

Informe 03 Laboratorio de máquinas: MCI – Plena Carga – Balance Térmico

Felipe Eduardo Trujillo Preuss
Escuela de Ingeniería Mecánica
felipe.trujillo.p@mail.pucv.cl

02 de Octubre de 2020

1. Introducción

En ese informe se ejecuta un análisis exhaustivo del funcionamiento de un motor a combustión interna a plena carga a través de sus parámetros fundamentales de operación. Estos parámetros corresponden a la Presión Media Efectiva, Torque, Consumo específico de combustible, Potencia efectiva, Temperatura del aceite, Presión de admisión y Temperatura de gases de escape, todos aquellos en función de la velocidad a plena carga.

Se procede a comparar estos parámetros y las curvas que forman en contraste con la velocidad, con respecto a los valores y curvas que proporciona el fabricante del motor.

2. Desarrollo

El procedimiento de ensayo se realiza según la norma GINE RATING CODE DIESEL – SAE J27, documento que proporciona las directrices para efectuar los cálculos necesarios e indica de forma coherente los factores de corrección de unidades.

La instalación en la que se efectúa el ensayo consiste en el siguiente listado de equipos e instrumentos:

- Dinamómetro mecánico Heenan & Froude serie G
- Mesa universal de montaje de motores
- Sistema de alimentación del freno: motobomba, piping y pozo.
- Sistema volumétrico de medición del consumo de combustible y de alimentación de combustible: estanque de 25 litros, probeta graduada y filtros.

Acoplado a dicha instalación se encuentra el motor a ensayar: Diesel de tres cilindros, marca Deutz, modelo F3L912.



Figura 1: Motor Deutz F3L912 refrigerado por aire [1]

Previo a realizar el ensayo es útil contar con: el volumen de la bureta a ensayar (125 cm^3), la gravedad específica del combustible Diesel, el número de tiempos del motor, el número de vueltas por ciclo del cigüeñal y la constante del dinamómetro. Una vez recopilada esta información previa es posible realizar con éxito el procedimiento de adquisición de datos:

1. Poner en funcionamiento el registrador de temperaturas
2. Poner en marcha el motor y acelerarlo paulatinamente. La carga va escalando hasta llegar a la plena carga a 100 [rpm] . La tolerancia de la velocidad de rotación corresponde a $\pm 5\text{ [rpm]}$ y el acelerador permanece fijo a fondo durante el ensayo.
3. Lograda la estabilidad, se inicia la primera tanda de mediciones. Las lecturas instantáneas como la velocidad de rotación, indicación de la balanza del dinamómetro y temperaturas se deben registrar una vez se haya consumido la mitad del volumen de la probeta de combustible.
4. Una vez tomadas las lecturas, se debe quitar la carga de forma que el motor se acelere a $1100 \pm 5\text{ [rpm]}$. Se deben tomar las lecturas de acuerdo con el procedimiento descrito en el punto anterior.
5. El ensayo continúa aumentando la velocidad en $100 \pm 5\text{ [rpm]}$ hasta llegar a la velocidad en que la potencia cae notoriamente.



Figura 2: Probeta de combustible

Valores Medidos										
N°	Velocidad Referencia	Velocidad Real	Carga Freno	Vcomb	tcons	Tamb	Tadm	Taceite	Tesc	Δpadm
	[rpm]	[rpm]	[-]	[cm ³]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mmH2O]
1	1000	1002	4,55	125	99	18	29	72	468	76
2	1100	1102	4,6	125	88	18	29	74	482	79
3	1400	1402	4,84	125	65	18	27	88	550	102
4	1500	1500	4,81	125	62	18	28	91	551	110
5	1600	1598	4,74	125	61	18	29	93	549	116
6	2100	2098	4,27	125	50	20	29	99	530	188
7	2200	2198	3,96	125	50	20	29	99	514	200

Tabla 1: Datos registrados en el ensayo de plena carga

La tabla presentada condensa los datos relevantes que fueron adquiridos, los cuales en orden corresponden a: Número de medición, lectura del dinamómetro, velocidad del motor, carga al freno, volumen de combustible, tiempo de medición del consumo de combustible, temperatura del ambiente, temperatura de admisión, temperatura del cárter de aceite, temperatura de descarga y la variación de presión en la succión.

Las mediciones se distribuyen en dos, pertenecientes al rango inferior, tres intermedios y dos superiores, para cubrir todo el espectro de velocidades y con ello verificar el comportamiento de los parámetros de interés.

Es necesario, antes de calcular, efectuar una caracterización e identificación completa del motor:

- Marca: Deutz, Modelo: F3L912; EC, 4T, AN, enfriado por aire
- Cilindrada: 2827 [cm³]
- N° de cilindros: 3
- Diámetro: 100 [mm]
- Carrera: 120 [mm]
- Pot. Máxima: 47 [CV] @ 2300 RPM DIN A 6270 continua
- Pot. Máxima: 52 [CV] @ 2500 RPM DIN B 6270 intermitente
- Torque Max: 16 [kpm] @ 1500 RPM DIN A 6270 continua
- Torque Max: 16,5 [kpm] @ 1500 RPM DIN B 6270 intermitente

Ahora bien, a establecer las fórmulas y ecuaciones empíricas necesarias para obtener los parámetros operacionales que requerimos, a partir de los datos adquiridos en el ensayo.

$$bp = \frac{N \cdot L}{K} \quad (1)$$

bp : Potencia al freno [kW]

N : velocidad del motor [rpm]

L : escala de lectura del dinamómetro [kp]

K : constante del dinamómetro igual a 286 [-]

$$bmep = \frac{E \cdot a}{D \cdot N} \cdot bp \quad (2)$$

$bmep$: presión media efectiva [bar]

E : factor de corrección para unidades de trabajo igual a 600000 [–]

a : Revoluciones del cigüeñal por ciclo equivalente a 2 [–]

D : cilindrada [cm^3]

$$T = \frac{60 \cdot 1000 \cdot bp}{2 \cdot \pi \cdot N} \quad (3)$$

T : Torque [$N \cdot m$]

$$ce = \frac{\dot{m}_c}{bp} = \frac{\rho_{comb} \cdot V_{comb}}{t_{cons} \cdot 3600} \quad (4)$$

ce : consumo específico de combustible [g/kWh]

\dot{m}_c : flujo másico de combustible consumido [g/h]

ρ_{comb} : densidad del combustible [$\frac{g}{cm^3}$] equivalente aprox. a 0.8

V_{comb} : volumen de combustible equivalente a $125 cm^3$

t_{cons} : tiempo de consumo de combustible [s]

A partir de estas fórmulas y el programa Excel, se procede a calcular los resultados de cada parámetro de operación relevante:

Valores Calculados						
Nº	RPM	bp [kW]	$bmep$ [bar]	T [Nm]	\dot{m}_c [g/h]	ce [g/kWh]
1	1000	16,37	6,95	156,01	3636,36	222,13
2	1100	18,20	7,02	157,73	4039,77	221,94
3	1400	24,37	7,39	165,96	5469,23	222,47
4	1500	25,91	7,33	164,93	5733,87	222,32
5	1600	27,20	7,22	162,53	5827,87	222,27
6	2100	32,17	6,50	146,41	7110,00	224,03
7	2200	31,25	6,03	135,78	7110,00	227,49

Tabla 2: Datos calculados en el ensayo de plena carga

El análisis debe efectuarse primeramente construyendo una serie de datos en CDF (13 datos) de los parámetros mencionados que fueron obtenidos por el fabricante y expuestos en una curva que cubre mayor rango de velocidades. Posteriormente se acopla la curva del fabricante con los valores calculados en este ensayo para formular deducciones.

Valores Fabricante				
Nº	RPM	bp [kW]	T [Nm]	ce [g/kWh]
1	1000	16	171	219,0
2	1100	18	175	219,0
3	1200	20	180	219,0
4	1300	22	184	219,0
5	1400	24	190	219,0
6	1500	26	193	219,0
7	1600	27	190	219,0
8	1700	28	188	219,5
9	1800	29	187	220,0
10	1900	30	185	219,9
11	2000	31	182	220,0
12	2100	33	180	223,0
13	2200	35	177	227,0

Tabla 3: Datos extraídos de curvas del fabricante

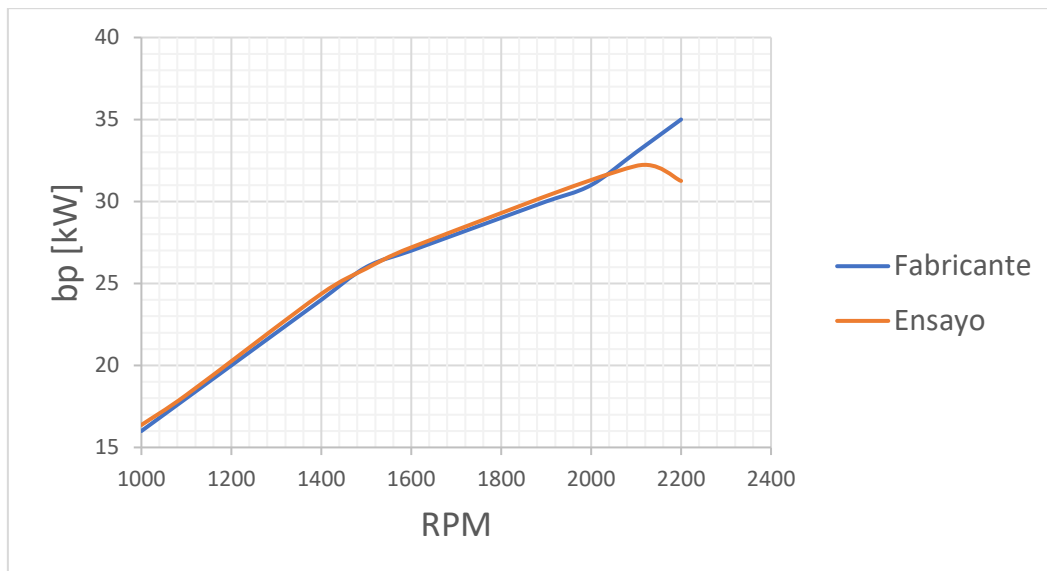


Gráfico 1: Potencia al freno versus velocidad del motor

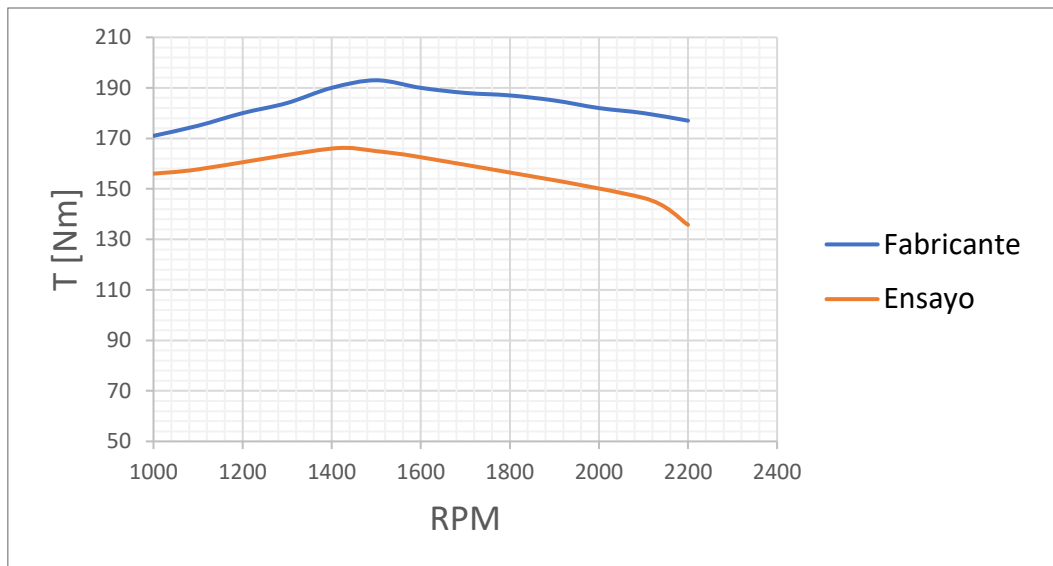


Gráfico 2: Torque versus velocidad del motor

2.1 Torque y Potencia

Para explicar el comportamiento de la curva de Torque y Potencia y sus diferencias, partimos de cierta base teórica. En un motor Diesel, la combustión de la mezcla aire-combustible genera un aumento de presión y temperatura en el interior de los cilindros. Esta presión interior produce a su vez una fuerza (F) de empuje sobre el pistón que lo desplaza generando el movimiento en el mecanismo de biela-manivela de los motores de combustión interna alternativos, donde el movimiento de traslación del pistón en el interior del bloque motor se transforma en un movimiento circular de giro del cigüeñal.

El torque (T) es el producto de la fuerza aplicada (F) de empuje a los cilindros por la distancia (d) al eje geométrico de giro del árbol del cigüeñal.

$$T = F \cdot d \quad (5)$$

Se comprende que la fuerza (F) que produce el par motor es una fuerza variable, que en el caso de un motor de 4T es máximo en el momento en que se produce la combustión de la mezcla y su posterior expansión en el cilindro, siendo negativa, esto es, no genera par motor en las demás fases (expulsión de gases, aspiración y compresión de la mezcla). Dentro de la fase donde se genera Torque (fase de combustión), el rendimiento del motor no es el mismo dependiendo del régimen de giro al igual que el valor de la fuerza (F) de empuje que se genera. Por lo tanto, a bajas revoluciones la combustión de la mezcla no resulta óptima debido a la escasa inercia que poseen los gases, que provoca que el llenado del cilindro no sea el óptimo, al igual que su vaciado. Por otro lado, si el motor funciona a un elevado régimen, tampoco el llenado de los cilindros es completo, debido al escaso tiempo que dispone el gas para ocupar todo el recinto. Por ello, la curva de Torque se convierte en una curva, empieza siendo ascendente hasta llegar a las revoluciones donde el motor rinde el Torque máximo, que es el punto de diseño óptimo y corresponde a 1500 [RPM] en el caso de este motor Diesel, como se puede apreciar en el gráfico N°2. Vale

decir, es el punto de operación donde está más exigido el motor. A partir de ese momento, el Torque comienza a disminuir progresivamente, debido a los siguientes factores:

1. El avance a la inyección no es suficiente
2. La combustión empieza a no ser óptima
3. La fracción de tiempo para cada combustión se reduce
4. Una inadecuada evacuación de gases quemados
5. Insuficiente llenado de aire en cada ciclo

En consecuencia, aunque quememos más combustible acelerando el motor y consiguiendo que la potencia todavía aumente más, el Torque descende. Por ello es que el consumo específico óptimo de combustible está en un valor cercano al torque máximo, aumentando el consumo del motor conforme se aleja de este rango.

Con respecto a la curva de Potencia, que se aprecia en el gráfico N°1, en magnitud aumenta conforme sube el régimen de velocidad hasta un valor máximo. En esa condición máxima, aunque se acelere más la velocidad del motor, éste no es capaz de entregar más potencia. El límite máximo de revoluciones a la que se puede girar el motor es establecido por el fabricante.

Es notable que la máxima potencia no corresponde con los RPM del máximo torque. Esto se debe a que la potencia es el producto del Torque por la velocidad de giro y aunque se alcance el punto donde empieza a decrementar el torque, este efecto se compensa con el aumento del régimen de giro del motor y por ello la potencia sigue aumentando.

$$P = T \cdot \omega \quad (6)$$

Una situación que involucre un aumento del torque resistente, por ejemplo, al subir una carretera en pendiente, el motor es capaz de adaptarse automáticamente disminuyendo su régimen de giro, aumentando el par motor. Análogamente, si decremента el torque resistente, por ejemplo, al volver a un tramo sin pendiente, el requerimiento de torque es menor y se logra aumentando la velocidad del motor.

En síntesis, el torque escribe cuánto trabajo puede hacer un motor y la potencia describe qué tan rápido se puede hacer ese trabajo.

2.2 Consumo específico

Con respecto al consumo específico de combustible, corresponde a la relación que existe entre la masa de combustible consumida y la potencia entregada por la unidad de tiempo. Su gráfica representa como varía el consumo con relación al régimen de giro del cigüeñal y suele tener un comportamiento inverso a la curva del Torque, vale decir, en las condiciones de torque máximo se consigue un consumo específico mínimo.

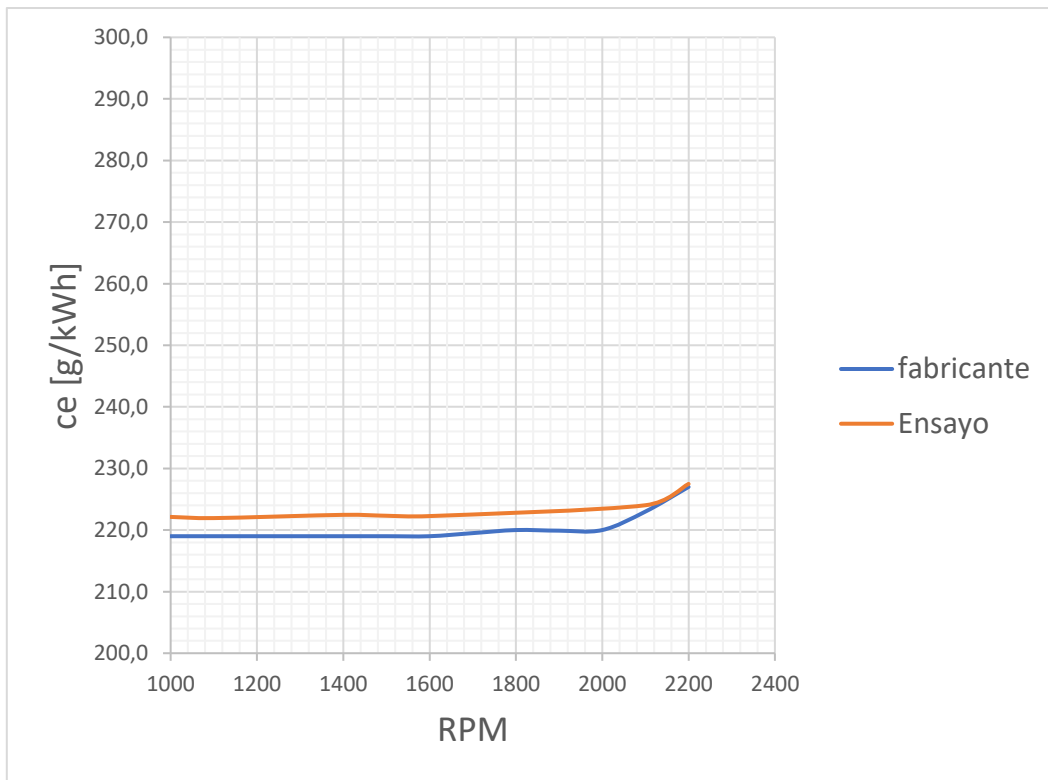


Gráfico 3: Consumo específico de combustible versus velocidad del motor

2.3 Comportamiento de Temperaturas

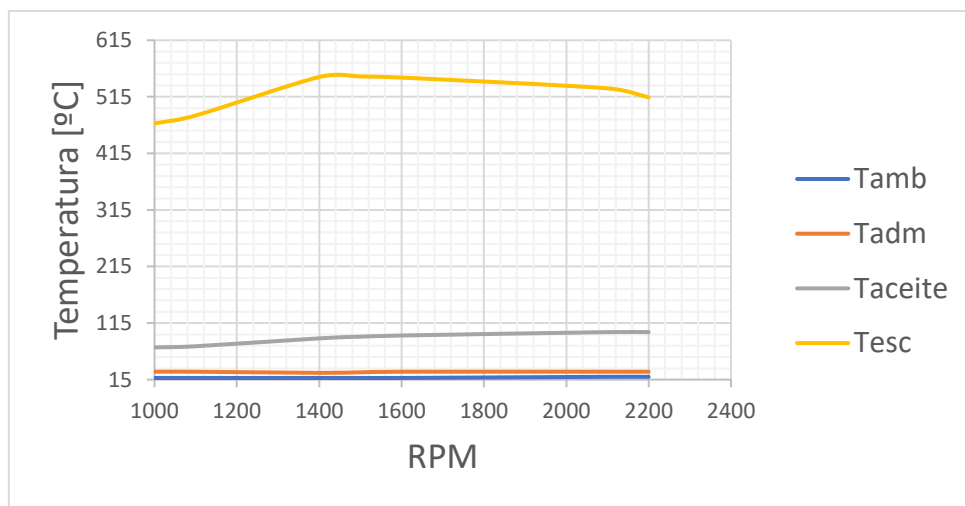
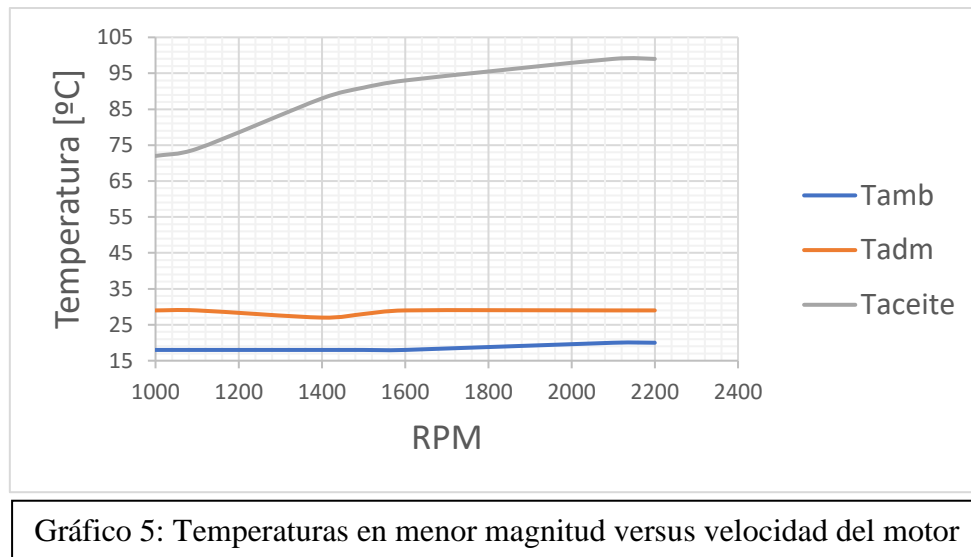


Gráfico 4: Temperaturas medidas versus velocidad del motor

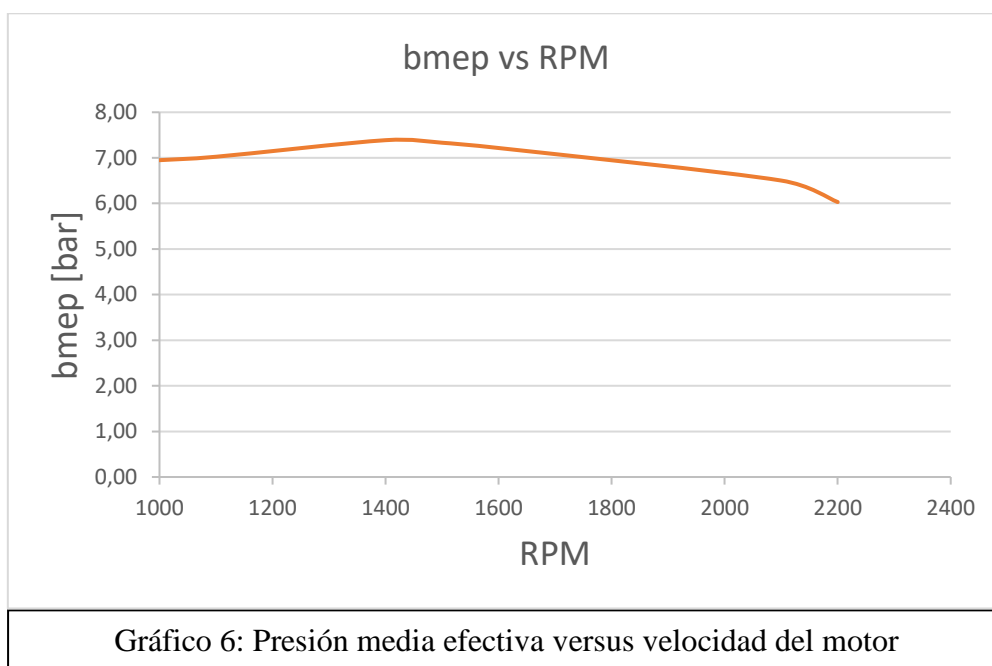


Se aprecia que la temperatura ambiente y la de admisión poseen una similar tendencia constante en sus respectivas curvas, con la salvedad de que la temperatura de admisión es aproximadamente 10[°C] mayor que la ambiente. Esto se debe por efecto de la temperatura de los gases de escape y el calor que emiten todos los dispositivos acoplados en el motor, lo cual elevan considerablemente la temperatura correspondiente al aire que se introduce en los cilindros.

La temperatura del aceite incrementa proporcionalmente al régimen de velocidad del motor, debido a que es capaz de absorber calor además de lubricar todas las partes necesarias. A la hora de refrigerar un motor nos encontramos con dos frentes: el área exterior donde actúa el fluido refrigerante evacuando cerca del 60% de la energía térmica residual y el área interior distribuida entre piezas y partes como camisas, pistones, bielas y cojinetes donde el aceite es el encargado de evacuar el porcentaje restante. La temperatura ideal de operación depende del proveedor específico, sin embargo, es posible afirmar que el rango se sitúa entre 60°C y 105°C, con variaciones en la viscosidad, vale decir, disminuye con el incremento de la temperatura. Si llegase a 120°C es señal de alarma y a partir de los 150°C empieza a perder sus propiedades [3]. Se establece que generalmente la temperatura óptima operativa del aceite de motor se sitúa entre los 85°C y 95°C debido a que al calentarse puede bombearse fácilmente a las partes superiores para lubricar los cojinetes de los árboles de levas. Coincidentemente, para el motor estudiado en este ensayo, en la velocidad óptima de 1500 [RPM] se obtiene una temperatura del aceite de 91[°C].

La temperatura en el escape incrementa a medida que aumenta la velocidad hasta el punto de operación de máxima exigencia del motor correspondiente a 1500 [RPM] y un valor máximo de temperatura de 551[°C]. A partir de ese punto decremanta con una tasa menor a la de subida hasta llegar a los 514[°C]. Esta bajada de temperatura se explica por el alejamiento del punto de máxima exigencia constituyendo una mayor tasa de transferencia de calor a través de las paredes de los cilindros.

2.4 Presión Media Efectiva (PME)



La PME es una presión ficticia que, si actuara sobre el pistón durante toda la carrera de potencia, produciría la misma cantidad de trabajo neto que el producido durante el ciclo real. Es un parámetro puramente teórico y no tiene relación alguna con la presión actual en los cilindros, se constituye como una herramienta simple para evaluar la eficiencia de un motor produciendo torque con un desplazamiento dado [4].

Como la PME es una función lineal de la cilindrada y número de revoluciones junto con la velocidad del motor, su comportamiento es similar a la curva de Torque anteriormente expuesta. Incrementa hasta el punto de mayor exigencia correspondiente a 1500 [RPM] con un valor de 7.39 [bar] y posteriormente decrementa.

3. Conclusiones

Se destaca que inevitablemente se produce una diferencia apreciable en magnitud entre los valores obtenidos en el ensayo y los entregados por el fabricante para la curva de Torque y consumo específico de combustible. El diagrama de potencia efectiva de igual forma posee discordancias puntuales.

Se conjetura que estas diferencias se producen por las pérdidas mecánicas, producidas, por ejemplo, por efectos de roce, variaciones de temperaturas; al tratarse de un motor que lleva una cantidad considerable de años de funcionando. Se infiere que probablemente existe un problema con el termostato del sistema de enfriamiento, ya que si el motor no alcanza la temperatura de operación diseñada con un sobre-enfriado, se requiere mayor cantidad de combustible. Básicamente utiliza más combustible para lograr el nivel de velocidad deseado. Por ello el motor consume mayor cantidad de combustible que el indicado y rinde menor cantidad de torque.

4. Referencias

- [1] Houfeng Trading. (2019). Deutz F3L912 refrigerado por aire. 01-10-2020, de Aliexpress, Link: <https://es.aliexpress.com/item/32503809353.html>
- [2] Ingemecánica (2012). La Potencia y el Par Motor, Estudio de la Cadena Cinemática, Estabilidad en los Vehículos. 01-10-2020, Link: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn63.html>
- [3] Compra Lubricantes. (2016). Temperatura del aceite ¿Cuándo es peligrosa?. 01-10-2020, Link: <https://compralubricantes.com/blog/temperatura-del-aceite-cuando-es-peligrosa/>
- [4] Cengel, Boles: Termodinámica, Séptima edición, Ed Mc Graw Hill, 2012.
- [5] Morán, M.J. Shapiro, H.N: Fundamentos de Termodinámica. Ed. Reverte, 1999.