



METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA TERMODINÁMICA DE UNA TURBINA DE GAS, CICLO JOULE BRAYTON NORMAL

Alberto Alejandro Tapia Dávila

*Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco
atapia@ipn.mx*

Aurora Aparicio Castillo

*Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco
aaparicioc@ipn.mx*

Fredy Donís Sánchez

*Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco
fdonis@ipn.mx*

Resumen

Las turbinas de gas de combustión a presión constante son máquinas rotativas de alta velocidad y gran potencia por unidad de peso y de volumen, es decir son compactas en su construcción; las cuales se aplican entre otros campos a la generación de energía eléctrica a gran escala y de manera continua. Son de fácil arranque y gran seguridad de operación durante largos períodos, en los cuales requieren poco mantenimiento. Aunque su eficiencia termodinámica no es muy alta, tienen la ventaja de poder utilizar diversos combustibles de bajo costo, lo que las hace relativamente económicas. De ahí la importancia de su estudio y cálculo para los estudiantes de Ingeniería Mecánica. Sin embargo, el cálculo de sus principales parámetros se torna largo y complicado, más aún si se hacen variantes en sus datos de entrada, pues se tendría que volver a seguir todo el procedimiento de cálculo. En este artículo se presenta una metodología de cálculo directo para obtener sus principales parámetros. Asimismo, la utilización de un software accesible para realizar variantes y obtener nuevos resultados de una manera simplificada.

Palabras clave: Turbina de gas, máquinas rotativas, potencia, eficiencia termodinámica, software, metodología de cálculo.



La idea de la turbina de gas como máquina motriz, data por lo menos de hace dos siglos, sin embargo, su aplicación práctica es relativamente reciente, debido a que las dificultades que presentaba su realización, estaban fuera de la capacidad de la tecnología del siglo XIX y principios del presente. No fue sino hasta el siglo XX cuando se tuvo una comprensión clara de los principios termodinámicos de funcionamiento de esta máquina, que se pudo enfocar la investigación a resolver sus problemas principales, particularmente el del diseño de compresores rotativos de alta eficiencia, y la obtención de materiales resistentes a las altas temperaturas.

Debido a las ventajas que presenta respecto a otras máquinas térmicas, sus campos de aplicación se han ido ampliando continuamente. Entre los que se pueden mencionar:

- Marinos
- Aéreos
- Generación de energía eléctrica
- Como máquina motriz directa
- Aplicaciones en servicios de emergencia

Las turbinas de gas siguen al ciclo Joule-Brayton, el cual consta de los siguientes procesos:

- Admisión de aire
- Compresión isentrópica
- Combustión
- Expansión isentrópica
- Escape

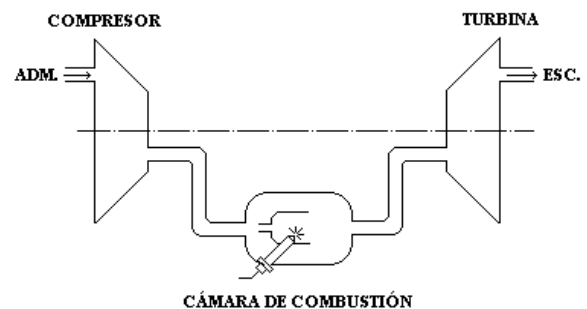


Figura 1. Esquema básico de una turbina de gas

Compresor: absorbe aire y lo comprime.

Cámara de combustión: se agrega combustible al aire presurizado y se enciende.

Turbina: convierte la energía de gas de alta velocidad en energía de rotación mediante la expansión.

Eje de salida y caja de engranajes: entrega energía de rotación al equipo impulsado.

Desarrollo del ciclo

La Tabla 1 muestra las fases de que consta el ciclo termodinámico de una turbina de gas.

Tabla 1. Desarrollo de un ciclo JB normal

FASE	EQUIPO	FENÓMENO	CONDICIONES TERMODINÁMICAS	OBSERVACIONES
0-1	CONDUCTO DE ADMISION	ADMISIÓN DE AIRE PURO	$P_a = Cte.$ $T_a = Cte.$	
1-2	COMPRESOR	COMPRESIÓN ISENTROPICA	$S = Cte.$	
2-3	CÁMARA DE COMBUSTION	COMBUSTIÓN	$P = Cte.$	SUMINISTRO DE CALOR " Q_s "
3-4	TURBINA	EXPANSIÓN ISENTROPICA	$S = Cte.$	
4-1	CONDUCTO DE ESCAPE	ESCAPE (1ª. PARTE)	$P_e = Cte.$	PÉRDIDA DE CALOR " Q_p "
1-0	CONDUCTO DE ESCAPE	ESCAPE (2ª. PARTE)	$P_e = Cte.$ $T_e = Cte.$	ALA ATMÓSFERA

Diagrama T-S.



Para establecer las ecuaciones de cálculo de los calores desarrollados durante el ciclo, de acuerdo a la metodología propuesta, se referirán al diagrama Temperatura -Entropía (Figuras 2)

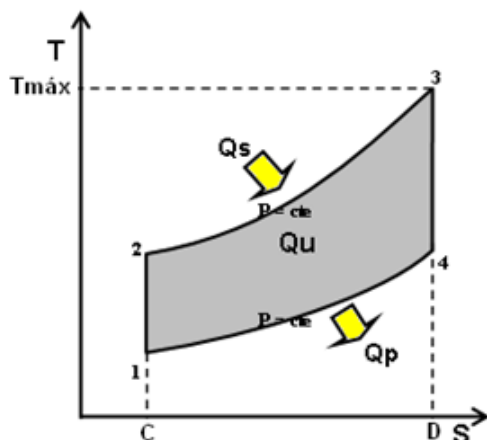


Figura 2. Diagrama Temperatura-Entropía

Ecuaciones de cálculo (método por temperaturas).

Para los calores y trabajo útil

Calor suministrado:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}C_p(T_3 - T_2) \quad (\text{kcal/s})$$

Calor perdido:

$$\dot{Q}_p = \dot{m}C_p(T_1 - T_4) \quad (\text{kcal/s})$$

Donde:

$\dot{m}$ = gasto másico de aire (kg/s)

C_p = Calor específico del aire a presión constante

Calor útil:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_s + \dot{Q}_p \quad (\text{kcal/s})$$

Trabajo útil:

$$W_u = J \dot{Q}_u \quad (\text{kg-m/s})$$

Donde:

J = Equivalente mecánico del calor = 427 kg-m/kcal

Para la potencia:

Potencia:

$$N_t = \frac{W_u}{75} \quad (\text{CV})$$

Eficiencia termodinámica:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_s} = \frac{\dot{Q}_s + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_s} = 1 + \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_s}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}}$$

Aplicación de la metodología de cálculo

Se tiene una turbina de gas que desarrolla un ciclo Joule-Brayton teórico normal, de las siguientes características (Tabla 2):

Tabla 2. Datos de entrada de la turbina a calcular

Datos de la turbina	Constantes
$\dot{m} = 5.2 \text{ kg/s}$	$R = 29.27 \text{ kg-m/kg-K}$
$P_a = 0.8 \text{ kg/cm}^2$	$C_p = 0.24 \text{ kcal/kg K}$
$T_a = 293 \text{ K}$	$C_v = 0.17 \text{ kcal/kg-K}$
$r_c = r_e = 4.5$	$k = 1.4$
$T_4 = 683 \text{ °K}$	$J = 427 \text{ kg-m/kcal}$

Calcular:

1. Los calores (Q_s , Q_p y Q_u) en kcal
2. El trabajo útil (W_u) en kg-m
3. La potencia teórica (N_t) en (CV y kW)
4. La eficiencia termodinámica del ciclo por las fórmulas de temperaturas, calores y relación de compresión (%).

Solución:

Metodología de cálculo: por temperaturas y calores.

Paso 1.- Cálculo de temperaturas:

$$T_1 = T_a = 293 \text{ K (dato)}$$



$$T_2 = T_1 \times r_c^{k-1} = 293 \times 4.5^{0.4} = 534.75 \text{ K}$$

$$T_4 = 683 \text{ K (dato)}$$

$$T_3 = T_4 \times T_2/T_1 = 683 \times 534.75/293 = 1246.53 \text{ K}$$

Paso 2.- Cálculo de calores:

Masa de aire introducida en cada segundo (m):
 $m = \dot{m} \times 1 \text{ s} = 5.2 \text{ kg/s} \times 1 \text{ s} = 5.2 \text{ kg}$

Calor suministrado (Qs):

$$Q_s = m C_p (T_3 - T_2)$$

$$= 5.2 (0.24) (1246.5385 - 534.7523)$$

$$= 888.3093 \text{ kcal}$$

Calor perdido (Qp):

$$Q_p = m C_p (T_1 - T_4)$$

$$= 5.2 (0.24) (293 - 683) = -486.72 \text{ kcal}$$

Calor útil (Qu)

$$Q_u = Q_s + Q_p$$

$$= 888.3093 - 486.72 = 401.59 \text{ kcal}$$

Paso 3.- Cálculo del trabajo útil y potencia:

$$W_u = J \times Q_u$$

$$= 427 \times 401.5893 = 171478.6215 \text{ kg-m}$$

$$N_t = W_u / 1 \text{ s} \times 75$$

$$= 2286.3816 \text{ CV} = 1681.163 \text{ kW}$$

Paso 4.- Cálculo de la eficiencia:

$$\eta_t = Q_u / Q_s$$

$$= 401.5893 / 888.3093 = 0.4521 (45.21\%)$$

Aplicación de una hoja de cálculo para la solución del problema (primer caso)

Paso 1.- Anotación de datos en una tabla Excel como puede observarse en la tabla 3.

Tabla 3. Datos en la hoja de cálculo

DATOS TURBINA CICLO JBN			
$T_1 = T_a =$	20°C =	293	K
$r_c =$	4.5		
$m =$	5.2		
$T_4 =$	410°C	683	K

Paso 2. Diseño de la hoja de cálculo (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de los parámetros calculados

Inserción de ecuaciones y cálculo			
$\eta_t =$	0.4521		
$T_2 =$	534.7523	K	
$T_3 =$	1246.5385	K	
$Q_s =$	888.3093	kcal	
$Q_u =$	401.5893	kcal	
$W_u =$	171478.6215	kg-m	
$N_t =$	2286.3816	CV	
$N_t =$	1681.163	kW	

Nota: Obsérvese que los resultados de la tabla 4 coinciden con los cálculos obtenidos anteriormente.

Aplicación de la hoja de cálculo diseñada para otras condiciones de entrada (Caso 2):

Si la temperatura ambiente cambiara, al igual que la temperatura de salida de la turbina, se tendrían los valores de la Tabla 4:

Tabla 5. Nuevos datos de cálculo

DATOS TURBINA CICLO JBN			
$T_1 = T_a =$	30°C =	303	K
$r_c =$	4.5		
$m =$	5.2		
$T_4 =$	470°C	743	K



Al cambiar los nuevos datos en la hoja de cálculo diseñada, se obtienen automáticamente los nuevos resultados (Tabla 5), de una manera sencilla y rápida.

Tabla 6. Resultados de los nuevos parámetros

Inserción de incógnitas y ecuaciones			
$\eta_t =$	0.4521		
$T_2 =$	553.0032	K	
$T_3 =$	1356.044	K	
$Q_s =$	1002.195	kcal	
$Q_u =$	453.0751	kcal	
$W_u =$	193463.1	kg-m	
$N_t =$	2579.508	CV	
$N_t =$	1896.697	kW	

Así se podrían hacer las combinaciones de datos de entrada de acuerdo a las necesidades de cálculo y comparar los resultados.

Gráficas de Potencia y eficiencia termodinámica vs T_2 .

Tabla 6. Variación de parámetros para las gráficas

$T_1 = 293 \text{ K}$		$T_3 = 1246.53 \text{ m} = 5.2 \text{ kg}$			
$T_2 \text{ (K)}$	$T_4 \text{ (K)}$	$W_u \text{ (kg.m)}$	η_t	$kmR/1-k$	$N_t \text{ (CV)}$
293	1246.54	0	0	-532.714	0
300	1217.45	11765.467	2.33	-532.714	156.87
350	1043.53	77780.345	16.29	-532.714	1037.07
400	913.089	120632.58	26.75	-532.714	1608.43
450	811.635	148043.05	34.89	-532.714	1973.91
500	730.472	164644.29	41.40	-532.714	2195.26
550	664.065	173384.26	46.73	-532.714	2311.79
600	608.726	176228.29	51.17	-532.714	2349.71
604.347401	604.347	176245.07	51.52	-532.714	2349.93
650	561.901	174536.98	54.92	-532.714	2327.16
700	521.765	169282.18	58.14	-532.714	2257.10
750	486.981	161176.59	60.93	-532.714	2149.02
800	456.545	150754.75	63.38	-532.714	2010.06
850	429.689	138425.38	65.53	-532.714	1845.67
900	405.818	124506.43	67.44	-532.714	1660.09
950	384.459	109248.87	69.16	-532.714	1456.65
1000	365.236	92853.499	70.70	-532.714	1238.05
1050	347.844	75482.857	72.10	-532.714	1006.44
1100	332.033	57269.937	73.36	-532.714	763.60
1200	304.363	18738.401	75.58	-532.714	249.85
1246.5385	293	0	76.49	-532.714	0

Al variar la relación de compresión, varía la temperatura 2. Por lo tanto, se podrían graficar los resultados para cada valor de T_2 .

Ecuaciones de cálculo introducidas en la hoja Excel:

$$T_4 = T_1 \times T_3 / T_2 \quad (K)$$

$$W_u = ((k m R) / (1-k)) (T_4 - T_3 + T_2 - T_1) \quad (kg-m)$$

$$\eta_t = 1 - (T_1 / T_2)$$

$$N_t = W_u / 75 \quad (CV)$$

Gráficas obtenidas (Fig. 3):

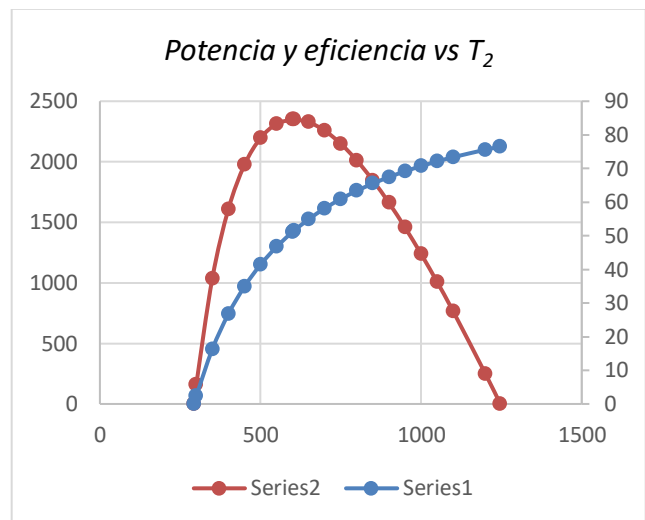


Figura 3. Gráficas de Potencia y Eficiencia de la Turbina del primer caso

Conclusiones

1. La aplicación de metodologías de cálculo directo y software de cálculo facilitan la solución de problemas complejos de ingeniería.



2. Se incrementa la versatilidad de cálculo para diferentes datos de entrada.
3. Mediante la relación gráfica de las variables obtenidas en la hoja de cálculo, se podrían determinar parámetros de diseño importantes, tales como: Máxima potencia, máxima eficiencia, mínimo consumo de combustible lo que facilitaría el diseño de la turbina.

Referencias

- Cengel Y. A. Boles M. *TERMODINÁMICA*. McGraw Hill Interamericana. México. 2015.
- Faires, V.M. Simmang, C. M. *Termodinámica*. 6ª. Edición. México, Ed. Hispano Americana. 1983.
- Giacosa, D. *Motores endotérmicos* (2000). España, Ed. Científico-Médica.
- Giacosa, D. *Motores endotérmicos* (2000). España, Ed. Científico-Médica.
- Severns, W.H. Degler, H.E. y Miles, J.C. (1994). *Energía mediante vapor aire o gas*. España, Reverté.
- Tapia, A. Morales, S. Huerta, E. (2010) *Máquinas Térmicas Motrices y Conducidas*. Ed. Agua Mecánica. México.
- Vivier L. (1968). *Turbinas de vapor y gas*. España. URMO.
- Siemens. (2009). *Turbinas de gas industriales*. Catálogo.
https://www.ingenieros.es/files/catalogos/Gas_Turbines_Broschuere.pdf