales están congelados y no se modifican con las variaciones del precio del petróleo crudo del mercado internacional.

Para la gasolina, se toma un consumo promedio de 8L/100 kilómetros para vehículos ligeros, según lo publicado por U.S.EIA (<https://www.eia.gov/>) para el periodo 2005-2018.

Para el GLP se utiliza un consumo promedio de 9,76 L/100 kilómetros, un 22 % superior al de la gasolina, considerando la densidad energética menor del GLP(92.000 BTU/GUS) con relación a la gasolina (116.000 BTU/GUS).

Para el calculo de los egresos de consumo de gasolina y GLP se utilizo las siguientes formulas:

$$\text{Egreso Gasolina} = \frac{3,74Bs}{L} * \frac{8,00L}{100 Km} * XKm \quad \text{ecuación 4}$$

$$\text{Egreso GLP} = \frac{1,22Bs}{L} * \frac{9,76L}{100 Km} * Xkm \quad \text{ecuación 5}$$

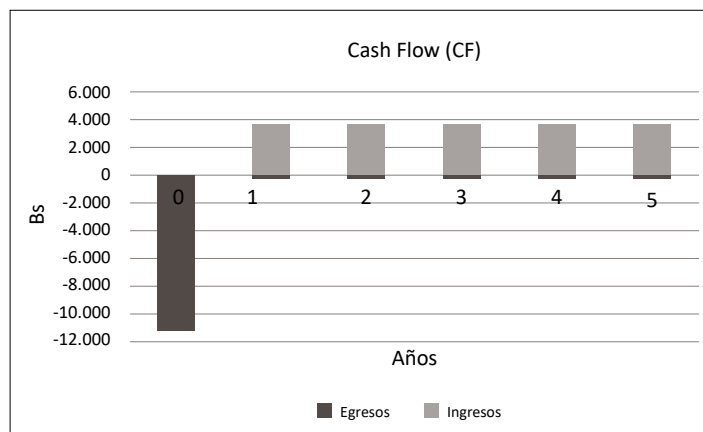
Tabla 18.2 Flujo de Fondos para Usuarios de GLP

Periodo (Años)	0	1	2	3	4	5
Egresos conversión GLP (Bs)	11.136	210	210	210	210	210
Recorrido (km)		20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Precio GLP (Bs/L)		1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Consumo GLP (L/100 km)		9,76	9,76	9,76	9,76	9,76
Precio gasolina (Bs/L)		3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
Consumo Gasolina (L/100 km)		8	8	8	8	8
Egreso consumo GLP (Bs)(b)		2.381	2.381	2.381	2.381	2.381
Egreso consumo Gasolina (Bs)(a)		5.984	5.984	5.984	5.984	5.984
Ahorro/Ingresos (Bs)(a-b)		3.603	3.603	3.603	3.603	3.603
NCF	-11.136	3.393	3.393	3.393	3.393	3.393
ACF	-11.136	-7.743	-4.351	-958	2.434	5.827
$fd=1/(1+r)^t$	1	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
DCF=1.724,47 Bs	-11.136	3.084	2.804	2.549	2.317	2.107
VAN	Bs 1.724					
TIR	16%					
PRS (años)	3,28					
B/C	1,14					
td	10%					

Fuente: Elaboración Propia

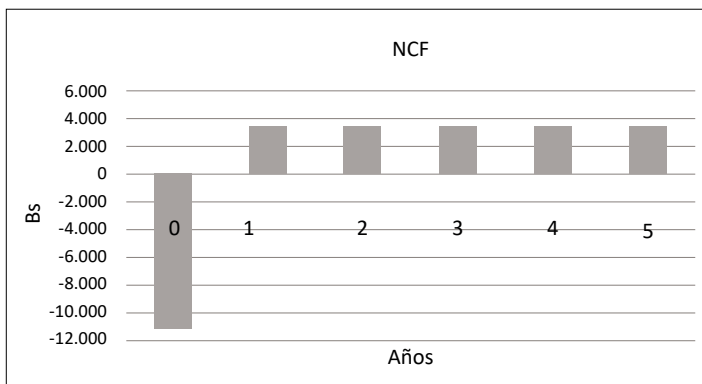
Según el flujo de caja, se tiene un $VAN > 0$, $TIR < td$, $B/C > 1$ indicadores que indican excelente rentabilidad con un periodo de repago simple (PRS) o Payback de 3,28 años.

Figura 18.1 Flujo de Caja (CF) para Usuarios de GLP



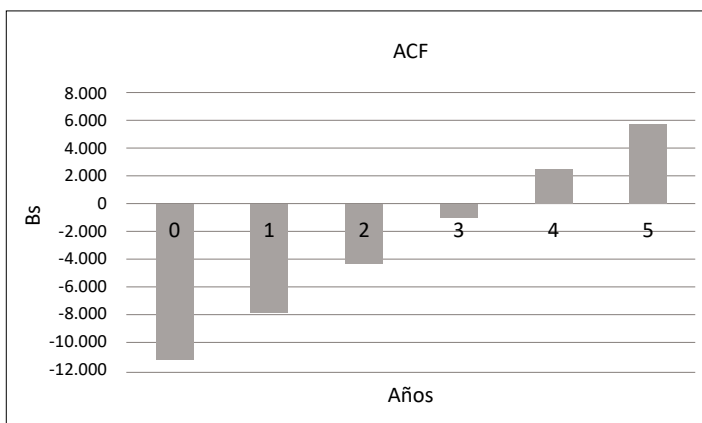
Fuente: Elaboración Propia

Figura 18.2 Flujo de Caja Neto (NCF) para Usuarios de GLP



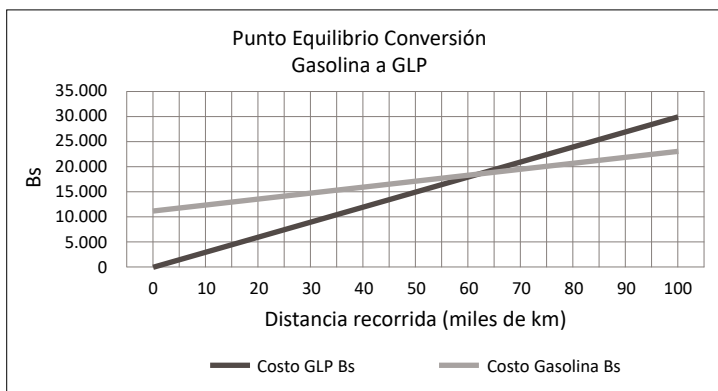
Fuente: Elaboración Propia

Figura 18.3 Flujo de Caja Acumulado (ACF) para Usuarios de GLP



Fuente: Elaboración Propia

Figura 18.4 Punto de Equilibrio (breakeven) para Usuarios de GLP



Fuente: Elaboración Propia

El punto de equilibrio es el punto de actividad donde se igualan los costos de Gasolina y GLP para la misma distancia recorrida (62.734 kilómetros) o 3,28 años a razón de 20.000 kilómetros/Año.

18.2. Beneficio Económico para YPFB

Para estimar los beneficios económicos para YPFB se analiza la suspensión de la exportación de excedentes de producción de GLP y venta de este producto no exportado en el mercado local como combustible automotor y la suspensión de importación de volúmenes equivalentes de gasolina con el mismo contenido energético. Para la estimación se toma como referencia los volúmenes exportados el año 2018.

Según del informe del Ministerio de Hidrocarburos “Agenda de Reactivación Hidrocarburífera Bolivia” e informe de “Audiencia de Rendición Pública de Cuentas - Sector Hidrocarburos”, el año 2018 se exportó 102.527 TM de GLP a los países vecinos, con un ingreso de 53 millones de dólares, con un precio promedio de 517 \$US/TM, con modalidad de entrega: FCA (Incoterm 2010) Planta Separadora de Líquido “Calos Villegas” (PSLCV).

El volumen no exportado de GLP se comercializa en el mercado interno a precio Pre-Terminal (171\$US/TM) y el diferencial de precios de exportación y mercado interno genera una pérdida para YPFB de 35.470.240 de dólares. Se muestra la pérdida de ingresos por suspensión de exportación de GLP:

Tabla 18.3. Pérdida de Ingresos YPFB por Suspensión Exportación GLP

Pérdida de ingresos por suspensión exportación GLP					
Periodo (Años)	1	2	3	4	5
Exdente GLP (TMD)	281	281	281	281	281
Excedente GLP (TMA)	102.527	102.527	102.527	102.527	102.527
Precio Preterminal PSL (Bs/Kg)	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
Precio Preterminal PSL (\$US/TM)	171	171	171	171	171
Ingreso Venta MI GLP (\$US)	17.529.760	17.529.760	17.529.760	17.529.760	17.529.760
Precio Venta ME (Bs/Kg)	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Precio Venta (\$US/TM)	517	517	517	517	517
Ingreso Venta ME GLP ((\$US)	53.000.000	53.000.000	53.000.000	53.000.000	53.000.000
Pérdida YPFB (\$US)	-35.470.240	-35.470.240	-35.470.240	-35.470.240	-35.470.240

Fuente: Elaboración Propia

La utilización de los excedentes de GLP como combustible automotor en el mercado local, redundará en la disminución de importación de gasolina en volúmenes de igual equivalencia energética.

Según información de la ANH, Bolivia importó en el periodo 2015-2019, gasolina por el occidente, oriente y sur del país.

Tabla 18.4 Precio Promedio Importación Gasolina

Precios importación gasolina (Bs/Litro)					
Gestión	2015	2016	2017	2018	2019
Occidente	5,62	6,54	4,64	5,20	4,30
Oriente	5,06	5,54	5,37	5,81	4,43
Sur	5,64	5,55	5,31	5,60	4,12
Promedio	5,44	5,88	5,11	5,54	4,28

Fuente: Elaboración Propia

Para el año de referencia (2018), se registró un precio promedio de importación de gasolina de 5,54 Bs/L. Con este precio se evalúa los beneficios de no importación de gasolina, que es reemplazada por GLP. Se muestra el beneficio económico para YPFB por suspensión importación de gasolina:

Tabla 18.5 Beneficios para YPFB por Suspensión Importación Gasolina

Periodo (Año)	1	2	3	4	5
Excedente GLP (TMD)	281	281	281	281	281
Excedente GLP (TMA)	102.527	102.527	102.527	102.527	102.527
Excedente GLP (m3/año)	189.865	189.865	189.865	189.865	189.865
Excedente GLP (L/año)	189.864.815	189.864.815	189.864.815	189.864.815	189.864.815
Volumen equivalente gasolina (L/año)	155.626.897	155.626.897	155.626.897	155.626.897	155.626.897
Precio Importación gasolina (Bs/L)	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54
Ahorro YPFB (Bs)	862.173.012	862.173.012	862.173.012	862.173.012	862.173.012
Ahorro YPFB (\$US)	123.875.433	123.875.433	123.875.433	123.875.433	123.875.433

Fuente: Elaboración Propia

18.3. Balance General Proyecto Conversión Vehículos de Gasolina a GLP

Para este balance, se considera:

- Suspensión exportación excedentes de GLP y utilización de estos volúmenes como combustible automotor en sustitución gasolina importada.
- Suspensión importación gasolina en volúmenes equivalentes al GLP utilizado en los vehículos convertidos de gasolina a GLP.

Realizando la conversión de vehículos de gasolina a GLP, suspendiendo la exportación de excedentes de GLP, suspendiendo la importación de gasolina en volúmenes equivalentes al GLP utilizado en la conversión de vehículos, YPFB tendría un beneficio económico anual de 88.405.193 dólares. Este monto puede modificarse por la variación de los precios del GLP del mercado de exportación, precios de la gasolina importada y aumento o disminución de los excedentes de producción de GLP.

Se presenta el balance general, ejecutando el proyecto de conversión de vehículos de gasolina a GLP.

Tabla 18.6 Balance General con Proyecto Conversión Vehículos de Gasolina a GLP

Balance general con proyecto conversión vehículos de gasolina a GLP	
Operación	\$US
Pérdida suspensión exportación GLP (3,60 Bs/kg)	-53.000.000
Ingresos venta GLP mercado interno (1,19 Bs/kg)	17.529.760
Beneficio suspensión importación de gasolina (5,54 Bs/L)	123.875.433
Ganancia	88.405.193

Fuente: Elaboración Propia

Suspensión Subsidio por no Importación de Gasolina

El diferencial de precios entre la gasolina importada (5,54 Bs/L) y la comercialización de ésta en el mercado interno a Precio Pre-Terminal (3,38 Bs/L) se denomina subvención (2,16 Bs/L) y esta diferencia es compensada a YPFB por el Ministerio de Economía y Finanzas Públicas (MEFP) mediante notas de crédito fiscal, previo informe de la ANH, según establece el Decreto Supremo 286 del 09 de septiembre del año 2009.

La no importación de 155.626.897 litros de gasolina por reemplazo de este combustible automotor por GLP significa para el TGN un ahorro de 48.298.003 dólares/Año.

Se muestra la subvención de la gasolina importada.

Tabla 18.7 Subvención Importación Gasolina (2018)

Periodo (Año)	1	2	3	4	5
Volumen Importación gasolina (L/año)	155.626.897	155.626.897	155.626.897	155.626.897	155.626.897
Precio Importación gasolina (Bs/L)	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54
Precio Preterminal gasolina (Bs/L)	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38
Diferencial de precios (Bs/L)	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Subvención MEFP (Bs)	336.154.098	336.154.098	336.154.098	336.154.098	336.154.098
Subvención MEFP (\$US)	48.298.003	48.298.003	48.298.003	48.298.003	48.298.003

Fuente: Elaboración Propia

Beneficio Distribuidor Minorista (EESS)

Según el U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, para una estación de servicio modular y mediana de GLP se tiene:

Tabla 18.8 Características de Estación de Servicio de GLP

Station Design	Approx. Daily Fuel Use*	Cost Range	Example Applications*
12,000-gal storage tank 2 dual-hose dispensers	450-1,800 gal (If tank is filled with 1-3 transport loads/mo)	Purchasing New Equipment: \$120,000-\$145,000 <i>Initial Cost for Leasing:</i> <i>\$15,000-\$50,000</i>	35 school buses x 14 gal/day, 65 police cruisers x 7gal/day, or 100 shuttle vans x 20 gal/day 

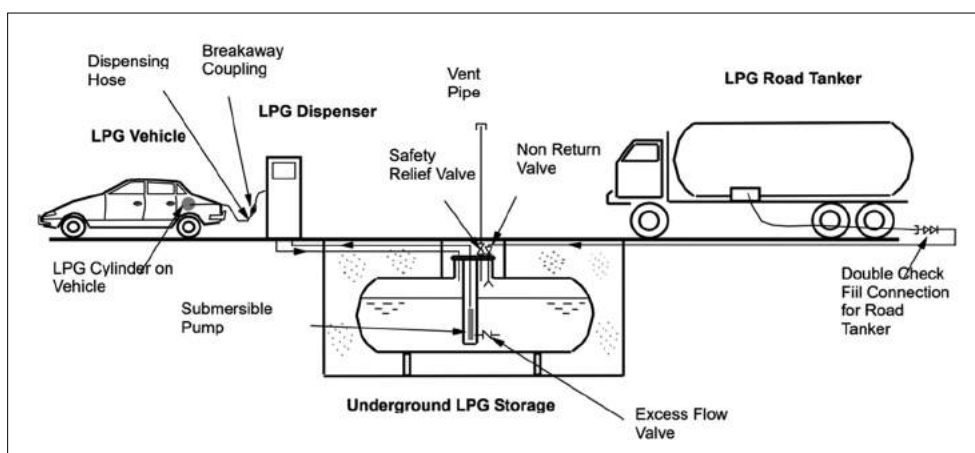
Fuente: US DEPARTMENT OF ENERGY, 2021

En las estaciones de servicio de GLP, normalmente se instalan:

- Dos tanques de GLP, uno para operación principal y otro auxiliar para permitir continuar las operaciones cuando uno de los tanques está en mantenimiento o recibiendo producto de cisternas.
- Dos bombas de transferencia, una principal y otra auxiliar, esto para garantizar las operaciones continuas de la estación de servicio, mientras se realizan tareas de inspección y mantenimiento.
- Uno o dos surtidores (dispensadores) para carguío de combustible a los vehículos. Cada dispensador es instalado con una o dos mangueras provistas de sistemas que aseguren un acoplamiento estanco con la boca de llenado del vehículo.

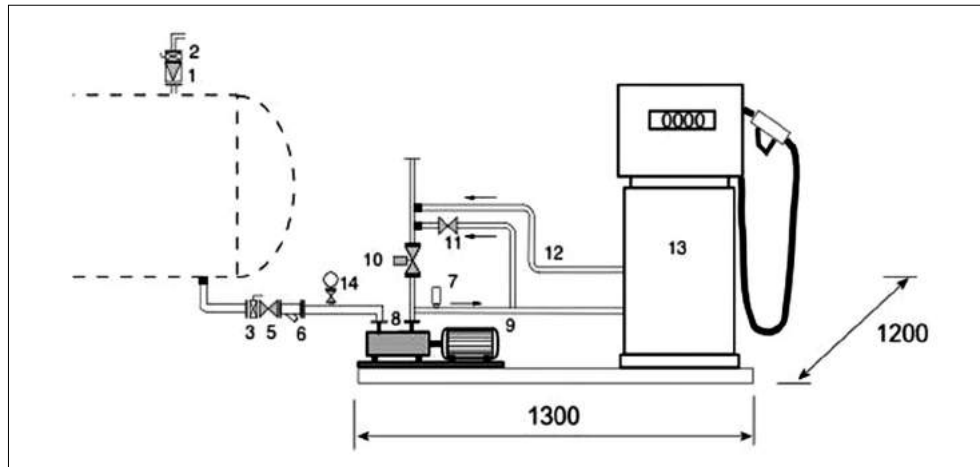
Se presentan diagramas de flujo típico de estaciones de servicio de GLP con tanque subterráneo y tanque sobre el suelo.

Figura 18.5 Diagrama Típico de una Estación de Servicio de GLP con Tanque Subterráneo



Fuente: LPG-Filling-Station-CoP-2020-EN

Figura 18.6 Diagrama Típico de una Estación de Servicio de GLP con Tanque sobre el Suelo



Fuente: <http://centres-emplisseur-gpl.over-blog.com/>

Donde:

1. No return valve 1"1/4 NPT
2. Ball valve PN 40 DN 25
3. Ball valve PN 40 DN 32
5. Excess flow valve PN 40 DN 32
6. Steel filter PN 40 DN 32
7. Safety valve 32 bar 1/2"
8. Centrifuge pump
9. EEx-d engine
10. By - pass valve DN 25
11. By - pass
12. Return dispenser
13. Single dispenser with meter. complete of gun for car connection, electronic measurement
14. Needle valve with manometer

Se estima los indicadores de rentabilidad de las estaciones de servicio de GLP.

Tabla 18.9 Precio del GLP Mercado Interno en Bs/litro

Precio GLP mercado interno (Bs/L)									
Producto	Pr. Pre Terminal Bs/L	Mg Alm Bs/L	IVA Mg Alm Bs/L	Pr May Bs/L	IVA Mg May Bs/L	Pr May Bs/L	Mg Min Bs/L	IVA Mg Min Bs/L	Pr Min Bs/L
GLP Refiner	0,56	0,17	0,03	0,17	0,03	0,95	0,23	0,03	1,22
GLP PSL	0,64	0,15	0,02	0,15	0,02	0,98	0,21	0,03	1,22

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18.10 Datos para Evaluación Rentabilidad EESS GLP

Margen Minorista GLP (Mg)	0,21	Bs/litro
Ventas Diarias GLP	5600	Litros/Día
Inversión Inicial (AF)	145.000	\$US
Costo de Operación (10% AF)	14.500	\$US/Año
Capital de Trabajo (50% OPEX)	7.250	\$US
Inversión Intangibles (5% AF)	7.250	\$US
Impuesto Utilidades (IUE)	25	%
Depreciación Activos Fijos, SLN	8	Años
Tasa de descuento	10	%

Fuente: Elaboración Propia

El Margen Minorista (0,21 Bs/litro, regulado por la ANH, es el cargo al usuario final de GLP que se destina para retribuir a la estación de servicio por sus costos de operación, administración y mantenimiento, impuestos, depreciaciones y obtener una utilidad mínima y razonable sobre su inversión.

Las estaciones de servicio tienen otros ingresos que no son considerados en este informe: lavado de vehículo, tienda, restaurant.

Tabla 18.11 Flujo de Caja Estación Servicio GLP

FLUJO DE CAJA PARA ESTACIÓN DE SERVICIO DE GLP CON CAPACIDAD DE DESPACHO DE 5600 LITROS/DÍA (\$US)											
Periodo (Año)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas GLP (litros)		2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000	2.044.000
Margen Minorista GLP (Bs/L)		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Ingresos Venta GLP (Bs)		429.240	429.240	429.240	429.240	429.240	429.240	429.240	429.240	429.240	429.240
Ingresos Venta GLP (\$US)		61.672	61.672	61.672	61.672	61.672	61.672	61.672	61.672	61.672	61.672
OPEX (\$US)		-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500	-14.500
Depreciación, 8 años (\$US)		-18.125	-18.125	-18.125	-18.125	-18.125	-18.125	-18.125	-18.125	0	0
Amortización Intangibles, 5 años (\$US)		-1.450	-1.450	-1.450	-1.450	-1.450	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos - UAI (\$US)		27.597	27.597	27.597	27.597	27.597	29.047	29.047	29.047	47.172	47.172
Impuesto Utilidades IUE (25%), (\$US)		6.899	6.899	6.899	6.899	6.899	7.262	7.262	7.262	11.793	11.793
Utilidad Después de Impuestos - UDI (\$US)		20.698	20.698	20.698	20.698	20.698	21.786	21.786	21.786	35.379	35.379
Depreciación, 8 años		18.125	18.125	18.125	18.125	18.125	18.125	18.125	18.125	0	0
Amortización Intangibles, 5 años (\$US)		1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	0	0	0	0	0
Inversión Inicial - AF (\$US)	-145.000										
Capital de Trabajo 50% OPEX (\$US)	-7.250										7.250
Inversión Intangibles, 5% AF (\$US)	-7.250										
Flujo de Caja - CF (\$US)	-159.500	40.273	40.273	40.273	40.273	40.273	40.273	39.911	39.911	35.379	42.629
Factor Descuento (fd)	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39
Flujo de Caja Descontado - DCF (\$US)	-159.500	36.612	33.284	30.258	27.507	25.006	22.528	20.480	18.619	15.004	16.435
Flujo de Caja Acumulado - ACF (\$US)	-159.500	-119.227	-78.954	-38.681	1.592	41.865	81.776	121.686	161.597	196.976	239.606

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18.12 Indicadores de Rentabilidad Estación Servicio GLP

VAN (\$US)>0	86.234
TIR>td	21,6%
PRS(Años)<5	3,96
VAI(\$US), Valor Actual Ingresos	Bs 378.950
VAI(\$US), Valor Actual Egresos	Bs 248.596
B/C>1, Beneficio/Costo	1,5
td	10%

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

- Bolivia tiene las plantas de separación de líquidos de Rio Grande (PSLRG) y Carlos Villegas (PSLCV), con capacidad instalada suficiente para abastecer la demanda del mercado nacional de GLP y exportar los excedentes de producción:
 - ✓ PSLRG: Procesamiento de GN (5,6 MM MCD) y producción de 361 TMD de GLP
 - ✓ PSLCV: Procesamiento de GN (32,19 MM MCD) y producción de 2247 TMD de GLP
- La producción de GLP abastece al mercado interno y los excedentes de producción se exportan a los países vecinos desde el año 2013.
- Los excedentes de producción de GLP pueden sustituir los volúmenes de importación de gasolina y mejorar la seguridad energética de Bolivia.
- El GLP se almacena en estado líquido a presión baja (7bar-10 bar) en comparación al GNV (200 bar-250 bar). Los depósitos ocupan un espacio menor y son de peso menor.
- Técnicamente es posible convertir vehículos de combustión interna de gasolina a GLP.
- Por el menor precio del GLP, su uso como combustible automotor representa un ahorro para los usuarios frente al uso de gasolina.
- Por su composición, el GLP es menos contaminante que la gasolina, emite menos cantidad de Dióxido de Carbono (CO₂) al medio ambiente por unidad de energía entregada y contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI).
- Los combustibles GN, GNL Y GLP están considerados como combustibles de transición en el objetivo de disminuir el calentamiento global del planeta y se recomienda su utilización en reemplazo de combustibles fósiles más pesados (Gasolina, Diesel Óil) y más contaminantes.
- La utilización del GLP como combustible automotor, disminuye los volúmenes de importación de gasolina especial y disminuye los montos de subvención por parte del TGN.
- La utilización del GLP como combustible automotor, significa un ahorro para los usuarios, un beneficio económico para YPFB y mayor rentabilidad para las estaciones de servicio.

RECOMENDACIONES

- Utilizar los excedentes de producción GLP como combustible automotor en reemplazo de la gasolina importada.
- Reducir los volúmenes de importación de gasolina sustituyendo los mismos con combustibles de menor capacidad de contaminación y emisión de gases de efecto invernadero como el GNV y GLP.
- Adecuar la reglamentación nacional de uso de combustibles en el mercado nacional, que permita el uso de GLP en automotores.
- Adecuar de la calidad de los combustibles producidos en Bolivia a la normativa EURO IV como establece la Ley 821.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2018). *Resolución 352/2018*. Recuperado de <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=54>. 25 de junio de 2021
- Bolivia gasoline prices. (2021). GlobalPetrolPrices.Com. Recuperado de https://www.globalpetrolprices.com/Bolivia/gasoline_prices/. 3 de febrero de 2021
- Butane-Propane News. (2016). *U.S. Is World's Largest LPG Exporter, But When Will Market Balance?* Recuperado de <https://bpnews.com/feature-articles/us-worlds-largest-lpg-exporter-when-will-market-balance>. 20 de enero de 2021
- Decreto Supremo N.º 1499. (2013). Presidencia del estado plurinacional de Bolivia. Recuperado de <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N1499.html>. 03 de marzo de 2021
- Devnet S.R.L. (2018). *Bolivia: Reglamento para la emisión de las autorizaciones previas para vehículos automotores nuevos*. Recuperado de https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-RM-450-2017.html?dcmi_identifier=BO-RE-RM-450-2017&format=html. 13 de octubre de 2020
- Electrical and Mechanical Services Department. (2020). *Code of Practice for liquified petroleum gas filling stations in Hong Kong*. Recuperado de https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_393/LPG-Filling-Station-CoP-2020-ENG.pdf. 25 de febrero de 2021
- Engineering ToolBox. (2001). The Engineering ToolBox. Recuperado de <https://www.engineeringtoolbox.com/>. 28 de noviembre de 2020
- Frey, R. (s.f.). *Adaptadores GLP Autogas*. glpautogas.info. Recuperado <https://www.glpautogas.info/es/adaptadores-glp-autogas.html>. 14 de enero de 2020
- Gascomb (s.f.). Capacidad de tanques. Recuperado de www.gascomb.com
- Glpautogas. (2018). *Listado de la Gama de coches toyota con versión GLP de fábrica / serie con todos los vehículos, modelos y precios*. glpautogas.info. Recuperado de <https://www.glpautogas.info/gama-toyota-glp-autogas.html>. 20 de noviembre de 2020

- Honnery, D. R., Ghojel, J. I., & Moriarty, P. (2002). The role of LPG in reducing vehicle exhaust emissions. In P. Potterton (Ed.), *Papers of the 25th Australasian Transport Research Forum* (pp. 1 - 13). Bureau of Transport and Regional Economics.
- Hydrogen Storage*. (s.f.). Energy.Gov. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> 21 de febrero de 2021
- ibce.org.bo. (2020). *Instituto Boliviano de Comercio Exterior*. IBCE. Recuperado de <https://ibce.org.bo/> 28 de junio de 2021
- Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Hidrocarburos*. INE. Recuperado de <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/hidrocarburos-mineria/hidrocarburo-cuadros-estadisticos/>. 27 de diciembre de 2020
- Lafuente, I. (2014). *Homologación y reformas de vehículos de gas* [Diapositivas]. Gencat. Recuperado de http://gencat.cat/infonorma/pdf/HOM_%20GAS_v2.pdf. 25 de mayo de 2021
- MGM International. (2017). *Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética* [Diapositivas]. Banco de Desarrollo de América Latina. Recuperado de <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1306/GUIA%20-%20Sustitucion%20de%20combustibles.pdf?sequence=1>
- Ministerio de Hidrocarburos (Ed.). (2018). *Resolución 120/2018*. Recuperado de <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=54>. 15 de mayo de 2021
- Ministerio de Hidrocarburos (Ed.). (2020). *Agenda de reactivación hidrocarburífera de Bolivia*. del estado. Recuperado de <https://www.hidrocarburos.gob.bo/phocadownloadpap/AGENDA%20REACTIVACION-1-150.pdf>. 30 marzo 2021
- Ministerio de Hidrocarburos (MH). (2018). *Rendición Pública de Cuentas Final 2017-Inicial 2018 Sector Hidrocarburos - PDF Free Download* [Diapositivas]. DOCPLAYER. Recuperado de <https://docplayer.es/167948090-Rendicion-publica-de-cuentas-final-2017-inicial-2018-sector-hidrocarburos.html>. 18 de diciembre de 2020
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda (2017). *Resolución 450/2018*. Recuperado de https://www.oopp.gob.bo/wp-content/uploads/2020/antiguos/RM_450_NORMAS_EURO.pdf. 1 de febrero de 2021
- Poder Calorífico. (s. f.). *Poder Calorífico*. Recuperado https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html#tabla1 de 03 de junio de 2021
- Publications*. (2021). WLPGA. Recuperado de <https://www.wlpga.org/publications/>. 8 de agosto de 2021
- R. (2019). *¿Qué debes saber si quieres instalar un kit de GLP en tu coche?* Highmotor. Recuperado de <https://www.highmotor.com/instalar-kit-glp.html>. 29 de abril de 2021
- Repsol AutoGas. (2015). *Estaciones de Servicio*. Recuperado de https://imagenes.repsol.com/es_es/Manual_AutoGas_EESS_2015_tcm7-608978.pdf 14 de marzo de 2021
- Secretaría de Energía Argentina. (2003). *Resolución 131/2003*. Argentina.gob.ar. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-131-2003-87300/texto>. 01 de mayo de 2021

Transvegas (s.f). Kit de conversion GLP. Recuperado de www.transvegas.es

U.S. Energy Information Administration. (2021). *Short-Term Energy Outlook - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Recuperado de https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php. 06 abril 2021

Viola, V. (2018). *An overview of the global LPG market and its impact in Latin America* [Diapositivas]. AIGLP. Recuperado de <https://aiglp.org/aiglp2018/docs/overview-del-escenario-de-oferta-mundial-de-glp-y-sus-impactos-en-latino-america.pdf>

Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos. (s.f.). *Carburantes - YPFB Refinación*. YPFB Refinación S.A. Recuperado de <https://www.ypfbrefinacion.com.bo/carburantes.php#innernav>. 10 de noviembre de 2020

YPFB - *La fuerza que transforma Bolivia*. (2021, septiembre 13). Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos. Recuperado de <https://www.ypfb.gob.bo/es/>. 1 de diciembre de 2020



www.
upsa
.edu.bo



Facultad de Ingeniería | Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra - UPSA
Av. Paraguay y 4to. Anillo | Tel.: +591 (3) 346 4000 | Fax: +591 (3) 346 5757 | informaciones@upsa.edu.bo

Santa Cruz de la Sierra, Bolivia