

Informe 04 Laboratorio de máquinas:

Ensayo de grupo Electrónico

Felipe Eduardo Trujillo Preuss

Escuela de Ingeniería Mecánica

felipe.trujillo.p@mail.pucv.cl

09 de Octubre de 2020

1. Introducción

En este informe se ejecuta un análisis exhaustivo del comportamiento de un motor de combustión interna, en específico un Diesel, aplicado a un grupo electrógeno para la generación y distribución de energía eléctrica, que en este caso se disipa a través de resistencias.

Se determina la potencia eléctrica y el consumo específico en los bornes del alternador junto con el caudal volumétrico de combustible. Estos parámetros permiten obtener el costo de kWh generado y el punto de funcionamiento óptimo en RPM.

2. Desarrollo

La instalación se compone de diversos dispositivos acoplados, entre ellos se destacan especialmente el motor de GM y el alternador AEG.

El motor es un modelo Bedford 350 Diesel de 4 tiempos con 6 cilindros en línea verticales y una cilindrada de 5755 [cm^3].

Parámetros de operación del motor Bedford 350	
Diámetro x carrera [mm]	106,96 x 107,95
Potencia [HP]	137 a 3000 [RPM]
Par máximo [kgm]	33,047 a 1600 [RPM]
Relación de compresión	17,5:1
Sistema de combustible	Inyección directa
Bomba inyectora	Rotativa, regulador neumático
Orden de inyección	1-5-3-6-2-4
Refrigeración	Agua, por bomba centrífuga
Lubricación	Circulación forzada

Tabla 1. Especificación técnica del motor Bedford 350 [1]



Figura 1. Motor Bedford 350

La información obtenida relativa al motor proviene de diversas fuentes en torno a una gama de motores Bedford implementados en camiones de la marca Chevrolet en Argentina entre 1969 y 1974.

El alternador AEG trifásico es utilizado para la generación, distribución y uso de energía eléctrica con motores Diesel [2]. Sus especificaciones técnicas expuestas en su respectiva placa fueron condensadas en la siguiente tabla:

Datos de placa del alternador AEG DGK 4/60	
Número	100279
Voltaje [V]	400
Amperaje [A]	87,0
Potencia aparente [kVA]	60
Factor de potencia $\cos(\phi)$	0,8
RPM	1500
Frecuencia [Hz]	50
Err [V]	65
Err [A]	13,5

Tabla 2. Especificación técnica del Alternador AEG DGK

Para determinar un esquema general de la instalación, se procede a exponer el sistema de inyección, la bomba de combustible del motor y un diagrama del generador dentro del grupo electrógeno.

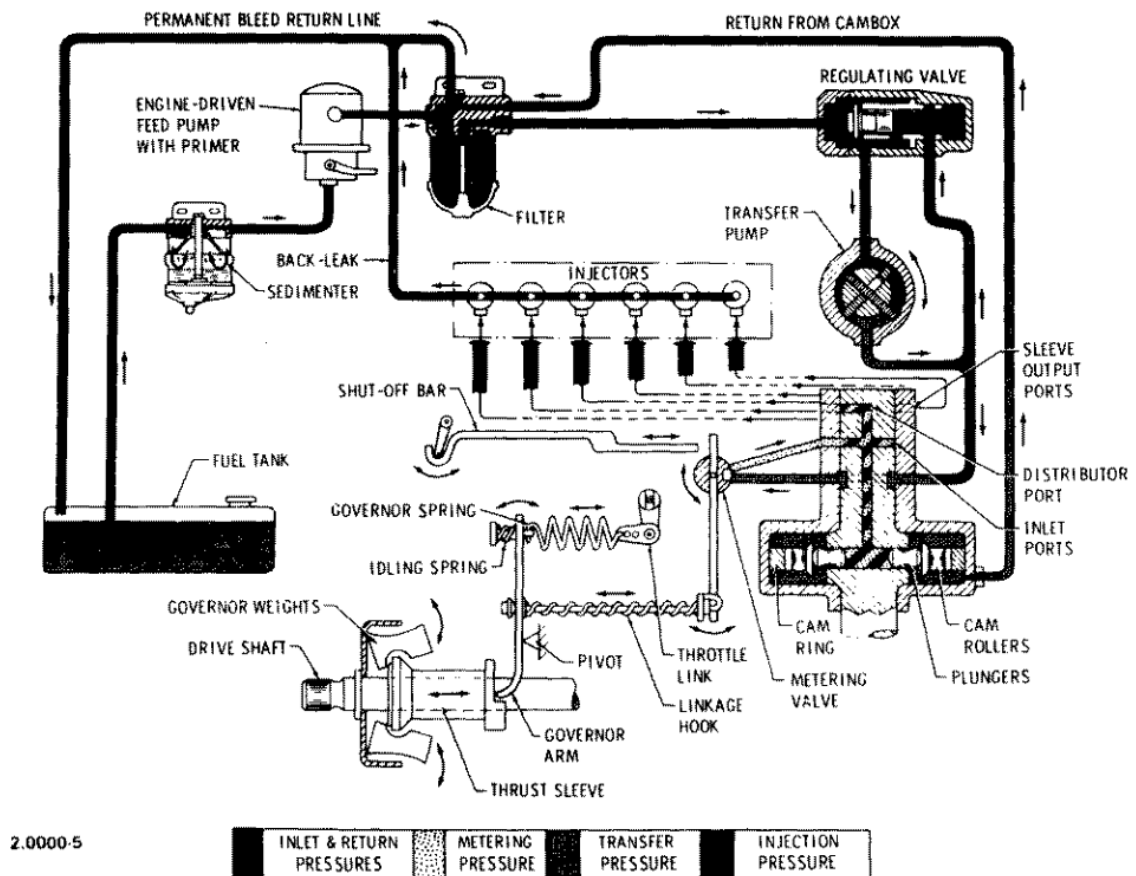


Figura 2. Sistema de distribución de combustible motor Bedford Diesel [3]

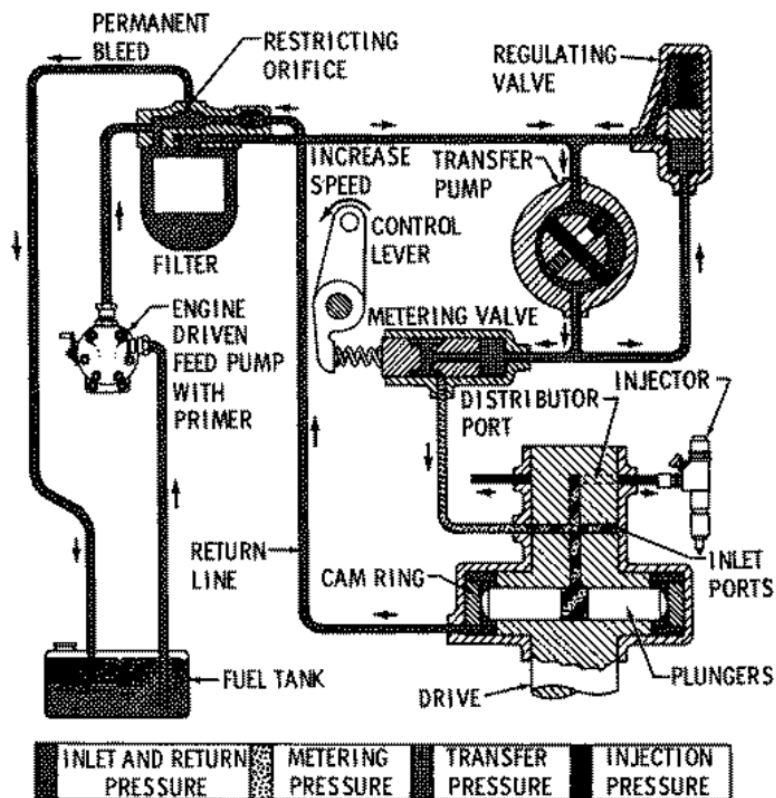


Figura 3. Sistema de la bomba inyectora de combustible motor Bedford Diesel [3]

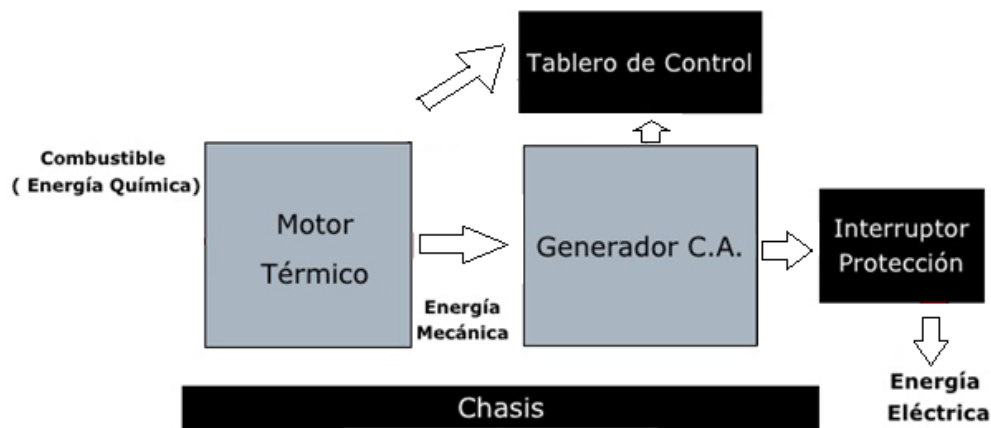


Figura 4. Representación general de un grupo electrógeno

[Identifique las resistencias disipadoras de calor, los bornes para medir la corriente y los dispositivos para medir el voltaje y la frecuencia]

Previo a realizar el experimento es útil contar con la siguiente información:

- Volumen de la bureta a ensayar: 375 cm^3
- Densidad del combustible Diesel: $\rho_c = 850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
- Costo del combustible Diesel: $495.4 [\text{CLP} / \text{L}] = 495400 [\text{CLP} / \text{m}^3]$

Procedimiento de adquisición de datos:

1. Poner en marcha el motor y llevarlo a la velocidad de 52 [Hz]
2. Poner la resistencia hidráulica a fondo
3. Conectar la carga
4. Verificar la frecuencia y reajustar alrededor de los 52 [Hz] si está bajo los 48 [Hz]. Continuar con este criterio durante todo el ensayo
5. Tomar la primera serie de valores de acuerdo con la tabla. Los valores de lectura instantánea, tomarlo una vez que se haya consumido la mitad del combustible de la probeta en uso.
6. Terminada la medición de tiempo de consumo, rellenar probeta e inmediatamente iniciar la segunda lectura con el incremento de carga que se logrará en forma automática por la disminución de la resistencia por aumento de la temperatura del agua. Consumida la mitad de la probeta leer valores instantáneos.
7. Seguir con el procedimiento análogo al descrito hasta que se llegue a plena carga o la ebullición del agua en la resistencia hidráulica sea muy violenta.

Los datos registrados son: volumen de combustible, tiempo de medición del consumo de combustible, corrientes y voltaje.

#	Variables eléctricas							Combustible	
	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	V1 [V]	V2 [V]	V3 [V]	f [Hz]	Vol [cm3]	t [s]
1	26	26	27	404	404	404	51,5	375	150
2	28	29	29	402	402	402	51	375	146
3	39	39	37	400	400	400	50,5	375	132
4	42,5	42,6	40,9	400	400	400	50	375	125
5	46,4	46,5	44,6	399,9	399,9	399,9	50	375	120

Tabla 3. Valores medidos en el ensayo

Las fórmulas y ecuaciones empíricas a utilizar corresponden a las siguientes:

$$I_m = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (2.1)$$

I_m : Corriente media [A]

$I_{1,2,3}$: Corrientes registradas [A]

$$V_m = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (2.2)$$

V_m : Tensión media [V]

$V_{1,2,3}$: Tensiones registradas [V]

$$P_{el} = \cos\phi \cdot V_m \cdot I_m \quad (2.3)$$

P_{el} : Potencia eléctrica [kW]

$\cos\phi$: Factor de potencia [—]

$$b_{el} = \rho_c \cdot \frac{\dot{Q}_{cb}}{P_{el}} \quad (2.4)$$

b_{el} : consumo específico en bornes del alternador [kg/kWh]

ρ_c : densidad del combustible [kg/m³]

\dot{Q}_{cb} : caudal volumétrico de combustible [m³/h]

$$C_{kWh} = \frac{\dot{Q}_{cb} \cdot c}{P_{el}} \quad (2.5)$$

C_{kWh} : costo del kWh generado [\$/kWh]

c : costo del combustible [\$/m³]

El factor de potencia se define como el ratio entre la potencia activa (kW) que genera trabajo y la potencia aparente (kVA) [4]. El generador no produce el factor de potencia, pero la carga sí. El estándar de la industria es que los generadores tengan un factor de potencia de 0.8, lo que significa que pueden manejar una carga de esa magnitud. En síntesis, es un indicador de eficiencia energética, un factor de potencia igual a 1, es sinónimo de una instalación más eficiente, ya que tiene menos energía reactiva o aparente (que no genera trabajo) circulando en el circuito. Un valor de factor de potencia bajo indica que la eficiencia energética es deficiente.

$$\cos\phi = \frac{kW}{kVA} \quad (2.6)$$

Una máquina eléctrica síncrona como el generador tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Esta velocidad corresponde a la de giro de un generador cuando esta es igual a la velocidad del campo magnético del estator.

$$\omega = \frac{2\pi f}{pp} \quad (2.7)$$

ω : velocidad síncrona [rad/s]

f : frecuencia de la red [Hz]

pp : pares de polos [–]

Parámetros					
Im [A]	Vm [V]	Pel [W]	Q cb [m ³ /h]	bel [kg/kWh]	C_kWh [\$/kWh]
26,3	404,0	8510,933	0,009	0,899	523,867
28,7	402,0	9219,200	0,009	0,853	496,871
38,3	400,0	12266,667	0,010	0,709	413,037
42,0	400,0	13440,000	0,011	0,683	398,089
45,8	399,9	14663,000	0,011	0,652	380,089

Tabla 4. Parámetros calculados en el ensayo

Potencia efectiva:

$$P_{ef} = 1.2155 \cdot P_{el} \quad (2.8)$$

Consumo específico del motor:

$$b_e = 0.8314 \cdot b_{el} \quad (2.9)$$

Parámetros adicionales			
ω [rad/s]	ω [RPM]	P _{ef} [kW]	be [kg/kWh]
161,79	1545	10344,9629	0,747
160,22	1530	11205,8546	0,709
158,65	1515	14910,0229	0,589
157,08	1500	16336,199	0,568
157,08	1500	17822,7445	0,542

Tabla 5. Parámetros adicionales calculados en el ensayo

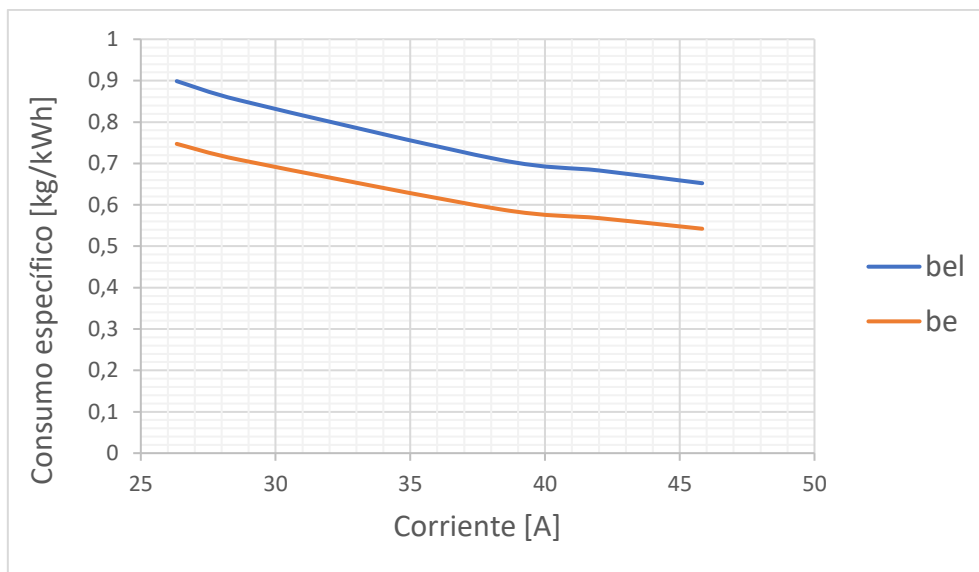


Gráfico 1. Consumos específicos versus corriente (ensayo)

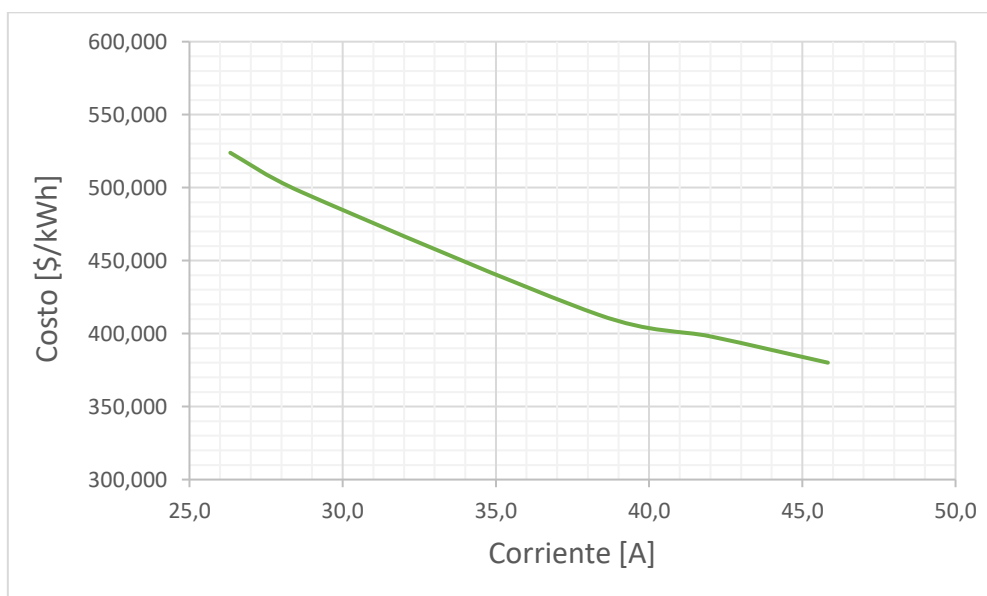


Gráfico 2. Costo del kWh generado en función de la corriente (ensayo)

2.1 Punto de funcionamiento óptimo

Para determinar el punto de funcionamiento óptimo se acoge a los datos que provee el fabricante y los gráficos que se pueden desprender.

Datos fabricante										
#	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	V1 [V]	V2 [V]	V3 [V]	f [Hz]	Vol [cm3]	tcomb	t [s]
1	22,3	22,5	21,7	330	370	390	52,5	375	2'50,19"	170,19
2	24	22,4	23,6	350	360	397	52,5	375	2'47,56"	167,56
3	26,3	26,9	26,1	391	382	410	52,5	375	2'45,24"	165,24
4	29,1	29,5	28,7	399	394	409,2	52	375	2'39,63"	159,63
5	31,9	32,4	31,3	389,4	392,3	407,2	52	375	2'33,05"	153,05
6	38,4	35,7	34,6	359,5	390,9	405,8	51,5	375	2'25,74"	145,74
7	38	38,8	37,7	388,8	387,9	399,4	51	375	2'18,84"	138,84
8	41,2	42,2	40,8	393,7	385,2	381,7	50,5	375	2'11,56"	131,56
9	44,5	45,6	43,9	389,2	381,9	393,1	50	375	2'02,72"	122,72
10	48	49,2	47,6	372,7	375,1	397,2	49,8	375	1'56,88"	116,88
11	46,9	58,6	56,7	403,6	409,7	403,4	53,5	375	1'33,42"	93,42
12	60,9	63,7	61,5	394,2	382,6	415,3	52,5	375	1'26,84"	86,84
13	65,3	66,9	64,5	378,9	391,5	413,9	52	375	1'19,56"	79,56
14	69,2	71,1	68,9	391,7	386,4	411,2	51	375	1'13,77"	73,77
15	73,1	74,7	72,3	370,1	382,7	403,7	50	375	1'06,93"	66,93

Tabla 6. Valores que provee el fabricante

Parámetros calculados fabricante								
Im [A]	Vm [V]	Pel [W]	Q' cb [m ³ /h]	bel [kg/kWh]	C_kWh [\$/kWh]	ω [RPM]	Pef [kW]	be [kg/kWh]
22,2	363,3	6443,1	0,008	1,046	609,902	1575	7831,5	0,870
23,3	369,0	6888,0	0,008	0,994	579,464	1575	8372,3	0,827
26,4	394,3	8338,8	0,008	0,833	485,366	1575	10135,8	0,692
29,1	400,7	9329,1	0,008	0,771	449,094	1560	11339,4	0,641
31,9	396,3	10103,0	0,009	0,742	432,520	1560	12280,1	0,617
36,2	385,4	11171,5	0,009	0,705	410,772	1545	13578,8	0,586
38,2	392,0	11970,1	0,010	0,690	402,419	1530	14549,5	0,574
41,4	386,9	12813,0	0,010	0,681	396,748	1515	15574,1	0,566
44,7	388,1	13866,9	0,011	0,674	393,002	1500	16855,1	0,561
48,3	381,7	14737,4	0,012	0,666	388,265	1494	17913,2	0,554
54,1	405,6	17542,1	0,014	0,700	408,101	1605	21322,3	0,582
62,0	397,4	19720,0	0,016	0,670	390,538	1575	23969,5	0,557
65,6	394,8	20706,8	0,017	0,697	405,958	1560	25169,0	0,579
69,7	396,4	22115,7	0,018	0,703	409,930	1530	26881,4	0,585
73,4	385,5	22626,3	0,020	0,758	441,627	1500	27502,0	0,630

Tabla 7. Parámetros calculados a partir de datos del fabricante

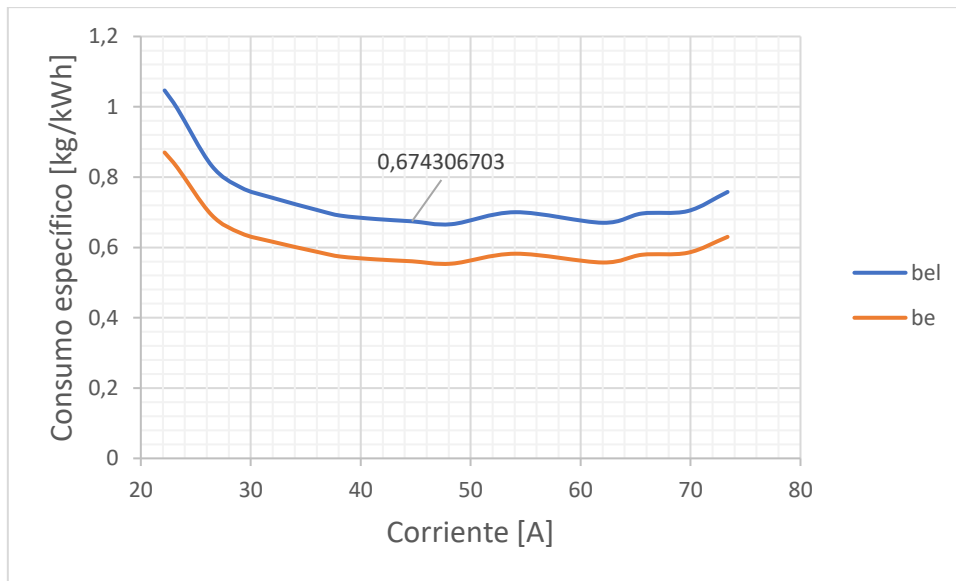


Gráfico 3. Consumos específicos versus corriente (fabricante)

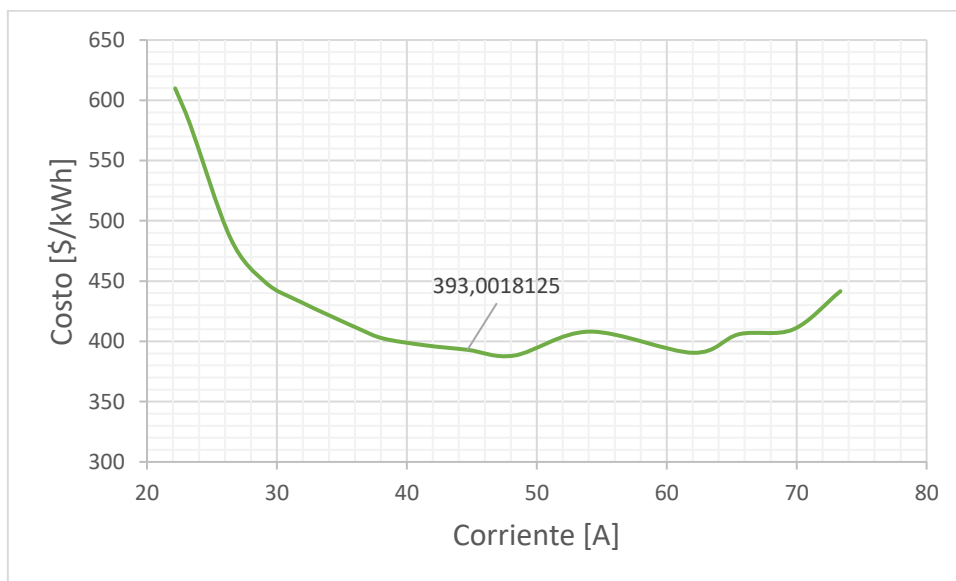


Gráfico 4. Costo del kWh en función de la corriente (fabricante)

Se aprecia que los valores de consumo específico y costo poseen valores mínimos en torno a un rango específico. Este rango se define como los valores de corriente y voltaje que tienden a situarse en magnitud aledaña o igual a 50 [Hz], vale decir, acercándose a ese valor de frecuencia la corriente tiende a ser aproximadamente 45 [A] y el voltaje tiende a ser 388 [V], los cuales producen la optimización del costo y consumo específico. Estos valores corresponden a los numerados 8, 9 y 10 en la tabla N°7. En resumen, el

punto de funcionamiento óptimo corresponde a cuando el grupo electrógeno opera con 50 [Hz] de frecuencia.

2.3 Comparación del costo por kWh generado

La mejor tarifa que ofrece CHILQUINTA corresponde a 122,497 [\$/kWh] en el sector de Puchuncaví [5]. Este valor es bastante menor comparado con el óptimo obtenido de los datos de ensayo (380,089 [\$/kWh]) y comparado con los datos del fabricante (388,265 [\$/kWh]). De hecho, la tarifa de CHILQUINTA constituye tan sólo 1/3 del costo que se genera con el grupo electrógeno.

El grupo electrógeno es un sistema de respaldo que asegura el suministro de energía eléctrica ante eventos de corte de red y en casos particulares se utiliza como herramienta de ahorro para su utilización en control de demanda en horas punta. Como esta pensado para esos objetivos, claramente su precio esta muy por encima de lo que ofrece la red de suministro eléctrico local, ya que genera gran magnitud de energía (del orden de MW) asociada a un bajo costo.

2.4 Grupo electrógeno de última generación

Para la selección de un grupo electrógeno moderno se opta por una marca reconocida a nivel mundial y que posee stock de repuestos en el mercado nacional. Se trata de un grupo electrógeno CUMMINS GS66, con proveedor la empresa SEGENER [6], que posee una potencia de 66 kVA con un estanque de 98 litros, lo suficiente para trabajar por 10 horas continuas con un consumo de 9,8 [L/h]. El criterio de selección radica en la similitud de potencia aparente con el grupo electrógeno estudiado en este informe, correspondiente a 60 kVA.



Figura 5. Grupo electrógeno CUMMINS GS66, SEGENER

El motor es un modelo CUMMINS 4BTA3.9G2 Diesel de 4 tiempos con 4 cilindros en línea verticales y una cilindrada de 3900 [cm³].

Parámetros de operación del motor CUMMINS 4BTA3.9G2	
Diámetro x carrera [mm]	102 x 120
Potencia máxima [kW]	53 a 1500 [RPM]
Potencia Prime [kW]	48 a 1500 [RPM]
Relación de compresión	17.3:1
Sistema de combustible	Inyección directa
Aspiración	Turbocargado & Intercooler
Refrigeración	Por agua
Lubricación	Circulación forzada

Tabla 8. Especificación técnica de motor CUMMINS 4BTA3.9G2 [6]

Datos del alternador STAMFORD UCI224E	
Voltaje [V]	400
Amperaje [A]	95
Potencia aparente [kVA]	66
Factor de potencia cos (ϕ)	0,8
[RPM]	1500
Frecuencia [Hz]	50

Tabla 9. Especificación técnica del alternador STAMFORD UCI224E [7]

Para calcular el costo del kWh generado se asume una condición operativa en “Potencia Prime”, las cual corresponde a 48 [kW] de potencia eléctrica generada con un consumo de 13,1 [L/h] a 1500 [RPM] equivalente a 0.0131 [m³/h] a 1500 [RPM] y frecuencia de 50 [Hz].

Al inyectar estos datos a la ecuación (2.5) se obtiene un costo de 135.203 [\$/kWh], el cual es sustancialmente menor que los mínimos obtenidos con los datos de ensayo (380,089 [\$/kWh]) y los que provee el fabricante (388,265 [\$/kWh]). Ahora bien, el costo que ofrece CHILQUINTA sigue siendo el menor de todos (122,497 [\$/kWh]), aunque se acerca bastante a lo obtenido con el grupo electrógeno moderno, por lo que esta alternativa es viable como sistema de respaldo para interrupciones no programadas del suministro de energía eléctrica.

Con respecto al consumo específico, se obtiene un valor de 0,232 [kg/kWh] para el consumo específico en los bornes del alternador y 0,193 [kg/kWh] para el consumo específico de combustible. Estas magnitudes son bastante menores en comparación a los mínimos obtenidos en el ensayo (alrededor de 1/3 en magnitud), lo cual deja en evidencia el notorio incremento en la eficiencia considerando que el motor moderno es de menores prestaciones tanto en potencia como en número de cilindros y cilindrada.

3. Conclusiones

Se infiere que existe un alto consumo de combustible de parte del grupo electrógeno estudiado compuesto por el motor Bedford 350 y el alternador AEG. Esto se evidencia por valores altos de caudal de combustible consumido, entre 9 y 12 [L/h], para potencias relativamente bajas que van desde 8 hasta 15 [kW], según los datos ensayados. Se asocia a la tecnología obsoleta que posee el sistema, aunque sigue funcionando de forma excelente, pero está bastante por debajo de los puntos de optimalidad en consumo con respecto a los sistemas actuales.

Otra atribución sugerente al problema es el estado de la bomba inyectora: puede que se haya dañado alguno de sus elementos, ya que se compone de muchas piezas y mecanismos pequeños que son indispensables para el correcto funcionamiento. La mecánica de las bombas inyectoras es muy precisa, con ajustes en el rango de 2-4 micrómetros y tolerancias de máximo 1 micrómetro. Se conjetura que la falla podría estar en alguna de estas piezas internas que produce una falta de compresión en el combustible.

Es necesario realizar un diagnóstico en el sistema de distribución del combustible, el proceso de purgado y la bomba inyectora, con el objetivo de detección de alguna falla mecánica o de otra índole que este afectando al óptimo caudal de combustible consumido.

4. Referencias

- [1] Chevrolet C-60 Motor Bedford 350 (2014). 08-10-2020, de Camión Argentino Sitio web: <https://camionargentino.blogspot.com/2012/04/chevrolet-c-60.html>
- [2] AEG Industrial Engineering. (2012). Información general. 08-10-2020, de AEG Sitio web: http://ib-ot.com/download/aeg_ie_informacion_general_es.pdf
- [3] Detroit Engines. (1975). GM Bedford Diesel 220-330-350 service manual. 08-10-2020, Link: <http://www.numeralkod.com/cross/archivemanuals/detroit%20engines/gm%20bedford%20diesel%20220-330%20service%20manual/part%201.pdf>
- [4] Flavio Humberto Fernández-Morales, Julio Enrique Duarte. (2015). Automatismo para el monitoreo y control de un grupo electrógeno con arranque eléctrico. Colombia: Scielo. Link: <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v11n2/v11n2a20.pdf>
- [5] Telergia. (2009). Recomendaciones para la Instalación de Grupo Electrónico FG Wilson. 08-10-2020, Link: <https://telergia.blogs.com/telergia/2009/04/recomendaciones-para-la-instalaci%C3%B3n-de-grupo-electr%C3%B3geno-fg-wilson-parte-1.html>
- [4] FG WILSON. (2012). GENERATOR SET POWER FACTOR EXPLAINED. 08-10-2020, Link: <http://www.fgwilson.ie/files/generator-set-power-factor-explained.pdf>
- [5] CHILQUINTA. (Agosto 2020). TARIFAS DE SUMINISTRO DE CHILQUINTA ENERGÍA SA. 08-10-2020, Link: <https://www.chilquinta.cl/storage/pdf/809286b550f74017cc95771dea875acb.pdf>
- [6] SEGENER. (2015). Ficha Técnica Generador Diesel Trifásico 66kVA. 08-10-2020, Link: <http://www.segener.cl/pdf/Generador%20El%C3%A9ctrico%20Cummins%2066kva.pdf>
- [7] STAMFORD. (2014). Technical Data Sheet UCI224E. 08-10-2020, Link: https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/UCI224E-14-TD-EN_Rev_A.pdf