

EL CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO, CALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN

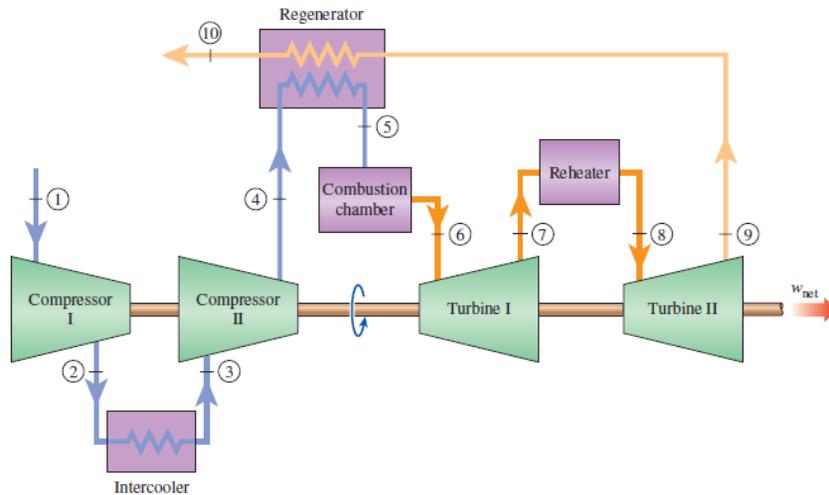
El trabajo neto de un ciclo de turbina de gas es la diferencia entre la salida de trabajo de la turbina y la entrada de trabajo del compresor, y puede aumentarse disminuyendo el trabajo del compresor o aumentando el trabajo de la turbina, o ambos.

Se mostró anteriormente que el trabajo requerido para comprimir un gas entre dos presiones especificadas puede reducirse llevando a cabo el proceso de compresión en etapas y enfriando el gas en el medio (Figura 1), es decir, usando compresión de múltiples etapas con enfriamiento intermedio. A medida que aumenta el número de etapas, el proceso de compresión se vuelve casi isotérmico a la temperatura de entrada del compresor y el trabajo de compresión disminuye.

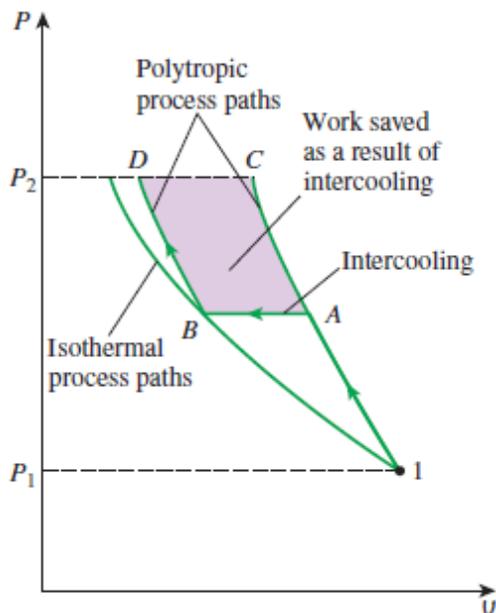
Asimismo, la producción de trabajo de una turbina que opera entre dos niveles de presión puede aumentarse expandiendo el gas en etapas y recalentando entre ellas, es decir, utilizando la expansión de múltiples etapas con recalentamiento. Esto se logra sin elevar la temperatura máxima en el ciclo. A medida que aumenta el número de etapas, el proceso de expansión se vuelve casi isotérmico.

El argumento anterior se basa en un principio simple: el trabajo de compresión o expansión de flujo constante es proporcional al volumen específico del fluido. Por lo tanto, el volumen específico del fluido de trabajo debe ser lo más bajo posible durante un proceso de compresión y lo más alto posible durante un proceso de expansión. Esto es precisamente lo que logran el enfriamiento intermedio y el recalentamiento. La combustión en turbinas de gas ocurre típicamente a cuatro veces la cantidad de aire necesaria para una

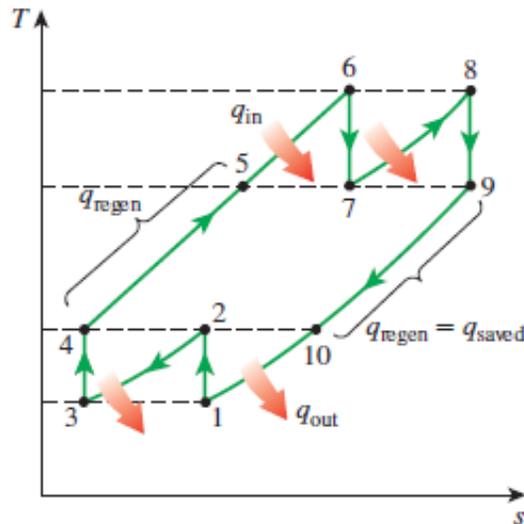
combustión completa para evitar temperaturas excesivas. Por lo tanto, los gases de escape son ricos en oxígeno y el recalentamiento se puede lograr simplemente rociando combustible adicional en los gases de escape entre dos estados de expansión.



- a) Un motor de turbina de gas con compresión de dos etapas con enfriamiento intermedio, expansión de dos etapas con recalentamiento y regeneración.



- b) Comparación de las entradas de trabajo a un compresor de una etapa (1AC) y un compresor de dos etapas con interenfriamiento (1ABD).



- c) Diagrama T-s de un ciclo de turbina de gas ideal con enfriamiento intermedio, recalentamiento y regeneración.

El fluido de trabajo sale del compresor a una temperatura más baja y de la turbina a una temperatura más alta, cuando se utilizan el enfriamiento intermedio y el recalentamiento. Esto hace que la regeneración sea más atractiva ya que existe un mayor potencial de regeneración. Además, los gases que salen del compresor se pueden calentar a una temperatura más alta antes de que entren en la cámara de combustión debido a la temperatura más alta del escape de la turbina.

En las figuras anteriores se muestra un esquema de la disposición física y el diagrama T-s de un ciclo ideal de turbina de gas de dos etapas con enfriamiento intermedio, recalentamiento y regeneración (Ver Figura 1).

El gas entra en la primera etapa del compresor en el estado 1, se comprime isentrópicamente hasta una presión intermedia P_2 , se enfría a presión constante hasta el estado 3 ($T_3 = T_1$) y en la segunda etapa se comprime isentrópicamente hasta la presión final P_4 . En el estado 4, el gas entra en el regenerador, donde se calienta a T_5 a presión constante.

En un regenerador ideal, el gas sale del regenerador a la temperatura del escape de la turbina, es decir, $T_5 = T_9$. El proceso primario de adición de calor (o combustión) tiene lugar entre los estados 5 y 6. El gas entra en la primera etapa de la turbina en el estado 6 y se expande isentrópicamente al estado 7, donde ingresa al recalentador. Se recalienta a presión constante hasta el estado 8 ($T_8 = T_6$), donde ingresa a la segunda etapa de la turbina. El gas sale de la turbina en el estado 9 y entra en el regenerador, donde se enfría al estado 10 a presión constante. El ciclo se completa enfriando el gas al estado inicial (o purgando los gases de escape).

Se demostró anteriormente que la entrada de trabajo a un compresor de dos etapas se minimiza cuando se mantienen relaciones de presión iguales en cada etapa. Se puede demostrar que este procedimiento también maximiza la producción de trabajo de la turbina. Por lo tanto, para un mejor rendimiento tenemos:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \text{ y } \frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9}$$

En el análisis de los ciclos reales de la turbina de gas, se deben tener en cuenta las irreversibilidades que están presentes dentro del compresor, la turbina y el regenerador, así como las caídas de presión en los intercambiadores de calor.

La relación de trabajo posterior de un ciclo de turbina de gas mejora como resultado del enfriamiento intermedio y el recalentamiento. Sin embargo, esto no significa que la eficiencia térmica también mejore. El hecho es que el enfriamiento intermedio y el recalentamiento siempre disminuyen la eficiencia térmica a menos que vayan acompañados de regeneración.

Esto se debe a que el enfriamiento intermedio disminuye la temperatura promedio a la que se agrega calor y el recalentamiento aumenta la temperatura promedio a la que se rechaza el calor. Esto también es evidente en la Figura 3c. Por lo tanto, en las centrales eléctricas de turbinas de gas, el enfriamiento intermedio y el recalentamiento se utilizan siempre junto con la regeneración. Si se aumenta el número de etapas de compresión y expansión, el ciclo de turbina de gas ideal con enfriamiento intermedio, recalentamiento y regeneración se aproxima al ciclo de Ericsson, y la eficiencia térmica se acerca al límite teórico (la eficiencia de Carnot). Sin embargo, la contribución de cada etapa adicional a la eficiencia térmica es cada vez menor, y el uso de más de dos o tres etapas no puede justificarse económicamente.

Referencias:

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica* (M. Á. T. Castellanos (ed.); Sexta). McGraw-Hill.
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). (2020). *Informe de la tecnología de generación de referencia* (pp. 1-29). [https://www.cenace.gob.mx/Docs/02_MBP/InformeTGR/2020/Informe_TGR_en_2020_Preliminar_\(v2020-11-23\).pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/02_MBP/InformeTGR/2020/Informe_TGR_en_2020_Preliminar_(v2020-11-23).pdf)
- Secretaría de Energía. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional* (p. 330). Secretaría de Energía.
- Energía, S. de. (2020). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021 - 2035* (p. 224). Secretaría de Energía.