

FÓRMULAS DE TERMODINÁMICA, MOTORES TÉRMICOS Y MÁQUINAS FRIGORÍFICAS

por Aurelio Gallardo

2 - Diciembre - 2023



Fórmulas de Termodinámica, motores térmicos y máquinas frigoríficas. By Aurelio Gallardo Rodríguez, Is Licensed Under A Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.

1. Termodinámica

1.1. Generales

Primer principio de Termodinámica: $\Delta U = Q - W$

Calor que absorbe una sustancia líquida o sólida para aumentar su temperatura: $Q = m \cdot c_{esp} \cdot (T_{fin} - T_{ini}) = m \cdot c_{esp} \cdot \Delta T$

Del agua líquida: $c_{esp} = 1 \cdot \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$; Calor latente (necesario para cambiar de fase): $Q = m \cdot L$

Segundo principio de la Termodinámica

- ✓ Carnot: mientras es posible convertir todo el trabajo en calor $W \rightarrow Q$, **lo contrario es imposible** $Q \rightarrow W$. No se puede convertir todo el calor en trabajo.
- ✓ Clausius: espontáneamente (sin aportar trabajo), **es imposible que fluya calor de un cuerpo frío a uno caliente**.



FIGURA (1). Signos Calor-Trabajo en el sistema

1.2. Gases

Calor Presión constante (se usa **n**, número de moles): $Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$; Volumen constante: $Q_v = n \cdot C_v \cdot \Delta T$, siendo C_p la capacidad calorífica **molar** a presión constante y C_v a volumen constante.

Valor de la constante de los gases ideales: $R = 8,1344 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 1,9872 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \simeq 2 \cdot \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

Relación de Mayer: $C_p - C_v = R$; Coeficiente adiabático: $\gamma = C_p / C_v$

Para gases monoatómicos: $C_v = 3 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ y $C_p = 5 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$; para gases diatómicos: $C_v = 5 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ y $C_p = 7 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

Ecuación del gas ideal: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

1.2.1. Transformaciones en gases ideales

NOMBRE	CARACTERÍSTICA	SE CUMPLE...	$W = \int_1^2 p \cdot dV$	Q	$\Delta U = Q - W$
Isobárica	$p = \text{cte}$	1ª ley Gay-Lussac $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$W = p \cdot (V_2 - V_1)$	$Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T$	$\Delta U = n \cdot C_v \cdot \Delta T$
Isocórica	$V = \text{cte}$	2ª ley Gay-Lussac $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	$W = 0$	$Q = n \cdot C_v \cdot \Delta T$	$\Delta U = n \cdot C_v \cdot \Delta T$
Isotérmica	$T = \text{cte}$	ley Boyle-Mariotte $p_1 V_1 = p_2 V_2$	$W = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	$Q = W$	$\Delta U = 0$
Adiabática	$Q = 0$	ley Poisson $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$	$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - \gamma}$ $W = -\Delta U$	$Q = 0$	$\Delta U = n \cdot C_v \cdot \Delta T$

FIGURA (2). Transformaciones termodinámicas básicas

1.3. Máquina térmica y máquina frigorífica (bomba de calor)

Son las que conforman un ciclo termodinámico. Como la energía interna es una función de estado $\Delta U = 0 \cdot J$

Teniendo en cuenta el primer principio y el segundo, entonces $Q_1 + Q_2 = W$

Rendimiento y/o eficiencia: es siempre lo que se obtiene entre lo que se entrega. El rendimiento/eficiencia de una máquina real es siempre un porcentaje de la máquina ideal, que tiene el máximo rendimiento /eficiencia.

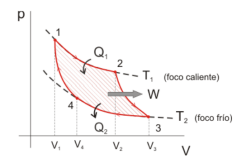
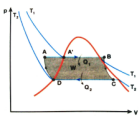
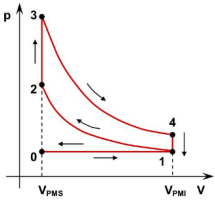
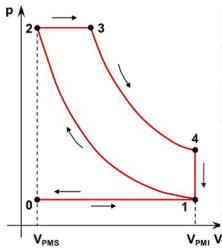


FIGURA (3). Ciclo Carnot

Tipo de máquina	Esquema	Temperatura / Calor	Rendimiento o eficiencia	Si es máquina ideal de Carnot
Motor Térmico		$T_1 > T_2$ $ Q_1 - Q_2 = W$ $Q_1 > 0, Q_2 < 0, W > 0$	$\eta = \frac{W}{ Q_1 } = 1 - \frac{ Q_2 }{ Q_1 }$ $\eta < 1$	Máquina reversible $\Delta S = 0 \Rightarrow \frac{ Q_1 }{T_1} = \frac{ Q_2 }{T_2}$ $\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
Máquina frigorífica		$T_1 > T_2$ $ Q_1 - Q_2 = W $ $Q_1 < 0, Q_2 > 0, W < 0$	$\epsilon_{FR} = \frac{ Q_2 }{ W } = \frac{ Q_2 }{ Q_1 - Q_2 }$	$\epsilon_{FRideal} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$
Bomba de calor		$T_1 > T_2$ $ Q_1 - Q_2 = W $ $Q_1 < 0, Q_2 > 0, W < 0$	$\epsilon_{BC} = \frac{ Q_1 }{ W } = \frac{ Q_1 }{ Q_1 - Q_2 }$ $\epsilon_{BC} = 1 + \epsilon_{FR}$	$\epsilon_{BCideal} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

2. Motores térmicos

Tipo de máquina	Ciclo	Fórmulas	Conceptos
Motor de vapor	Rankine 	$P = p \cdot L \cdot S \cdot f$ Potencia en el pistón	p, presión; L, carrera del pistón; S, superficie émbolo; f, frecuencia.
Motor gasolina	Otto 	$V_c = V_1 - V_2 = V_{PMI} - V_{PMS}$ $V_c = \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \cdot L$ $R = V_{PMI} / V_{PMS}$ $\eta = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}}$ (rendimiento) Cilindrada motor 4T: $4V_c$	V_c : volumen cilindro. V_{PMS} : volumen punto muerto superior o de la cámara de combustión. V_{PMI} : volumen punto muerto inferior. R: relación de compresión. L: carrera. ϕ : calibre.
Motor gasoil	Diesel 	Idem fórmulas cilindrada $R_o = V_3 / V_2$ $\eta = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}} \cdot \left(\frac{R_o^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot (R_o - 1)} \right)$	R_o : la relación entre el volumen de la mezcla al cesar la entrada de combustible y el volumen de la recámara

2.1. Sistema motor

Considero sólo motor:

Dado el poder calorífico de la gasolina (gasoil) en calorías o julios por unidad de masa o volumen, por ejemplo: $H_c = 7800 \cdot Kcal/l$ o $H_c = 9900 \cdot Kcal/Kg$

Me darán la masa o el volumen que se gasta en el motor. Por ejemplo, $\dot{m} = 3 \cdot Kg/h$ o $\dot{V} = 7 \cdot l/h$. Normalmente la velocidad a la que se consume (punto arriba).

Calculo la potencia absorbida como $P_a = \dot{Q}_1 = \dot{m} \cdot H_c$ o bien $P_a = \dot{Q}_1 = \dot{V} \cdot H_c$, o quizás necesite un cálculo de densidad $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$

El rendimiento del motor se puede calcular con las fórmulas anteriores para el motor Otto o Diesel, pero también con la relación $\eta_T = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_1}$

La potencia útil tiene una relación con el par motor: $P_{\text{útil}} = M \cdot \omega$, siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Usualmente se usa la fórmula $P_{\text{útil}} = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30}$. «n» en rpm, P en vatios y M en Nm.

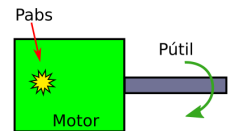


FIGURA (4). esquema sistema motor

2.2. Sistema motor - transmisión

$\eta_T = \frac{P_i}{P_{\text{abs}}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_1}$ ahora el rendimiento térmico es la relación entre la potencia intermedia y la absorbida.

El rendimiento total sí es $\eta_{TOT} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}}$. El rendimiento del sistema mecánico $\eta_{mec} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_i}$. Se cumple que $\eta_{TOT} = \eta_T \cdot \eta_{mec}$. La potencia útil es la entregada a las ruedas.

Se puede considerar que $P_i = P_{roz} + P_{\text{útil}}$, la potencia intermedia es la suma de una potencia de rozamiento y la potencia útil.

Si quiero calcular el momento o par motor en el eje debo despejar de la fórmula:

$P_i = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30}$; si quiero calcular el momento o par motor en las ruedas $P_{\text{útil}} = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30}$. También puedo usar la fórmula general $P = F \cdot v$ si es necesario.

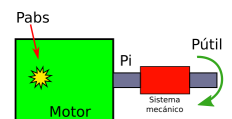


FIGURA (5). esquema sistema motor con transmisión