Universidad Simón Bolívar
Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia
Termodinámica II (TF-2123)
Profesor: Aurelio Stammitti
Preparador: Rafael Nucete

Problema Ciclo Dual – Fórmula 1 (Abril-Julio 2007)

Las especificaciones 2007 para el motor Fórmula 1 son las siguientes: motor de gasolina V8 de 4 tiempos, cilindrada 2,4 lt, calibre 98 mm y potencia máxima de 740 hp a 19000 rpm. Usted como diseñador de la escudería F1–USB fija las siguientes condiciones: Temperatura máxima 2000 K, relación de compresión 12 y capacidad del tanque de combustible 60 kg (para reducir el peso). Se sabe que se puede modelar el motor como un Ciclo Dual, en donde 4/5 del calor total suministrado al ciclo entran en el proceso a volumen constante. Usando las suposiciones de **Aire Estándar** y sabiendo que la admisión de aire se encuentra a 300 K y 100 kPa, calcule:

(1 hp = 746 W)

- Masa de la mezcla de aire dentro de cada cilindro
- Presión al final del proceso de adición de calor a volumen constante
- Relaciones r_c y r_p
- Presión media efectiva y eficiencia de segunda ley del ciclo.
- Potencia del motor. Compare si se ajusta a la especificación. ¿Cuál de las condiciones fijadas por usted cambiaría para mejorar el motor? Explique brevemente.
- Si se tiene una relación de aire–combustible de 20, calcule el flujo másico de combustible al motor (kg/s).
- Si la carrera dura 2 horas, cuántas paradas debe hacer en los Pits el vehículo para recargar combustible. ¿Será un ganador?
- Dibuje el Diagrama P–v

SOLUCIÓN

Diagramas:

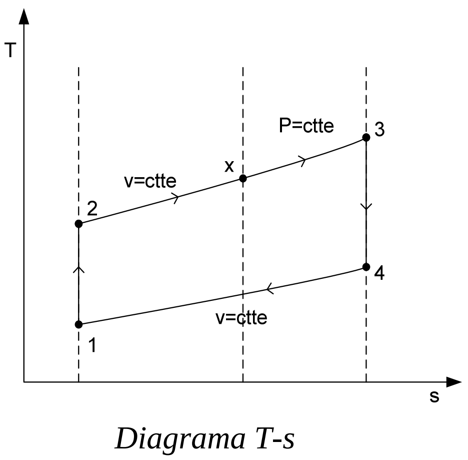

Diagrama T-s

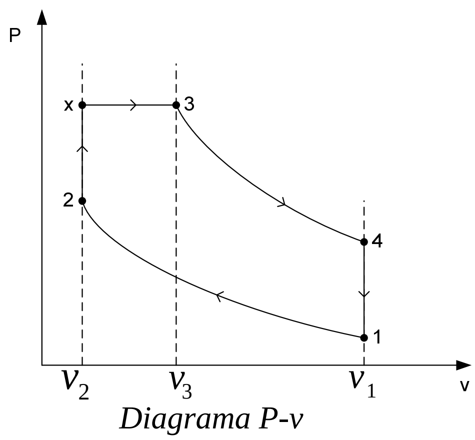

Diagrama P-v

Análisis volumétrico:

$$r=\frac{V_{\max}}{V_{\min}}=\frac{V_1}{V_2}=\frac{v_1}{v_2}; \qquad V_1=V_2+V_{desp}$$

Sustituyendo:

$$r=\frac{V_2+V_{desp}}{V_2} \quad \Rightarrow \quad V_2=\frac{V_{desp}}{r-1}$$

$$V_{desp,\,1\,cilindro}=\frac{V_{desp,\,total}}{N^{o}\,cil}$$

De aquí:

$$V_{desp,\,1\,cilindro}=0,3\,lt=3\times10^{-4}\ m^3$$
$$V_{2,\,1\,cilindro}=2,72727\times10^{-2}\ lt=2,72727\times10^{-5}\,m^3$$
$$V_{1,\,1\,cilindro}=0,32727\,lt=3,272727\times10^{-4}\,m^3$$

Ahora definiendo estados:

Estado 1

$T_1=300\,K$; $\quad P_1=100\,kPa$; $\quad R_{aire}=0,287\,kJ/kg\cdot K$

De tablas de gas ideal se lee:

$u_1=214,364\,kJ/kg$; $\quad h_1=300,473\,kJ/kg$; $\quad s_1^0=6,86926\,kJ/kg\cdot K$
$P_{r1}=1,11458$; $\quad v_{r1}=179,491$

Masa de aire dentro del cilindro:

$$m_{1,\,cil}=\frac{P_1\cdot V_{1,1\,cil}}{R_{aire}\cdot T_1}\Rightarrow m_{1,\,cil}=3,80107\times10^{-4}\ kg$$

Volumen especifico:

$$v_1=\frac{V_{1,\,1cil}}{m_{1cil}} \quad \Rightarrow \quad v_1=0,861\frac{m^3}{kg}$$

Estado 2:

Solo se conoce $V_2=2,72727\times10^{-5}\,m^3$; por otro lado:

$$v_2=\frac{V_2}{m} \quad \Rightarrow \quad v_2=7,17501\times10^{-2}\ \frac{m^3}{kg}$$

$Otra \;\; forma:$

$$r=\frac{v_1}{v_2} \quad \Rightarrow \quad v_2=\frac{v_1}{r}=7{,}17501\times10^{-2}\,\frac{m^3}{kg}$$

<u>Proceso 1-2 (Compresión Isentrópica)</u>

$$\frac{v_2}{v_1}=\frac{v_{r2}}{v_{r1}} \;\Rightarrow\; v_{r2}=v_{r1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \;\Rightarrow\; \boxed{v_{r2}=14{,}9576}$$

Con v_{r2} podemos leer en tablas

Aproximo el valor por simplicidad (Real: $T_2=779{,}42\;K$)

$T_2=780\;K$; $\quad u_2=576{,}4\;kJ/kg$; $\quad h_2=800{,}284\,kJ/kg$

$s_2^0=7{,}8574\;kJ/kg\cdot K$; $\quad P_{r2}=34{,}85061$; $\quad v_{r2}=14{,}9250$

De gas ideal: $P_2=\dfrac{R_{aire}\cdot T_2}{v_2} \quad \Rightarrow \quad P_2=3120\;kPa$

<u>Estado x:</u>

Solo se que $v_x=v_2=7{,}17501\times10^{-2}\;m^3/kg$

Calor suministrado $q_{entra}=q_{2-x}+q_{x-3}$

Como dato se tiene:

$q_{2-x}=\dfrac{4}{5}q_{entra}$; sustituyo $q_{entra}=q_{2-x}+q_{x-3}$

Tenemos entonces:

$$q_{2-x}=\frac{4}{5}\left(q_{2-x}+q_{x-3}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{q_{x-3}-\frac{1}{4}\cdot q_{2-x}=0} \qquad \text{(A)}$$

<u>Proceso 2-x (Isocórico):</u>

$$q_{2-x}=\left(u_x-u_2\right)$$

<u>Proceso x-3 (Isobárico):</u>

$$q_{x-3}=\left(h_3-h_x\right)$$

Se sustituye estas dos definiciones en (A):

$$\boxed{\left(h_3-h_x\right)-\frac{1}{4}\left(u_x-u_2\right)=0} \;\; \text{(B)}$$

Por considerarse el aire como gas ideal, la *u* y la *h* solo son función de la temperatura. Ahora se debe tantear el valor de T_x para satisfacer la ecuación (B), pero aun no se conoce el estado 3:

Estado 3:

$T_3 = 2000\ K$; $u_3 = 1677,518\,kJ/kg$; $h_3 = 2251,581\,kJ/kg$

$s_3^0 = 8,96611\ kJ/kg\cdot K$; $P_{r3} = 1658,635$; $v_{r3} = 0,80410$

Todavía no se conocen P_3 ni v_3.

Tanteo de Tx

T_x	u_x	h_x	(B)
1000	759,189	1046,221	1159,663
500	1205,253	1635,8	458,57
800	1486,331	2002,987	21,11
900	1581,591	2126,951	-126,67
850	1533,873	2064,882	-52,67
814,3	1499,928	2020,689	0,01

COMENTARIO:
Esta tolerancia es suficiente para realizar los cálculos siguientes.

Finalmente:

$T_x = 1814,3\,K$; $u_x = 1499,928\,kJ/kg$; $h_x = 2020,689\,kJ/kg$

$s_x^0 = 8,84486\ kJ/kg\cdot K$; $P_{rx} = 1088,756$; $v_{rx} = 1,11370$

De gas ideal:

$$P_x = \frac{R_{aire}\cdot T_x}{v_x} \Rightarrow \boxed{P_x = 7257,19\,kPa}$$

Entonces:

$$P_3 = P_x = 7257,19\ kPa$$

$$v_3 = \frac{R_{aire}\cdot T_3}{P_3} \Rightarrow \boxed{v_3 = 7,9094\times 10^{-2}\,\frac{m^3}{kg}}$$

NOTA:

Se puede verificar que $v_2 < v_3 < v_1$.

Relación de Corte:

$$r_c = \frac{v_3}{v_2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{r_c = 1,10235}$$

Relación de Presión:

$$r_p = \frac{P_3}{P_2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{r_p = 2,32602}$$

Volviendo al calor que entra:

$$q_{2-x} = \left(u_x - u_2\right) \quad \Rightarrow \quad q_{2-x} = 923,528 \;\; kJ/kg$$
$$q_{x-3} = \left(h_3 - h_x\right) \quad \Rightarrow \quad q_{x-3} = 230,892 \;\; kJ/kg$$
$$q_{entra} = q_{2-x} + q_{x-3} \Rightarrow \boxed{q_{entra} = 1154,42 \;\; kJ/kg}$$

Estado 4: Solo se conoce que $v_4 = v_1 = 0,861 \;\; m^3/kg$.

Proceso 3-4 (Expansión Isentrópica):

$$\frac{v_4}{v_3} = \frac{v_{r4}}{v_{r3}} \quad \Rightarrow \quad v_{r4} = v_{r3}\left(\frac{v_4}{v_3}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_{r4} = 8,75326}$$

De tablas:

$T_4 = 940,15\,K;$ $\quad u_4 = 708,494\,kJ/kg;$ $\quad h_4 = 978,346\,kJ/kg$

$s_4^0 = 8,06468 \; kJ/kg \cdot K;$ $\quad P_{r4} = 71,99836$

De gas ideal: $P_4 = \dfrac{R_{aire} \cdot T_4}{v_4} \quad \Rightarrow \quad P_4 = 313,38 \; kPa$

Proceso 4-1 (Calor Retirado):

$$q_{sale} = q_{4-1} = u_4 - u_1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{q_{sale} = 494,13\,kJ/kg}$$

Trabajo neto:

$$w_{neto} = q_{entra} - q_{sale} \quad \Rightarrow \quad \boxed{w_{neto} = 660,29\,kJ/kg}$$

NOTA:

Este es el trabajo neto por unidad de masa en 1 cilindro en cada ciclo termodinámico.

Eficiencia Térmica del Ciclo:

$$\eta_{T_{ciclo}} = \frac{w_{neto}}{q_{entra}} \Rightarrow \boxed{\eta_{T_{ciclo}} = 57,20\,\%}$$

Eficiencia de 2da Ley:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}; \quad T_L = 300\,K; \quad T_H = 2000\,K$$

$$\boxed{\eta_{carnot} = 85\%}$$

$$\eta_{II_{ciclo}} = \frac{\eta_{T_{ciclo}}}{\eta_{carnot}}; \quad \eta_{T_{ciclo}} = 57,20\,\%$$

$$\boxed{\eta_{II_{ciclo}} = 67,29\%}$$

NOTA:

Aquí se tomaron la temperatura máxima y mínima del ciclo como la T_H y T_L, ya que no se dispone de información sobre las condiciones de los reservorios.

Presión Media Efectiva:

$$PME = \frac{w_{neto}}{v_1 - v_2} \Rightarrow \boxed{PME = 836,6\ kPa}$$

Potencia del Motor:

$$\dot{W}_{motor} = w_{neto} \cdot m_{cil} \cdot N^o_{cil} \cdot N^o_{RPM} \cdot \frac{1 min}{60\,s} \cdot \frac{1 ciclo}{2\,rev}$$

COMENTARIO:
Esta relación esta dada para motores 4 tiempos

$$\boxed{\dot{W}_{motor} = 317,9091\,kW} \quad ó \quad \boxed{\dot{W}_{motor} = 426,32\,hp}$$

NOTA:

Es un motor de muy poca potencia para las especificaciones, puede correr pero nunca ganará.

¿Qué propondría para mejorar la competitividad del vehículo?

Flujo de combustible al motor

Se conoce AC =20;

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}; \quad m_{cil} = m_{aire} + m_{comb}$$

$$AC = \frac{m_{cil} - m_{comb}}{m_{comb}} \Rightarrow \boxed{m_{comb} = \frac{m_{cil}}{AC+1}}$$

De aquí: $\boxed{m_{comb} = 1{,}810033\times10^{-5}\,kg_{comb}}$

NOTA:

Masa de combustible consumida en un solo cilindro en cada ciclo termodinámico.

Ahora, el flujo de combustible al motor es:

$$\dot{m}_{comb_{motor}} = m_{comb}\cdot N^{o}_{cil}\cdot N^{o}_{RPM}\cdot\frac{1\,min}{60\,s}\cdot\frac{1\,ciclo}{2\,rev}$$

$$\dot{m}_{comb_{motor}} = 1{,}810033\times10^{-5}\,\frac{kg_{comb}}{\cancel{cil}\cdot\cancel{ciclo}}\cdot 8\,\cancel{cil}\cdot 19000\,\frac{\cancel{rev}}{\cancel{min}}\cdot\frac{1\,\cancel{min}}{60\,s}\cdot\frac{1\,\cancel{ciclo}}{2\,\cancel{rev}}$$

$$\boxed{\dot{m}_{comb_{motor}} = 2{,}2927\times10^{-2}\,\frac{kg_{comb}}{s}}$$

Masa total consumida:

Si la carrera dura 2 horas:

$$m_{total_{consumido}} = \dot{m}_{comb_{motor}}\cdot 2\,h\cdot\frac{3600\,s}{1\,h}$$

$$\boxed{m_{total_{consumido}} = 165\,kg_{comb}}$$

Si se coloca un tanque pequeño de 60 kg, el número de paradas en pits es:

$$N_{pits} = \frac{m_{total}}{m_{tanque}} \Rightarrow \boxed{N_{pits} = 2{,}75}$$

***Conclusión final*:** Esto implica 2 paradas en los pits ya que se requieren 2,75 tanques para completar la sistancia (recuerda que se inicia con el tanque lleno). Se debe rediseñar el vehiculo, aumentar la potencia y el tamaño del tanque para reducir el número de paradas en pits.