

Análisis del comportamiento de un motor funcionando con mezclas de diésel y gas natural comprimido

César J. Sebriano Paredes ^a, E. José Cano Coscia ^b, Waldy A. Riveros Saavedra ^c

^a Universidad Nacional de Itapúa. FIUNI. Encarnación. Paraguay, cj.sebriano@gmail.com

^b Universidad Nacional de Itapúa. FIUNI. Encarnación. Paraguay, eugenio.cano@fiuni.edu.py

^c Universidad Nacional de Itapúa. FIUNI. Encarnación. Paraguay, waldy.saavedra@fiuni.edu.py

Resumen

Se analizó el funcionamiento de un motor de combustión interna, que utilizó como combustible mezclas de gas natural comprimido (GNC) proveniente del Chaco Paraguayo y diésel de petróleo. Para la realización de las pruebas fue necesario el diseño y la construcción de un banco de prueba para motor, utilizando materiales disponibles y reciclados, un motor diésel nuevo de 2 cilindros y un kit de conversión a sistema dual para la inyección de combustible. Con la utilización dual de combustible, el motor tuvo un rendimiento térmico similar al caso de utilización de diésel exclusivo, para cargas medias a elevadas, y menores rendimientos a bajas cargas. De acuerdo a los precios de combustibles en el momento de las pruebas, se observó un ahorro económico en el uso dual con cargas elevadas.

Palabras clave: diésel; gas natural comprimido; banco de prueba; motor de combustión.

Abstract

The operation of an internal combustion engine was analyzed, which used as fuel mixtures compressed natural gas (CNG) from the Paraguayan Chaco and petroleum diesel. To carry out the tests, it was necessary to design and build a test bench for the engine, using available and recycled materials, a new 2-cylinder diesel engine and a conversion kit to a dual fuel injection system. With the dual fuel use, the engine had a thermal performance similar to the case of using diesel exclusively, for medium to high loads, and lower performance at low loads. According to fuel prices at the time of the tests, economic savings were observed in dual use with high loads.

Keywords: diesel; compressed natural gas; test bench; combustion engine.

1. Introducción

En Paraguay, a principios del 2024 se perforó el pozo 54 con el objetivo de extraer petróleo y derivados, por parte de una empresa británica. El Viceministro de Minas y Energía, Mauricio Bejarano, mencionó que el 70% de estos pozos tienen indicios de hidrocarburos [1], esto sería muy alentador para una utilización a mediano o largo plazo.

Se tiene cierto potencial de extracción de gas natural en el país, que podría usarse para generar energía eléctrica o como combustible para motores y turbinas. Justamente, la empresa Primo Cano Martínez, la primera compañía nacional que explotó gas natural en el Chaco paraguayo y cuyas actividades fueron suspendidas en 2016, instó a las autoridades a seguir utilizando el hidrocarburo que descubrió, para la generación de energía eléctrica en esta zona del país [2]. Si eventualmente podrá utilizarse dicho combustible, ya depende de las Políticas de Estado.

Este trabajo consideró la implementación de tecnología que permita utilizar el gas natural. Una de las maneras de aprovechamiento es el sistema de alimentación de combustible dual diésel – GNC (Gas Natural Comprimido), en motores de combustión interna encendidos por compresión.

Considerando esta posibilidad, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Itapúa, se han realizado pruebas para conocer el desempeño de un motor diésel, utilizando el gas natural que fue extraído, en el Chaco Paraguayo, en la zona de Gabino Mendoza, por la empresa Primo Cano Martínez SA; que según mediciones realizadas en el 2016 el caudal del pozo fue de 27.200 m³/día [3]. Para realizar los ensayos fue necesario el montaje de un Banco de prueba para motor de combustión interna.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar el funcionamiento de un motor que utiliza como combustible gas natural comprimido proveniente del Chaco Paraguayo mezclado con diésel en diferentes porcentajes.

2.2 Objetivos específicos

- Montar un banco de prueba para motor de combustión interna.
- Medir y calcular magnitudes físicas del funcionamiento del motor instalado.
- Comparar el uso de combustible dual diésel – gas natural comprimido, con el uso de diésel exclusivo.

3. Materiales y métodos

3.1. Operación dual diésel - GNC

El Gas Natural Comprimido (GNC) se compone, entre un 80 a 99% de metano y el resto se constituye por adiciones de dióxido de carbono, nitrógeno e hidrocarburos; se almacena a temperatura ambiente a altas presiones (200 a 250 bar) [4]. Este gas natural es principalmente metano, que al tener un alto índice de hidrógeno por carbono (cuatro) produce menos dióxido de carbono por unidad de energía entregada, en comparación con otros hidrocarburos más pesados [5].

En la operación dual, el diésel actúa como iniciador del proceso de combustión, y se inyecta directamente a la cámara de combustión, mientras que el gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador o un sistema de inyección [6].

Este tipo de sistema ha atravesado a lo largo de los años una evolución tecnológica que se puede dividir en 4 generaciones; cada una de ellas se denomina de acuerdo a su orden de aparición, que se resumen en la Tabla 1 según datos de la Cámara Argentina del Gas Natural

Comprimido [7]. El Banco de prueba utilizado se enmarcó dentro de la primera y segunda generación.

Tabla 1: Generaciones y características de los sistemas duales diésel - gas natural.

G	Dosificac. Diésel	Dosificac. GN	Sensor	Control
1°	Gobernador original	Venturi	No	No
2°	Electrónica	Venturi	Emulado	Lazo abierto
3°	Electrónica	Electrónica	Sonda lambda	Lazo cerrado
4° 5°	Secuencial, electrónica, Inyector dual	Secuencial, electrónica, Inyector dual	Señal de inyección de la ECU original	Lazo cerrado

Fuente: Datos de la Cámara argentina del GNC.

En la Tabla 2 se puede observar los componentes del gas natural utilizado.

Tabla 2: Composición del gas natural extraído en el Chaco Paraguayo.

COMPONENTES	PORCIENTO MOLAR	VOL. LIQ. (GPM)
Nitrógeno	3.075	
Bióxido de Carbono	0.030	
Metano	94.293	
Etano	1.614	
Propano	0.328	0.090
Iso-Butano	0.129	0.042
Normal-Butano	0.161	0.051
Iso-Pentano	0.071	0.026
Normal-Pentano	0.065	0.023
Hexano	0.096	0.039
Heptano +	0.138	0.065
TOTAL	100.000	0.337

Peso Molecular Promedio	17.125
Gravedad Específica (Aire=1)	0.591
Poder Calorífico (BTU/PC)	1,016.49
Peso Molecular C7+	103.825

Fuente: Empresa Primo Cano Martínez SA.

Los valores de densidad y poder calorífico inferior de los combustibles usados para los cálculos, se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3: Densidad y PCI de los combustibles.

Densidad gas natural	0,701	Kg/m³
Densidad diésel	0,880	Kg/l
PCI gas natural	8.792	Kcal/m³
PCI diésel	10.200	kcal/kg
PCI diésel	8.976	Kcal/l

3.2 Banco de prueba para motor

El banco fue íntegramente desarrollado por el Ing. José Cano Coscia y montado con alumnos de la carrera de Ing. Electromecánica, para dotar de un equipamiento más al Laboratorio de Termotecnia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Itapúa.

El sistema utilizado tiene la ventaja de la intercambiabilidad instantánea a la operación sólo diésel, en caso de no disponer del gas natural, considerando que no se alteran los parámetros físicos del motor.

El grado de sustitución de diésel por gas natural depende de las condiciones de funcionamiento del motor, variando típicamente de 30% a 70%. Para la operación dual no fue necesario ningún cambio importante en el motor; sólo se agregó una cámara Venturi de mezcla de gas en la entrada de aire (técnica de fumigación de gas convencional, pudiendo también utilizarse un inyector de gas en el colector de admisión), un regulador de presión y un sistema electrónico de gerenciamiento.

El banco de prueba para motor de combustión interna encendido por compresión, operativo actualmente, consta de los siguientes principales componentes:

- motor diésel TY295BG de 2 cilindros cuyas especificaciones técnicas se tienen en la Tabla 2;
- kit de conversión, TA98 140 HP, 200 bar (trabajo), TA GAS Technology;
- acoplamiento entre el motor y freno con cardán y doble junta universal;

- freno electromagnético de corrientes parásitas TELMA CC 200 enfriado por aire;
- armario y panel de mediciones, con los elementos electrónicos;
- bancada movable y robusta que soporta las partes citadas.

Tabla 4: Especificaciones técnicas del motor.

Modelo	TY295BG
potencia	18,4 kW
velocidad angular	2200 rpm
torque máximo	87,9 N m a 1725 rpm
consumo	254 g/kWh
velocidad en vacío	600 rpm
peso neto	210 kgf
dimensiones (mm)	1001 x 500 x 600

El kit de conversión consta de un regulador de presión de gas con electroválvula, un controlador electrónico de velocidad conectado al sensor de velocidad de efecto hall ubicado frente a la polea del cigüeñal del motor, en la cual se instaló un pequeño imán, una llave selectora para operar con solo diésel o diésel-gas, un sensor de temperatura y la cámara de mezcla de gas. Posee un sistema de seguridad con termocupla, que permite medir la temperatura de los gases de escape, y desconectar el sistema de gas, en caso de alcanzar el valor máximo de temperatura definido por el usuario.

La potencia de frenado se logra mediante el freno de corrientes parásitas, que fue reacondicionado para su uso e instalado de forma a permitir el movimiento pendular. La fuerza que genera el par de frenado se mide por medio de una celda de carga ubicada en la parte inferior del freno, y con la distancia al punto de suspensión de 57,5 cm, se puede calcular el momento de torsión.

El armario de control contiene los instrumentos digitales para la medición de la velocidad del motor (rpm), la fuerza de frenado (kgf), la temperatura de los humos y del agua del motor (°C); también contiene, los botones de ajuste del freno y un amperímetro del sistema de frenado. También se dispuso de un medidor de volumen del diésel mediante una probeta graduada de 500 cm³, y de un medidor del peso del gas (kgf), así como medidores de presión de aceite y presión de entrada del gas natural. En la Fig. 1 y Fig. 2 se pueden observar las partes del banco de prueba.



Fig. 1: Banco de prueba para motor y tanque de GNC, equipo instalado en el laboratorio de Termotecnia de la FIUNI.



Fig. 2: Kit de conversión a sistema dual diésel-gas, motor de prueba y transmisión mecánica.

El tanque de gas natural comprimido es un cilindro de 120 litros, cuyo peso fue equilibrado con un sistema de contra peso. La estructura soporte del tanque dispone de un dinamómetro digital, que permite realizar la lectura directa de la variación del peso con una precisión de 20 g.

3.3. Operación y mediciones

Las mediciones se iniciaron con el motor funcionando a diferentes cargas, y usando diésel exclusivo, para obtener datos de control. Se realizaron anotaciones de velocidad, temperaturas del motor y humos de escape, fuerza del par y tiempo; todos ellos para un determinado consumo volumétrico de diésel.

El sistema electrónico del controlador permitió calibrar las velocidades máximas y mínimas que definieron el rango de operación del sistema diésel-gas, mediante el accionamiento de la electroválvula del regulador de presión.

Cuando el motor operaba en el rango de velocidades programado, el consumo de diésel disminuía de forma automática a medida que aumentaba el flujo de gas natural. Esto ocurrió debido a la acción del sistema regulador centrífugo incorporado en la bomba inyectora del motor, que reajustaba el flujo diésel de alta presión con el fin de mantener la velocidad.

Al acelerar el motor, se incrementaba el flujo de aire en el múltiple de admisión y se arrastraba mayor cantidad de gas; tan pronto como el gas adicional suministrado intentaba acelerar el motor, los cortes del regulador disminuían el flujo de diésel para mantener la velocidad.

En un motor con sobre alimentación (motor - generador de la Administración Nacional de Electricidad ANDE, instalado en Bahía Negra, Chaco Paraguay), al aumentar la carga, la bomba inyectora incrementaba el suministro de diésel, y se generaba mayor volumen de humos

que aumentaba la velocidad de funcionamiento del turbo, lo que incrementaba el flujo de aire en la admisión y consecuentemente el flujo de gas arrastrado, que tendía a aumentar la velocidad; pero el sistema de control de la bomba inyectora reducía el flujo de diésel, manteniendo la velocidad constante. Es decir, en motores sobrealimentados el reemplazo de diésel se incrementa al aumentar la carga incluso a velocidad constante.

En el motor industrial estacionario sin turbo ensayado, la regulación de la bomba inyectora intentaba mantener la velocidad del motor constante. Las variaciones de carga producían solo mínimas variaciones en la velocidad del motor, por tanto, con bajas cargas el motor giraba con una velocidad ligeramente mayor produciendo un reemplazo de diésel mayor que a elevadas cargas.

Para la toma de datos y los cálculos respectivos se elaboraron varias tablas, de acuerdo al porcentaje de mezcla diésel - GNC, y las ecuaciones utilizadas para la determinación de potencia y otras magnitudes, fueron consultadas en un libro sobre motores endotérmicos [8]. Como muestra se tienen las Tablas 5 y 6.

Tabla 5: Datos medidos con diésel - GNC al 63% de reemplazo promedio.

DATOS COLECTADOS							
Prueba Nº	RPM	Fuerza (Kg)	Dieisel (ml)	Gas (kg)	T Humos (°C)	Tagua (°C)	Tiempo
DIESEL + GAS CON REEMPLAZO PROMEDIO			63,4%				
1	1874	12,06	500	14,260	562	73	0:00:00
	1870	11,98	400	14,140	555	74	0:02:50
	1887	11,98	300	14,040	552	75	0:05:45
	1886	11,96	200	13,940	554	75	0:08:43
utilizado	1879	12,00	300	0,320	556	74,3	523
2	1951	9,94	500	13,860	511	73	0:00:00
	1955	9,86	400	13,720	501	70	0:03:49
	1950	9,84	300	13,580	499	69	0:07:43
	1945	9,78	200	13,420	498	69	0:11:37
utilizado	1950	9,86	300	0,44	502	70,3	697
3	1970	6,56	500	13,340	423	66	0:00:00
	1968	6,50	450	13,200	413	63	0:03:13
	1965	6,58	400	13,100	411	62	0:06:24
	1966	6,56	350	12,980	410	61	0:09:37
utilizado	1967	6,55	150	0,36	414	63,0	577
4	1976	4,36	500	12,88	357	60	0:00:00
	1974	4,36	450	12,74	353	59	0:04:15
	1973	4,20	400	12,6	353	59	0:08:31
	1976	4,20	350	12,46	352	58	0:12:47
utilizado	1975	4,28	150	0,42	354	59,0	767

Tabla 6: Valores calculados con diésel-GNC al 63% de reemplazo promedio.

VALORES CALCULADOS							Ahorro %
potencia kW	consumo DIESEL (l/h)	consumo GAS (m3/h)	ce DIESEL (L/kwh)	Costo (Gs/kwh)	Rend. Térmico	Sustitución	
13,3	2,1	3,14	0,155	1.705	24,8%	57,1%	10,8%
11,4	1,5	3,24	0,136	1.793	23,0%	62,8%	7,6%
7,6	0,9	3,20	0,123	2.229	17,9%	70,2%	-2,0%
5,0	0,7	2,81	0,141	2.858	13,8%	73,1%	-3,2%

4. Resultados

En base a las Tablas, se elaboraron las curvas del comportamiento del motor trabajando a diferentes porcentajes de sustitución del diésel. En la Fig. 3 se pueden observar las variaciones del rendimiento térmico, donde a baja potencia, el rendimiento del sistema dual fue bajo con respecto al uso de 100% diésel.

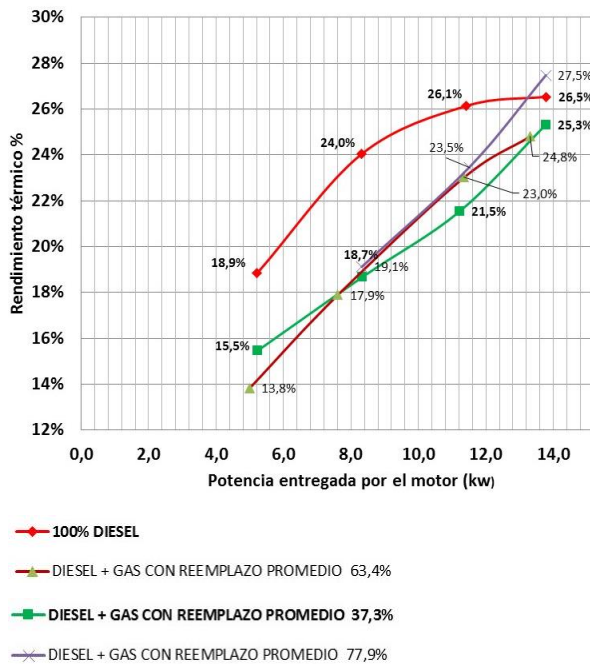


Fig. 3: Variación del rendimiento térmico del motor en función de la potencia.

En la Fig. 4 se puede observar la misma tendencia en la variación del consumo de diésel, en todas las curvas.

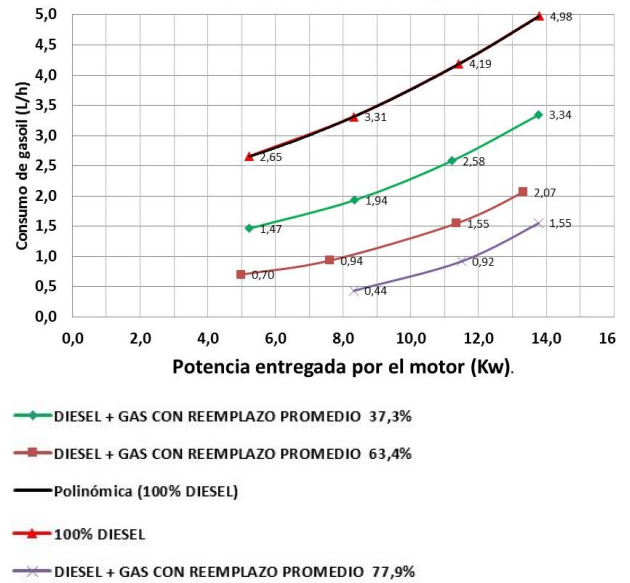


Fig. 4: Variación del consumo de diésel del motor en función de la potencia.

La Fig. 5 muestra la variación de la temperatura de los gases, que, a baja potencia en el uso dual, fueron más calientes y a alta potencia más fríos, con respecto al uso de 100% diésel.

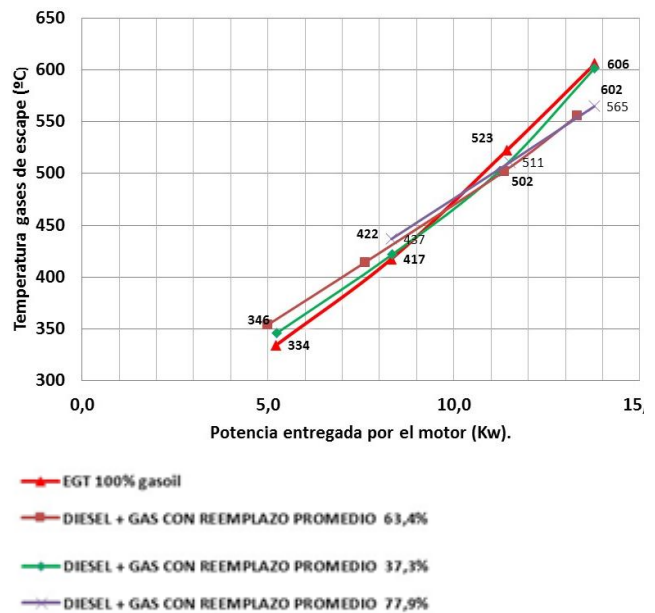


Fig. 5: Variación de la temperatura de los gases de escape en función de la potencia.

La temperatura de los gases de escape no tuvo gran variación con los reemplazos, aunque a elevado nivel de reemplazo la temperatura medida fue más baja a alta carga y ligeramente mayor a baja carga, con respecto al uso de 100% diésel.

La Fig. 6 muestra las curvas de variación de la temperatura del agua que refrigera al motor. En la utilización dual de combustible a altas potencias, la temperatura fue ligeramente superior a la temperatura usando solo diésel, pero fue ligeramente menor a baja carga.

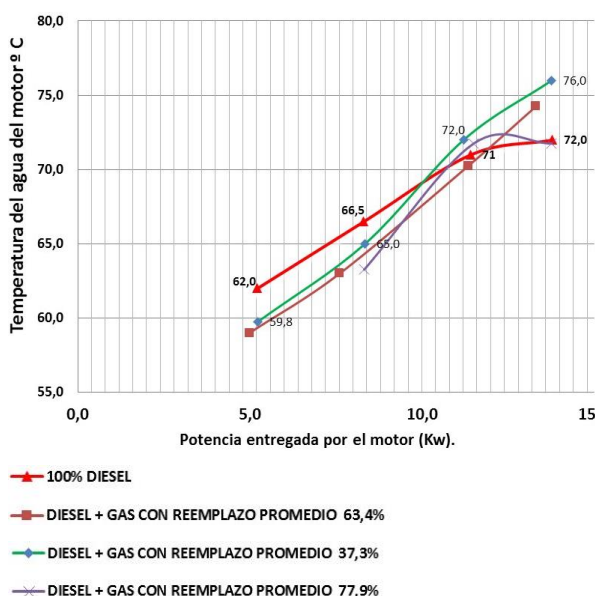


Fig. 6: Variación de la temperatura del agua en el motor en función de la potencia.

En la Tabla 7 se observa que el uso dual evidenció cierto ahorro a alta carga con alto nivel de reemplazo de diésel, no así a baja carga con alto nivel de reemplazo.

Se obtuvieron ahorros en todas las mezclas cuando se aplicaron cargas elevadas, con respecto al uso único de diésel, pero a bajas potencias, para el uso dual de combustible, se calcularon valores no viables económicamente, en el momento en que se realizaron las pruebas.

Tabla 7: Consumo y costos en función del porcentaje de sustitución y la potencia.

Sustitución	Potencia kw	Carga (%)	Consumo DIESEL (l/h)	Consumo GAS (m3/h)	Costo (Gs/kwh)	Ahorro %
0%	13,8	74,9%	4,98	0,0	1.910	
	11,4	62,1%	4,19	0,0	1.939	
	8,3	45,2%	3,31	0,0	2.108	
	5,2	28,4%	2,65	0,0	2.689	
37,3%	13,8	74,9%	3,34	1,9	1.804	5,6%
	11,2	61,0%	2,58	2,5	2.040	-4,9%
	8,3	45,4%	1,94	2,4	2.301	-9,3%
	5,2	28,4%	1,47	1,8	2.781	-3,6%
63,4%	13,3	72,4%	2,07	3,1	1.705	10,8%
	11,4	61,7%	1,55	3,2	1.793	7,6%
	7,6	41,4%	0,94	3,2	2.229	-2,0%
	5,0	27,1%	0,70	2,8	2.858	-3,2%
77,9%	13,8	74,9%	1,55	3,3	1.500	21,5%
	11,5	62,5%	0,92	3,9	1.681	13,2%
	8,3	45,2%	0,44	3,8	1.994	5,4%

5. Conclusiones

Se montó un banco de prueba para un motor de 2 cilindros de encendido por compresión, instalado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Itapúa.

Desde el punto de vista técnico, el uso dual de diésel y gas natural comprimido no presentó inconvenientes en la operación del motor.

Se realizaron las mediciones y calcularon las magnitudes físicas del funcionamiento del motor usando diésel y diésel – GNC en 3 porcentajes. El rendimiento térmico en el uso dual fue inferior, pero a medida que se aumentó el reemplazo de diésel y se aumentó la carga, se llegó a igualar e incluso se pudo superar el rendimiento obtenido con el uso de diésel exclusivo.

La temperatura de los gases de escape no tuvo gran variación en las mezclas y la temperatura del agua de refrigeración con el uso dual, fue ligeramente superior a alta carga.

Para el uso dual de los combustibles, los costos de operación disminuyeron para todas las mezclas, con cargas elevadas.

La utilización del gas natural extraíble en el Chaco Paraguayo podría ser una opción energética importante, dependiendo de la potencia que manejen los motores, de los precios del combustible en los mercados y de las Políticas Energéticas del Estado.

6. Referencias

- [1] Última hora (enero, 2024). Paraguay suma su pozo 54 con nueva perforación en busca de petróleo en el Chaco. Disponible en: <https://www.ultimahora.com/paraguay-suma-su-pozo-54-con-nueva-perforacion-en-busca-de-petroleo-en-el-chaco>
- [2] ABC (julio, 2022). Firma insta a utilizar gas natural para generar electricidad en el Chaco. Disponible en: <https://www.abc.com.py/nacionales/2022/07/10/firma-insta-a-utilizar-gas-natural-para-generar-electricidad-en-el-chaco/>
- [3] Valor Agro (agosto, 2016). Gas paraguayo da energía a toda Bahía Negra, en pleno Chaco. Disponible en: <https://www.valoragro.com.py/agricultura/gas-paraguayo-da-energia-a-toda-bahia-negra-en-pleno-chaco/>
- [4] Grupo HAM. Servicio integral de gas natural licuado y gas natural comprimido. Disponible en: <https://ham.es/que-es-gnc/>
- [5] Astrogranada.org. Tabla con producción relativa CO₂/kWh de diferentes combustibles y centrales. Disponible en: https://web.archive.org/web/20051226172139/http://www.astrogranada.org/cieloscuro/htm/la_cl_cifras.htm#
- [6] J. M. Ortiz, “Motor diésel implementado con gas natural”, Trabajo para obtener el Título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2017.
- [7] J. M. Mantilla, C. H. Galeano, J. Roncancio. “Desempeño y emisiones de un motor de combustión interna con combustible dual Diésel–Gas natural”. *Ingeniería Energética*, vol. 36, no 1, pp. 27-37, enero/abril 2015.
- [8] D. Giacosa. *Motores Endotérmicos*. Barcelona, España: Omega SA, 1988. -