

## Anexo VI. Toma de datos para los ensayos 1 y 2

A continuación, se muestran las tablas correspondientes a las tomas de datos para los ensayos 1 y 2.

Toma de datos - Ensayo 1							
Fecha:		04/06/2012					
Hora inicio:		15:30:00					
Hora fin:							
N°	Parámetro	Abreviatura	Unidad	Cargas			
				5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f
1	Hora de medición	-	-	15:36:00	15:43:00	15:51:00	16:00:00
2	Carga real*	$F_R$	kg-f	5,1	7,5	9,9	12,4
3	Velocidad angular	n	rpm	3000	3000	3000	3000
4	Presión atmosférica	$P_{atm}$	atm	1	1	1	1
5	Temperatura ambiente	$T_0$	°C	21,5	21,5	23,0	23,0
6	Humedad relativa	HR	%	80	80	78	76
7	Temperatura de ingreso a la tobera†	$T_1$	°C	39	48	80	85
8	Temperatura de ingreso a la cámara de combustión††	$T_2$	°C	132	132	130	129
9	Temperatura de salida de la cámara de combustión‡	$T_3$	°C	563	589	602	620
10	Temperatura a la salida de la turbina‡‡	$T_4$	°C	456,7	472,1	481,2	494,3
11	Presión a la salida del compresor (manométrica)	$P_2$	bar	1,45	1,40	1,40	1,40
12	Tiempo en consumir 2000 cm <sup>3</sup> de combustible	$t_{2L}$	s	228,36	222,76	215,02	206,95
13	Diferencia de presiones entre la salida y entrada a la cámara de combustión	$\Delta h_{CC}$	mm <sub>Hg</sub>	45	45	45	45

14	Diferencia de presiones entre la turbina y el ambiente	$\Delta h_{\text{turb}}$	mm <sub>H2O</sub>	46	71	62	66
15	Diferencia de presiones entre la tobera y el ambiente	$\Delta h_{\text{tob}}$	mm <sub>H2O</sub>	165	160	158	155
16	Gases de escape: porcentaje de oxígeno (O <sub>2</sub> )	%O <sub>2</sub>	%	16,97	17,45	17,40	17,32
17	Gases de escape: porcentaje de CO <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%	2,96	2,60	2,64	2,70
18	Gases de escape: ppm de CO	ppm <sub>CO</sub>	ppm	1468	367	371	364
19	Gases de escape: ppm de NO	ppm <sub>NO</sub>	ppm	34	29	32	33
20	Gases de escape: ppm de NO <sub>2</sub>	ppm <sub>NO2</sub>	ppm	0	0	0	0
21	Gases de escape: ppm de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	ppm <sub>CxHy</sub>	ppm	0	180	570	1100
22	Temperatura superficial media del compresor	T <sub>media.comp</sub>	°C	80	82	84	86
23	Temperatura superficial media de la cámara de combustión	T <sub>media.CC</sub>	°C	170	173	176	179
24	Temperatura superficial media de la turbina	T <sub>media.turb</sub>	°C	119	123	127	131

#### Toma de datos - Ensayo 2

Fecha: 05/06/2012

Hora inicio: 15:10:00

Hora fin:

N°	Parámetro	Abreviatura	Unidad	Cargas			
				5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f
1	Hora de medición	-	-	15:18:00	15:33:00	15:45:00	15:56:00
2	Carga real*	F <sub>R</sub>	kg-f	4,9	7,4	10,0	12,4
3	Velocidad angular	n	rpm	3000	3000	3000	3000

4	Presión atmosférica	$P_{atm}$	atm	1	1	1	1
5	Temperatura ambiente	$T_0$	°C	22,5	23,5	23,5	24,0
6	Humedad relativa	HR	%	72	71	71	69
7	Temperatura de ingreso a la tobera†	$T_1$	°C	35	35	36	33
8	Temperatura de ingreso a la cámara de combustión††	$T_2$	°C	132	132	130	129
9	Temperatura de salida de la cámara de combustión‡	$T_3$	°C	560	590	605	622
10	Temperatura a la salida de la turbina‡‡	$T_4$	°C	458,9	474,3	489,9	500,5
11	Presión a la salida del compresor (manométrica)	$P_2$	bar	1,45	1,40	1,40	1,40
12	Tiempo en consumir 2000 cm <sup>3</sup> de combustible	$t_{2L}$	s	230,26	223,16	214,20	206,23
13	Diferencia de presiones entre la salida y entrada a la cámara de combustión	$\Delta h_{CC}$	mm <sub>Hg</sub>	52	50	50	50
14	Diferencia de presiones entre la turbina y el ambiente‡‡‡	$\Delta h_{turb}$	mm <sub>H2O</sub>	56	62	65	65
15	Diferencia de presiones entre la tobera y el ambiente	$\Delta h_{tob}$	mm <sub>H2O</sub>	164	160	155	153
16	Gases de escape: porcentaje de oxígeno (O <sub>2</sub> )	%O <sub>2</sub>	%	17,62	17,48	17,40	17,33
17	Gases de escape: porcentaje de CO <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%	2,47	2,58	2,64	2,69
18	Gases de escape: ppm de CO	ppm <sub>CO</sub>	ppm	259	255	250	252
19	Gases de escape: ppm de NO	ppm <sub>NO</sub>	ppm	26	28	31	32

20	Gases de escape: ppm de NO <sub>2</sub>	ppm <sub>NO2</sub>	ppm	0	0	0	0
21	Gases de escape: ppm de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	ppm <sub>CXHY</sub>	ppm	220	1190	1510	2130
22	Temperatura superficial media del compresor	T <sub>media.comp</sub>	°C	80	82	84	86
23	Temperatura superficial media de la cámara de combustión	T <sub>media.CC</sub>	°C	170	173	176	179
24	Temperatura superficial media de la turbina	T <sub>media.turb</sub>	°C	119	123	127	131

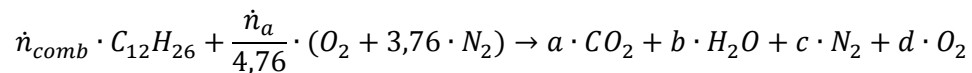
\* Dado que la edad de la turbina es un factor importante en todo momento, desde que se discutió con el personal del LABEN la posibilidad de usarla, se informó acerca de restricciones en cuanto a las cargas del freno. Ya que la turbina había sufrido reparaciones en uno de sus álabes, la carga no debía acercarse a los 15 kg-f. Es por este motivo que se acordó que las cargas llegaran solo hasta 12,5 kg-f. Del mismo modo, en las pruebas preliminares a los ensayos, se constató visualmente que la turbina, aun teniendo el freno sin ser aplicado, hacía que el dinamómetro mida 2,5 kg-f aproximadamente. Por ello, la turbina no se pudo probar en vacío.

† Existe un problema con las termocuplas del panel central. Estas mostraban valores que oscilaban significativamente. Al momento de realizar las mediciones, estas oscilaciones generaron una gran incertidumbre en la medición; y si bien la incertidumbre no se ha considerado dentro de los cálculos, la única incertidumbre a considerarse ha sido las de los errores de lectura en los instrumentos presentes al momento de realizar las mediciones.

Particularmente, la termocupla que medía la temperatura del punto 1 (temperatura del aire antes de ingresar al compresor) y que se ubicaba en la rejilla que protege el ingreso de la tobera, debería de marcar, en la pantalla correspondiente, la temperatura ambiente (T0). Sin embargo, como se puede apreciar en las tomas de datos ambos ensayos, esto no ocurre. Por tal motivo, se recurrió a usar, en los cálculos, la temperatura ambiente (T0) en reemplazo de la temperatura del punto 1 (T1).

†† En el caso de la temperatura en el punto 2', no se realizaron cambios. Esto se debe a que al calcular los valores de las eficiencias isoentrópicas correspondientes, se pudo comprobar que, si bien son bajos, no están fuera de lo normal para un compresor desgastado como el de la turbina utilizada (Moran & Shapiro, 2004). Por este motivo, se dejaron los valores tal cual se hallaron.

‡ Dado que la temperatura 3' es aquella que se mide a la salida de la cámara de combustión, es posible determinar que esta indicará aquella temperatura posterior a la de la llama, siendo, por teoría, necesariamente menor que la temperatura de la llama adiabática. Ya que la turbina funciona con el combustible DB5, y que la fórmula química del mismo es compleja dado que se trata de Diesel 2 y Biodiesel, se aplicará un modelo: se utilizará al dodecano, que como ya se mencionó es buen reemplazo del Diesel 2 (Moran & Shapiro, 2004) y se hallará la temperatura de llama adiabática, considerando que existe la relación aire-combustible hallada en los cálculos y que la combustión es completa (cosa que se sabe que no es así, dado que el analizador de gases halló partículas de CxHy, entre otros). La ecuación estequiométrica será:



Donde  $\dot{n}_{comb}$  y  $\dot{n}_a$  son los flujos molares de combustible y aire, respectivamente, y a, b, c y d son los flujos molares de cada uno de los componentes a los que acompañan.

Una vez resuelta la ecuación realizando un balance estequiométrico, se procede a hallar la temperatura de llama adiabática de este combustible bajo las condiciones antes descritas. Para ello, se tiene que la entalpía de combustión es:

$$\bar{H}_{comb} = \sum \bar{H}_P - \sum \bar{H}_R$$

Y para hallar la temperatura de llama adiabática, se cumple que  $\bar{h}_{comb} = 0$ . Entonces se tiene que:

$$\sum \bar{H}_P = \sum \bar{H}_R$$

$$\sum_P \dot{n}_s \cdot (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_s = \sum_R \dot{n}_e \cdot (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_e$$

Los cálculos realizados aquí se pueden apreciar en el Anexo IX. Ahora, es importante determinar lo siguiente: la temperatura de llama adiabática es la máxima temperatura

que alcanzará la combustión de este combustible, y por ende, no es posible, bajo ninguna circunstancia razonable, que la temperatura del punto 3' sea mayor a esta, debido principalmente a que:

- Se ha considerado combustión completa
- Existen pérdidas de calor en la cámara de combustión
- El dodecano tiene un PCI equivalente al del Diesel 2, y por ende mayor al del DB5
- La ubicación de la termocupla es posterior a la llama en sí, por lo que lo medido es necesariamente menor a la temperatura de la llama adiabática

A continuación, se muestra un resumen de los valores (en Kelvin) hallados con este análisis:

**Tabla. Comparación de T3'**

Parámetro	Cargas - Ensayo 1				Cargas - Ensayo 2			
	5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f	5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f
Temperatura de salida de la cámara de combustión (medida con termocúpla)	694	715	740	770	698	725	756	782
Temperatura de llama adiabática (hallada mediante cálculos)	640	652	686	707	637	653	689	710

(Fuente: Elaboración propia)

El resultado es bastante claro: la medición de la termocupla en el punto 3', para todos los casos, excede en por lo menos 54 K a la temperatura máxima posible, que es la adiabática. En conclusión, se debe cambiar la temperatura 3'.

Por otro lado, considerar que la temperatura de llama adiabática concuerda exactamente con la temperatura real en el punto 3' es incorrecto. Esto se debe a que, entre otras cosas, el combustible no combustiona por completo, así como a la existencia de pérdidas (por calor) y, principalmente, a que el combustible realmente usado (DB5) tiene un PCI menor al dodecano. Es por esto que se considerará una

eficiencia de combustión, de acuerdo a la fórmula de Harman (Harman, 1981), del 85%:

$$0,85 = \frac{(T_{3'} - T_{2'})_{real}}{(T_{3'} - T_{2'})_{ideal}}$$

$$0,85 \cdot (T_{3'} - T_{2'})_{ideal} + T_{2'_{real}} = T_{3'_{real}}$$

‡‡ La termocupla que medía la temperatura del punto 4', mostraba temperaturas que rondaban los 250 °C. Sin embargo, una vez que se contrastó con los valores hallados por la sonda del analizador de gases, se determinó que la temperatura de este punto ascendía a más de 400 °C. Por tal motivo, se dejó de lado la temperatura hallada con la termocupla para el punto 4' y se procedió a usar la hallada por el analizador de gases.

‡‡‡ El manómetro en U correspondiente a la presión 4', aquella medida a la salida de la turbina, medía una presión negativa (es decir presión menor a la atmosférica). Esto podría ser producto de alguna mala conexión de las mangueras que llevan la presión hasta el manómetro en U. Aun así, se procedió a utilizar dicha diferencia de alturas en mmH<sub>2</sub>O y utilizarla como si fuera positiva. Esto cambiaría, sin lugar a dudas, la presión del punto 4'. Sin embargo, dicho cambio es minúsculo dado que, al ser un manómetro con agua, se busca que sea capaz de medir pequeños cambios de presión y no grandes cambios, como lo haría uno con mercurio.

En las siguientes páginas se muestran las tablas con los cálculos realizados para comprobar las eficiencias isoentrópicas para T<sub>2'</sub> y para hallar la temperatura de la llama adiabática para T<sub>3'</sub>.

Cálculo de eficiencias isoentrópicas para T2'										
Parámetro	Abrev.	Unidad	Cargas - Ensayo 1				Cargas - Ensayo 2			
			5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f	5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f
Presión P1	P1	Pa	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
Presión P2	P2	Pa	246325	241325	241325	241325	246325	241325	241325	241325
Temperatura 0	T0	K	294,65	294,65	296,15	296,15	295,65	296,65	296,65	297,15
Temperatura 2' real	T2'	K	405,15	405,15	403,15	402,15	405,15	405,15	403,15	402,15
Temperatura 2 (adiabática, k=1,4)	T2	K	379,78	377,56	379,48	379,48	381,07	380,12	380,12	380,77
Eficiencia isoentrópica del compresor	n-iso	%	77,04%	75,03%	77,88%	78,62%	78,01%	76,94%	78,38%	79,63%

Cálculo de temperatura de llama adiabática para T3'										
Parámetro	Abrev.	Unidad	Cargas - Ensayo 1				Cargas - Ensayo 2			
			5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f	5 kg-f	7,5 kg-f	10 kg-f	12,5 kg-f
Datos										
Masa molar del C12H26 (dodecano)	Mcomb	kg/kmol	170,34	170,34	170,34	170,34	170,34	170,34	170,34	170,34
Entalpía de formación	hfcomb	kJ/kmol	-291010	-291010	-291010	-291010	-291010	-291010	-291010	-291010
Masa molar del aire (21% O2 y 79% N2)	Mcomb	kg/kmol	28,97	28,97	28,97	28,97	28,97	28,97	28,97	28,97
Determinación de flujos molares										
Flujo molar del combustible	ncomb	kmol/s	4,5654E-05	4,6801E-05	4,8543E-05	5,0436E-05	4,5312E-05	4,6790E-05	4,8747E-05	5,0651E-05
Flujo molar de aire	naire	kmol/s	2,0987E-02	2,0987E-02	2,0324E-02	2,0324E-02	2,0952E-02	2,0916E-02	2,0307E-02	2,0290E-02
Relación aire-combustible	Rac	-	78,18	76,27	71,21	68,53	78,64	76,03	70,85	68,13
Determinación de coeficientes de combustión										
x		kmol	4,5654E-05	4,6801E-05	4,8543E-05	5,0436E-05	4,5312E-05	4,6790E-05	4,8747E-05	5,0651E-05
y		kmol	4,4091E-03	4,4091E-03	4,2698E-03	4,2698E-03	4,4016E-03	4,3942E-03	4,2662E-03	4,2626E-03
a	CO2	kmol	5,4784E-04	5,6161E-04	5,8251E-04	6,0523E-04	5,4375E-04	5,6148E-04	5,8497E-04	6,0781E-04
b	H2O(g)	kmol	5,9350E-04	6,0842E-04	6,3105E-04	6,5566E-04	5,8906E-04	6,0827E-04	6,3372E-04	6,5846E-04
d	O2	kmol	3,5645E-03	3,5432E-03	3,3717E-03	3,3367E-03	3,5633E-03	3,5285E-03	3,3644E-03	3,3255E-03
c	N2	kmol	1,6578E-02	1,6578E-02	1,6054E-02	1,6054E-02	1,6550E-02	1,6522E-02	1,6041E-02	1,6027E-02
Determinación de la temperatura de la llama adiabática										
Temperatura 0 (Análisis 1 y 2)	T0	K	294,65	294,65	296,15	296,15	295,65	296,65	296,65	297,15
Temperatura 2 asumida	T2	K	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Entalpía de formación O2	hf O2	kJ/kmol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entalpía de formación N2	hf N2	kJ/kmol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entalpía de O2 en T0	h O2 (T0)	kJ/kmol	8580,47	8580,47	8624,66	8624,66	8609,93	8639,40	8639,40	8654,13
Entalpía de O2 en T2	h O2 (T2)	kJ/kmol	11711,00	11711,00	11711,00	11711,00	11711,00	11711,00	11711,00	11711,00
Variación de entalpía de formación O2	Δh O2	kJ/kmol	3130,53	3130,53	3086,34	3086,34	3101,07	3071,60	3071,60	3056,87
Entalpía de N2 en T0	h N2 (T0)	kJ/kmol	8570,68	8570,68	8615,52	8615,52	8600,58	8630,47	8630,47	8645,41



Entalpía de N2 en T2	h N2 (T2)	kJ/kmol	11640,00	11640,00	11640,00	11640,00	11640,00	11640,00	11640,00	11640,00
Variación de entalpía de formación N2	$\Delta h$ N2	kJ/kmol	3069,32	3069,32	3024,48	3024,48	3039,42	3009,53	3009,53	2994,59
Entalpía de reactantes	HR	kJ	51,40	51,07	47,61	47,06	50,77	49,60	47,19	46,29
Temperatura 3 calculada	T3	K	913,00	925,00	959,00	980,00	910,00	926,00	962,00	983,00
Temperatura 4 (Análisis 1 y 2)	T4	K	729,85	745,25	754,35	767,45	732,05	747,45	763,05	773,65
Entalpía de formación CO2	hf CO2	kJ/kmol	-393520,00	-393520,00	-393520,00	-393520,00	-393520,00	-393520,00	-393520,00	-393520,00
Entalpía de formación H2O(g)	hf H2O(g)	kJ/kmol	-241820,00	-241820,00	-241820,00	-241820,00	-241820,00	-241820,00	-241820,00	-241820,00
Entalpía de formación O2	hf O2	kJ/kmol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entalpía de formación N2	hf N2	kJ/kmol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entalpía de CO2 en T0	h CO2 (T0)	kJ/kmol	9236,06	9236,06	9291,61	9291,61	9273,09	9310,13	9310,13	9328,65
Entalpía de CO2 en T3	h CO2 (T3)	kJ/kmol	38121,71	38747,93	40522,22	41618,10	37965,15	38800,11	40678,77	41774,66
Variación de entalpía de formación CO2	$\Delta h$ CO2	kJ/kmol	28885,65	29511,87	31230,60	32326,49	28692,06	29489,98	31368,64	32446,01
Entalpía de H2O en T0	h H2O (T0)	kJ/kmol	9788,33	9788,33	9838,85	9838,85	9822,01	9855,69	9855,69	9872,52
Entalpía de H2O en T3	h H2O (T3)	kJ/kmol	32372,50	32844,28	34180,99	35006,60	32254,55	32883,59	34298,93	35124,55
Variación de entalpía de formación H2O(g)	$\Delta h$ H2O(g)	kJ/kmol	22584,17	23055,95	24342,14	25167,75	22432,54	23027,90	24443,24	25252,02
Entalpía de O2 en T0	h O2 (T0)	kJ/kmol	8580,47	8580,47	8624,66	8624,66	8609,93	8639,40	8639,40	8654,13
Entalpía de O2 en T3	h O2 (T3)	kJ/kmol	28385,82	28794,20	29951,29	30665,96	28283,72	28828,23	30053,38	30768,06
Variación de entalpía de formación O2	$\Delta h$ O2	kJ/kmol	19805,35	20213,73	21326,62	22041,30	19673,79	20188,84	21413,99	22113,93
Entalpía de N2 en T0	h N2 (T0)	kJ/kmol	8570,68	8570,68	8615,52	8615,52	8600,58	8630,47	8630,47	8645,41
Entalpía de N2 en T3	h N2 (T3)	kJ/kmol	27319,34	27700,43	28780,16	29447,06	27224,07	27732,18	28875,43	29542,33
Variación de entalpía de formación N2	$\Delta h$ N2	kJ/kmol	18748,66	19129,74	20164,64	20831,54	18623,49	19101,71	20244,97	20896,92
Entalpía de productos	HP	kJ	51,53	51,22	47,36	47,33	50,72	49,36	47,19	46,40
Temp de llama adiabática (T3)	Tlla	°C	639,85	651,85	685,85	706,85	636,85	652,85	688,85	709,85
Temp de llama adiabática (T3) con eficiencia de 85%	Tlla(85%)	°C	562,90	588,85	602,00	619,85	560,35	589,73	604,55	622,40