



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
"FRANCISCO DE MIRANDA"
ÁREA DE TECNOLOGÍA
COMPLEJO ACADÉMICO EL SABINO
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIDAD CURRICULAR: TERMODINÁMICA APLICADA**

TEMA IV. CICLOS DE POTENCIA DE GAS AIRE ABIERTOS

PROF. ING. JOSMERY SÁNCHEZ. MSc

CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

Análisis Energético

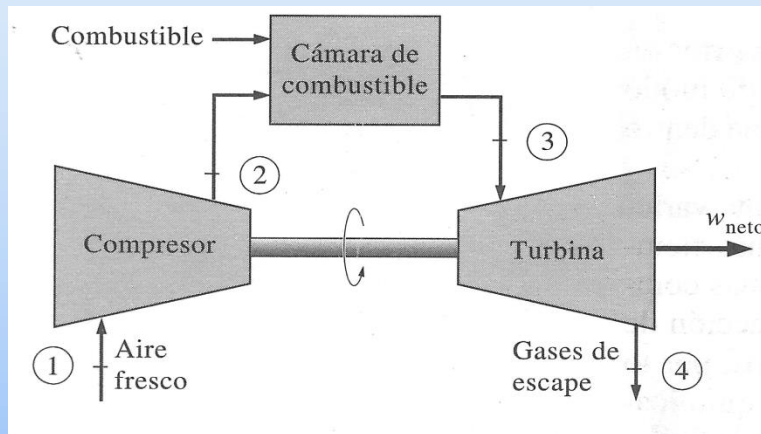
Trabajo Isotérmico, Isoentrópicos, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Principio del Ciclo Brayton



1-2 *Compresión Isoentrópica.*

2-3 *Suministro de calor a presión constante.*

3-4 *Expansión Isoentrópica.*

4-1 *Cesión de calor a volumen constante.*

Análisis Energético

$$q + w = \Delta h + \Delta e_C + \Delta e_P$$

$$w = \Delta h$$

$$q = \Delta h$$

CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

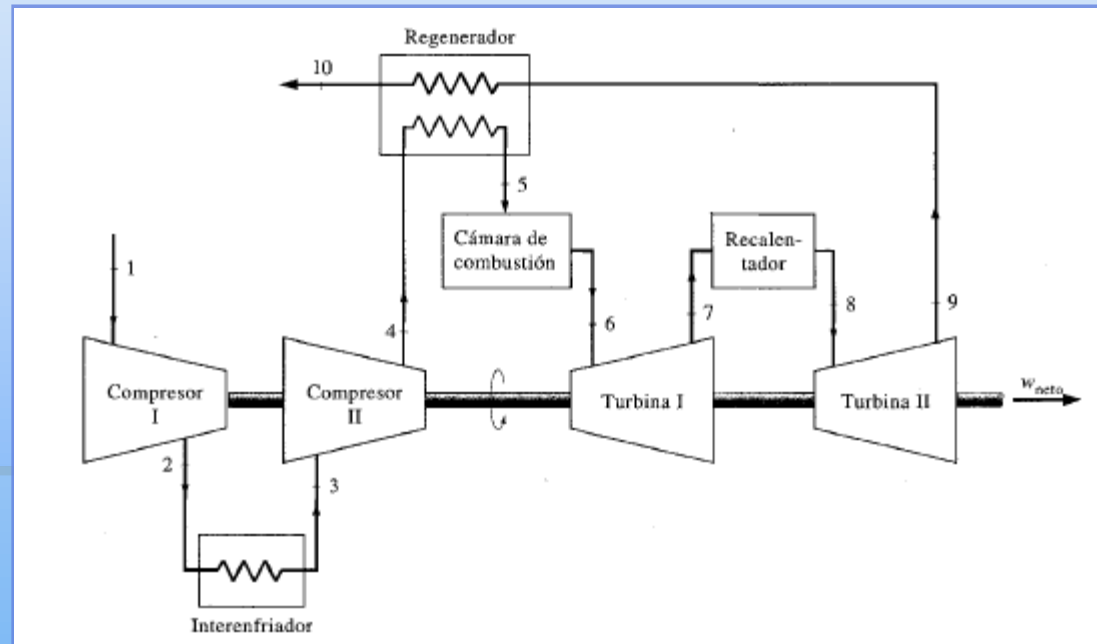
Análisis Energético

Trabajo Isotérmico, Isoentrópico, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones





CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

Análisis Energético

Trabajo Isotérmico, Isoentrópico, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Trabajo Isotérmico en Turbinas y Compresores.

Otro método de compresión consiste en ceder una cantidad de calor tal que el proceso sea lo más próximo a un isoterma. La expresión para el trabajo en régimen estacionario de un proceso sin fricción es:

$$w_{est} = \int v dP = \int \frac{RT}{P} dP = RT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Proceso isoterma})$$

Trabajo Isoentrópico en Turbinas y Compresores.

$$Pv^K = c \quad \Rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$



CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

Análisis Energético

Trabajo Isotérmico, Isoentrópico, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Trabajo en régimen estacionario a volumen constante:

$$W_{est,rev} = \int_1^2 v dP = \int_1^2 c^{1/K} P^{-(1/k)} dP \Rightarrow = \frac{k c^{1/k} \left(P_2^{(k-1)/k} - P_1^{(k-1)/k} \right)}{k-1}$$

La constante $c = P_1 v_1^k = P_2 v_2^k$. Por tanto:

$$W_{est,rev} = \frac{k \left[P_2^{1/k} v_2 \left(P_2^{(k-1)/k} \right) - P_1^{1/k} v_1 \left(P_1^{(k-1)/k} \right) \right]}{k-1} = \frac{k (P_2 v_2 - P_1 v_1)}{k-1}$$

En el caso de un gas ideal la relación $Pv = RT$ establece:

$$W_{est,rev} = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k-1} = \frac{kRT_1}{k-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$



CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

Análisis Energético

Trabajo Isotérmico, Isoentrópico, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$W_{est,rev} = \frac{k RT_1}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

Proceso isoentrópico

Trabajo Politrópico

Para el análisis de la compresión politrópica se tiene que $Pv^n = c$

La relación para un proceso politrópico análogo al proceso isoentrópico está dado por:

$$T_2 / T_1 = \left(P_2 / P_1 \right)^{(n-1)/n} \quad 1 < n < 1,4$$

$$W_{est} = \frac{nRT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{n-1}$$

(Proceso Politrópico)



CICLO BRAYTON DE TURBINA A GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Principio

Análisis Energético

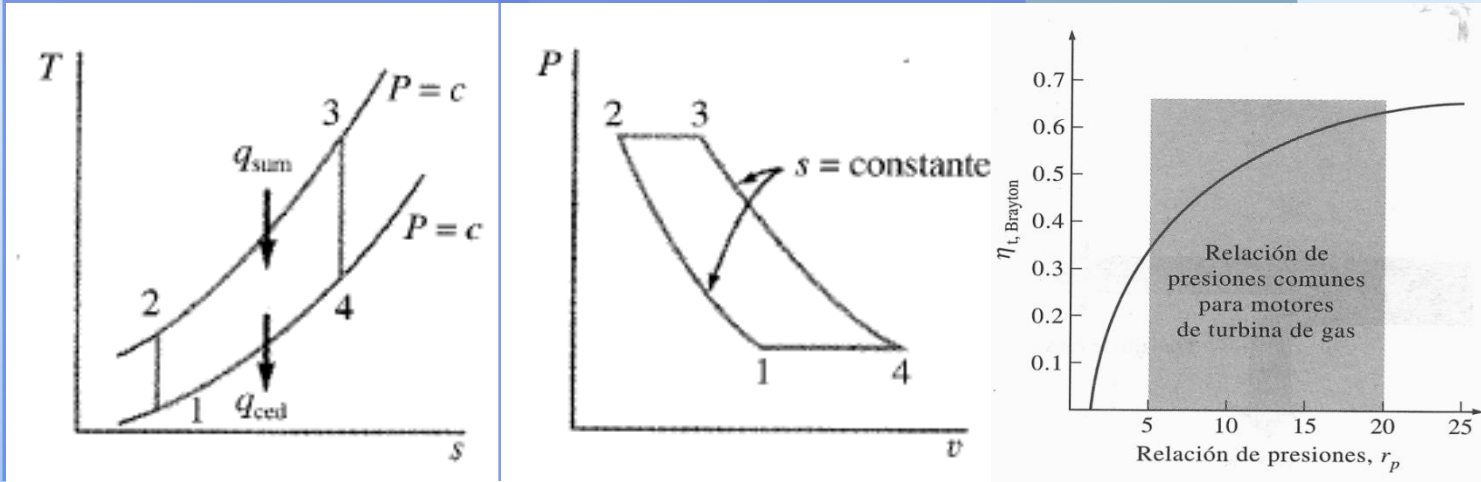
Trabajo Isotérmico, Isoentrópico, Politrópico en Turbinas y Compresores

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Diagrama T-s y P-v



Rendimiento Térmico

$$\eta_{t, \text{Brayton}} = 1 - \frac{q_{ced}}{q_{sum}} = 1 - \frac{h_{4s} - h_1}{h_3 - h_{2s}} = 1 - \frac{C_P (T_4 - T_1)}{C_P (T_3 - T_2)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(K-1)/K} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(K-1)/K} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\eta_{t, \text{Brayton}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{1}{r^{(k-1)/k}}$$

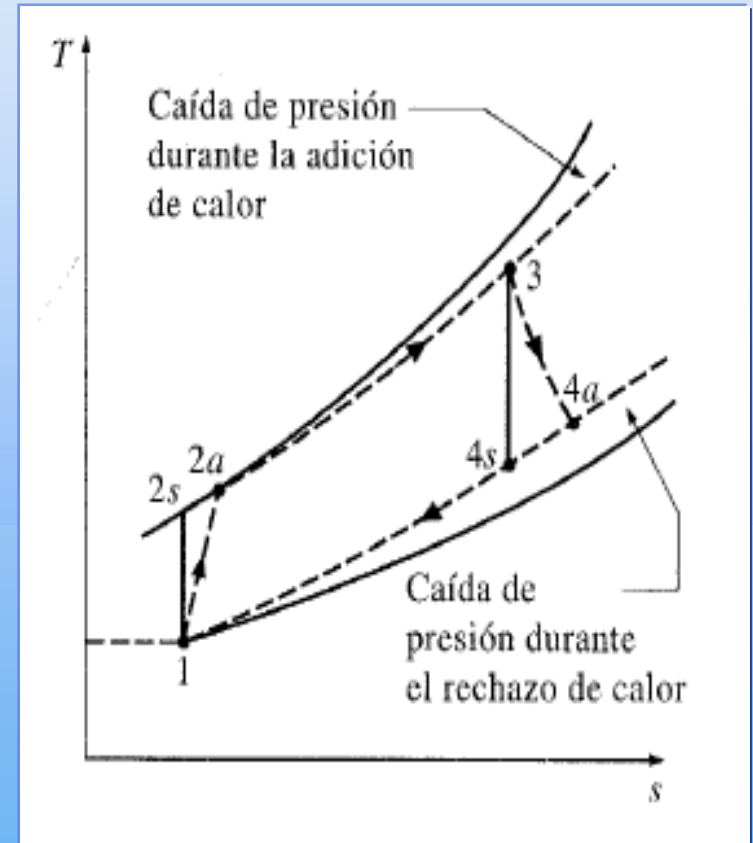
IRREVERSIBILIDADES DEL CICLO BRAYTON

$$\eta_C \equiv \frac{w_S}{w} = \frac{W_S^*}{W^*}$$

$$\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$\eta_T = \frac{w}{w_S} = \frac{W}{W_S^*}$$

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$



Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton de Turbina a Gas

Irreversibilidades

Conclusiones

CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton con Regeneración

Principio

Eficacia

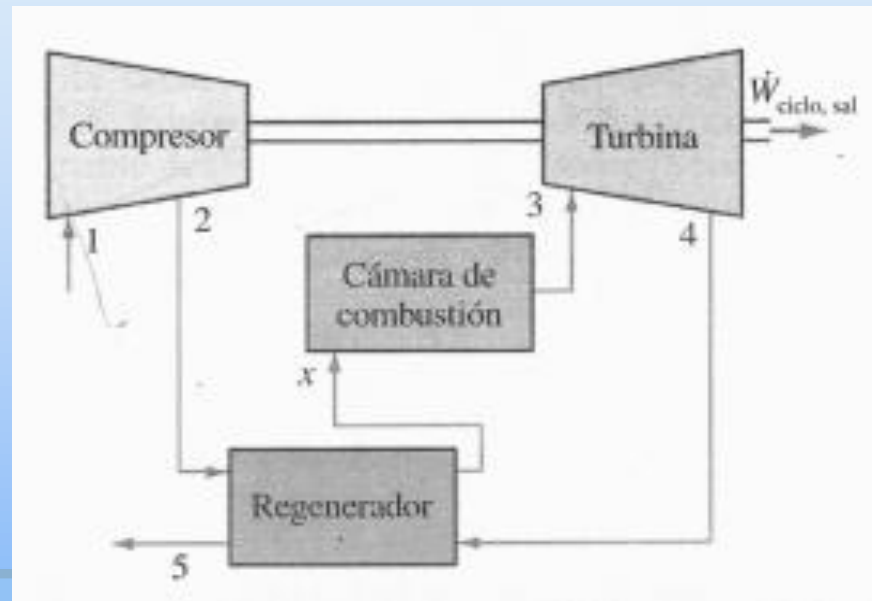
Análisis Energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Principio de la Regeneración en los Ciclos Brayton



Eficacia de los Regeneradores

$$\dot{Q}_{2X} = \dot{Q}_{45}$$

$$\epsilon_{regen} \equiv \frac{q_{regen,real}}{q_{regen,max}} = \frac{h_X - h_2}{h_4 - h_2}$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton con Regeneración

Principio

Eficacia

Análisis Energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Análisis energético

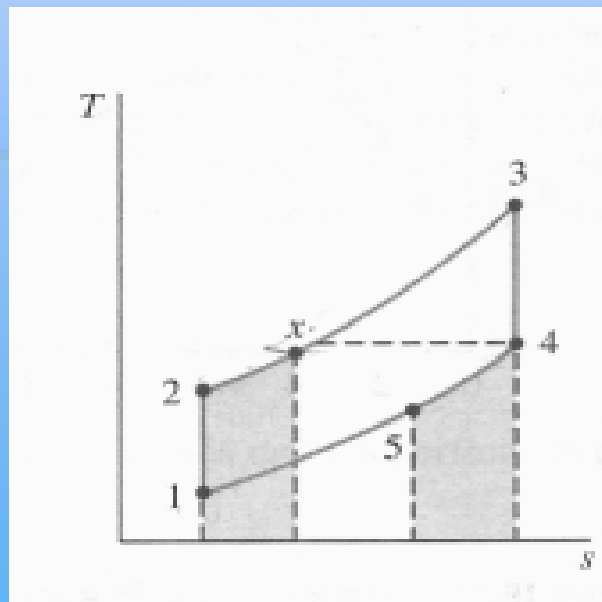
El calor suministrado al ciclo

$$q_{sum} = h_3 - h_x$$

El calor cedido del ciclo

$$q_{ced} = h_5 - h_1$$

Diagrama T-s



Rendimiento Térmico

$$\eta_{treg en} = 1 - \frac{h_5 - h_1}{h_3 - h_x}$$

$$\eta_{t,regen,frio} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_P^{(K-1)/K}$$

$$\epsilon_{regen,frio} = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$

CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton con Interenfriamiento Recalentamiento y Regeneración

Principios

Análisis Energético

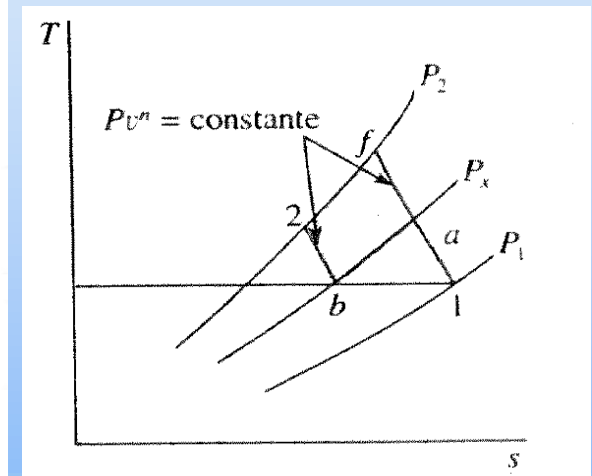
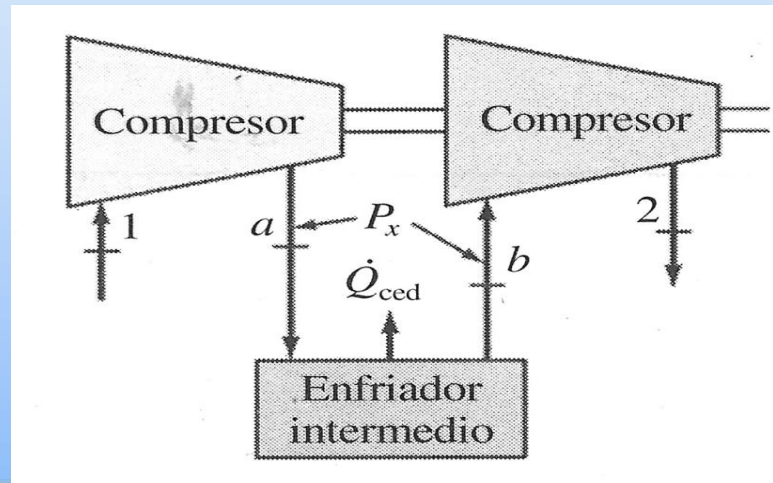
Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

Principio del Interenfriamiento en Compresores en Etapas Múltiples

Este planteamiento es especialmente efectivo cuando se pretende obtener grandes variaciones de presión.



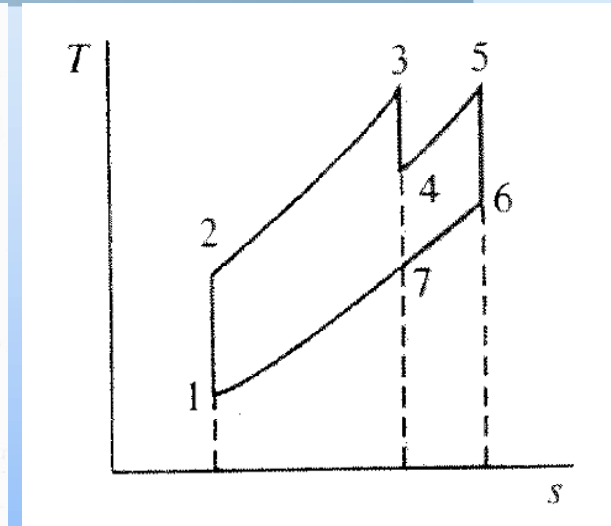
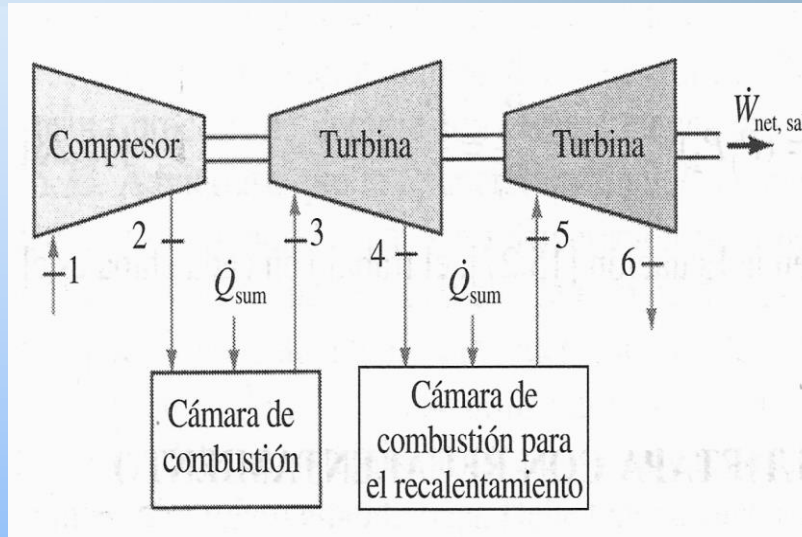
$$w = \frac{nRT_1 \left[\left(\frac{P_X}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]}{n-1} + \frac{nRT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_X} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]}{n-1}$$

Para hallar el trabajo total mínimo de compresión, se deriva la ecuación anterior de w con respecto a la variable P_X , y la ecuación resultante se iguala a cero.

$$\frac{P_X}{P_1} = \frac{P_2}{P_X} \quad \text{o} \quad P_X = (P_1 P_2)^{1/2} \quad w_{1-X} = w_{X-2}$$

CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN

Principio del Recalentamiento en Turbinas de Etapas Múltiples



$$w_{T,sal} = -\Delta h \approx C_p \Delta T$$

Bajo las condiciones de recalentamiento ideal ($T_3 = T_5$)

$$w = \frac{kRT_3 \left[\left(P_4 / P_3 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]}{k-1} + \frac{kRT_3 \left[\left(P_6 / P_5 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]}{k-1}$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton con Interenfriamiento Recalentamiento y Regeneración

Principios

Análisis Energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Ciclo Brayton con Interenfriamiento Recalentamiento y Regeneración

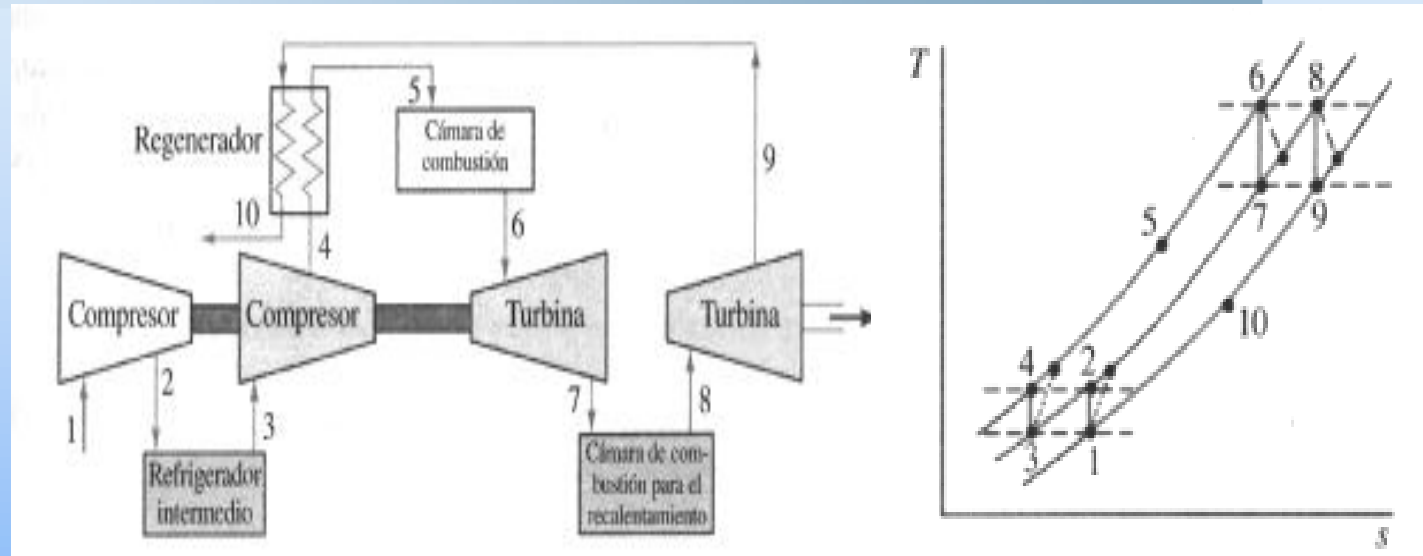
Principios

Análisis Energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones



Rendimiento Térmico

$$\eta_t = \frac{W_{net, sal}}{q_{sum}} = \frac{W_{turbina} - W_{compresor}}{q_{sumt}}$$



CICLOS DE POTENCIA DE GAS

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

Conclusiones

- *Se considera que el fluido de trabajo es aire y que los calores específicos son constantes para obtener una aproximación más adecuada de los procesos.*
- *Se afirma que el ciclo Brayton difieren de los ciclos Otto y Diesel en que los procesos que componen el ciclo ocurren en sistemas abiertos o volúmenes de control. Por lo tanto, en un sistema abierto, el análisis de flujo estable es usado para determinar la transferencia de calor y trabajo para el ciclo.*
- *Son diversas las aplicaciones de los ciclos de aire desde instalaciones combinadas de calderas con hornos a presión, como la propulsión de navíos, automóviles y aeronáutica.*

Referencias bibliográficas

- •Avellone. Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw-Hill.
- •Irving Granet. Termodinámica. PHH. Prentice May. Tercera Edición.
- •Levenspiel, O (2001). Fundamentos de Termodinámica. Pearson Educación.
- •Potter, M; Somerton, C (2004). Termodinámica para Ingenieros. Editorial McGraw-Hill.
- •Van Wylen G, Sonntag R. (1999). Fundamentos de Termodinámica. México: Limusa.
- •Wark K; Richards D (2001). Termodinámica. España: Mc Graw Hill.
- •Yunus C; Boles, M (2006). Termodinámica. México: Mc Graw Hill.