

3. Ciclos de vapor y gas

1. INTRODUCCIÓN
2. CICLO DE RANKINE
3. CICLO DE BRAYTON

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Motor Rotativo:

- Generan movimiento de giro de un eje
- Aplicación: industria aeroespacial, plantas de generación de potencia



Turbinas de Vapor

- Combustión externa
- Agente Transf.: agua

Turbinas de gas

- Combustión interna
- A.T.: gases de combustión



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO RANKINE

ZONA B: Foco caliente.

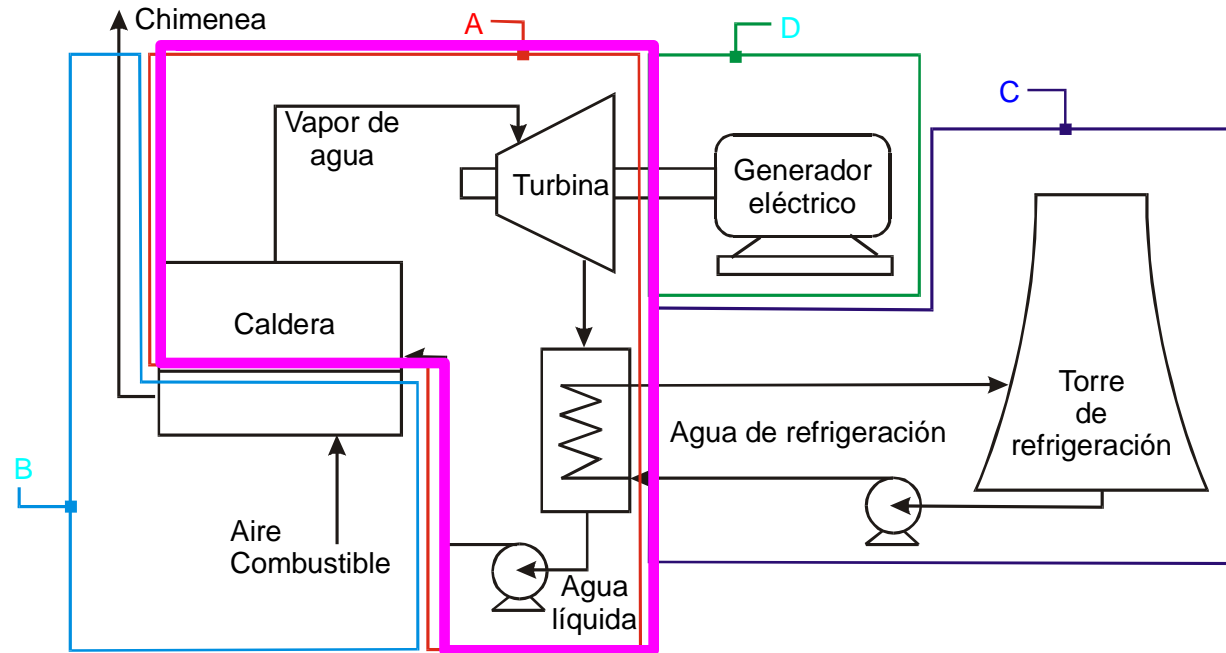
Generación de calor.

ZONA A: Ciclo termodinámico del agente de transformación (AT).

Transformación de la entalpía del vapor en energía cinética en el eje de la turbina (W).

ZONA C: Foco frío. Condensación del vapor saliente de la turbina.

ZONA D: Obtención de energía eléctrica. Transformación del



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO RANKINE IDEAL

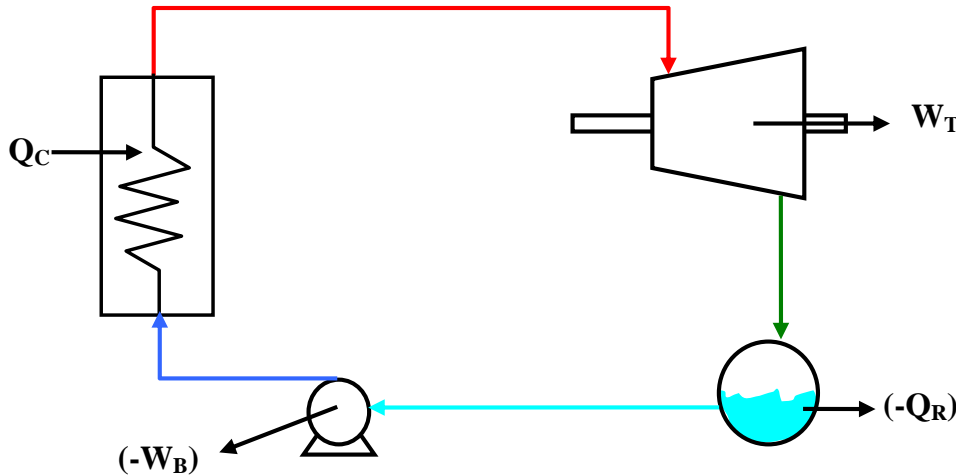
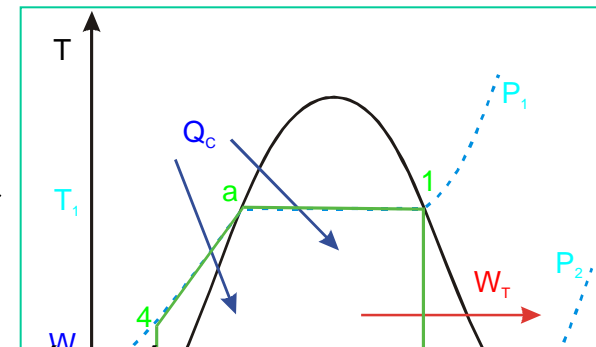
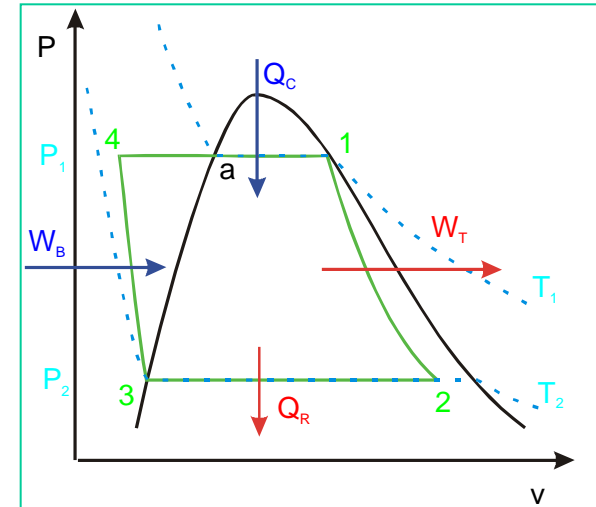


Diagrama de bloques ciclo Rankine

Suposiciones:

- Todos los procesos son reversibles
- Sin pérdidas de presión en la circulación del AT



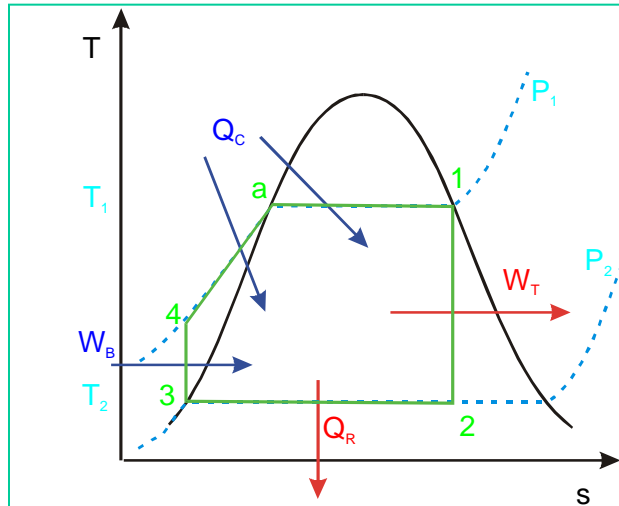
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 1→2: expansión del vapor en la turbina

Entrada a la turbina: vapor saturado seco

Salida de la turbina: vapor húmedo

Proceso: expansión isoentrópica con generación de trabajo W_T

Principio de conservación de energía:

$$0 = Q - W + \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right) \quad (\text{J/kg})$$

Cartagena99

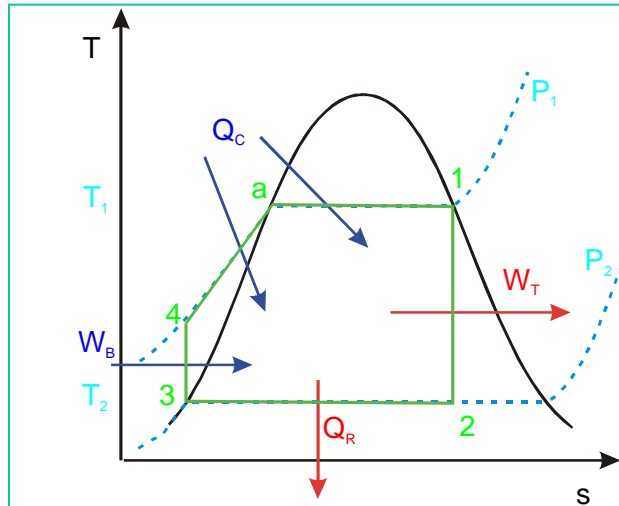
$$W_T = (h_1 - h_2) \quad [6.31]$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 2→3: condensador del vapor húmedo en el condensador

Entrada al condensador: vapor húmedo

Salida del condensador: líquido saturado

Proceso: extracción de calor Q_R a presión constante

Principio de conservación de energía:

$$0 = Q - W + \left(h_2 - h_3 + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_3) \right) \quad (\text{J/kg})$$

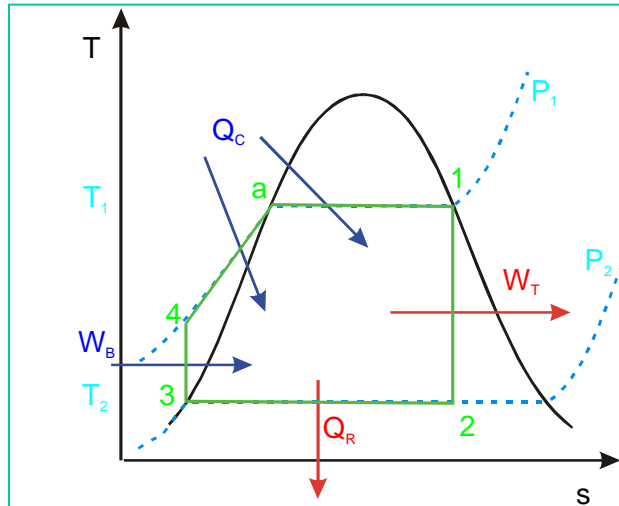
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



• Etapa 3→4: compresión del condensado en la bomba

Entrada a la bomba: líquido saturado

Salida de la bomba: líquido subenfriado a la presión de la caldera

Proceso: compresión isentrópica con generación de trabajo por la bomba W_B

Principio de conservación de energía:

$$(-W_B) = (h_4 - h_3) \quad [6.5]$$

Considerando la compresión del líquido:

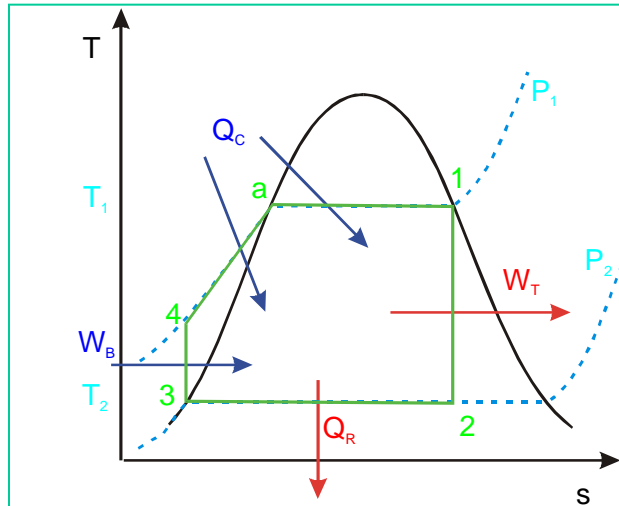
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 4→1: calentamiento en la caldera

Entrada a la caldera: líquido subenfriado

Salida del condensador: vapor saturado seco

Proceso: aporte de calor Q_C a presión constante

Principio de conservación de energía:

$$(Q_C) = (h_1 - h_4) \quad [6.7]$$

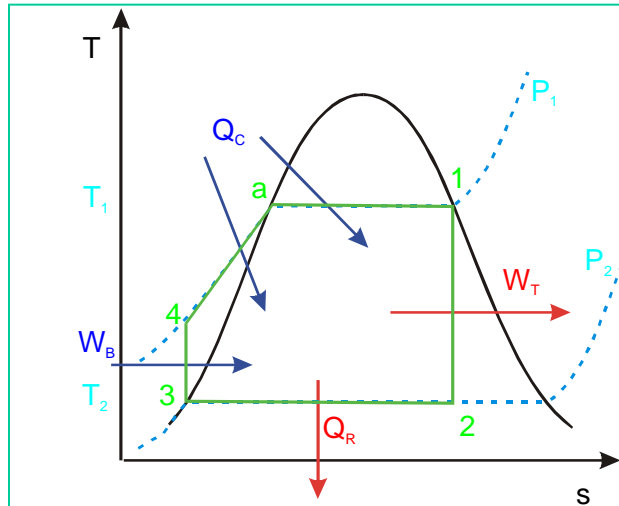
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad [6.8]$$

Trabajo neto realizado en un ciclo

$$\Delta E = Q - W = 0 \longrightarrow W_T - (-W_B) = Q_C - (-Q_R)$$

$$\eta_{RANKINE} = \frac{Q_C - (-Q_R)}{Q_C} = 1 - \frac{(-Q_R)}{Q_C} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad [6.9]$$

Relación de trabajos

Aplicando 2º Principio de la Termodinámica

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO RANKINE con NO IDEALIDADES

Irreversibilidades y Pérdidas:

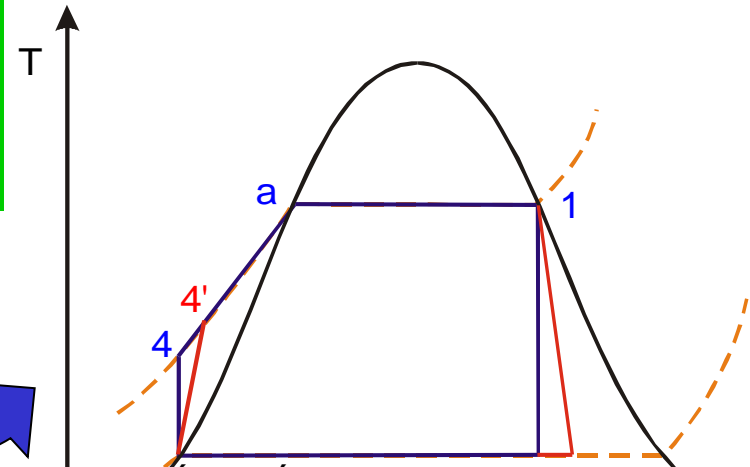
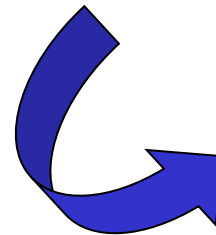
Desviaciones del ciclo de Rankine ideal:

- Pérdidas de energía en el condensador y la caldera por cesión de calor al exterior
- Pérdidas de energía por rozamiento del fluido en el condensador, caldera y tuberías

- Irreversibilidades en la turbina y en la bomba
 - o Procesos no adiabáticos
 - o Pérdidas de energía por rozamiento

$$\eta_{TV} = \frac{W_T}{(W_T)_S} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2}$$

[6.12]



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

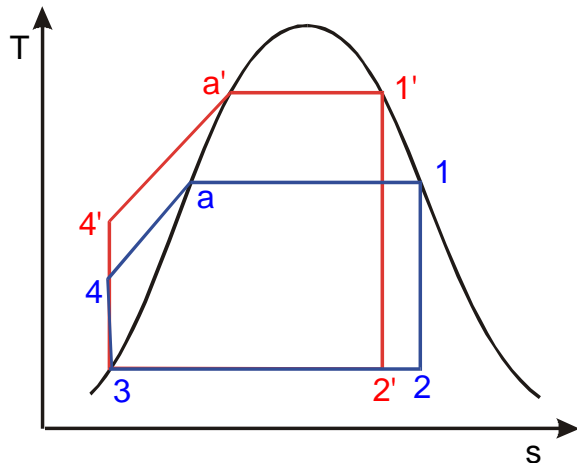
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} \quad [6.8]$$

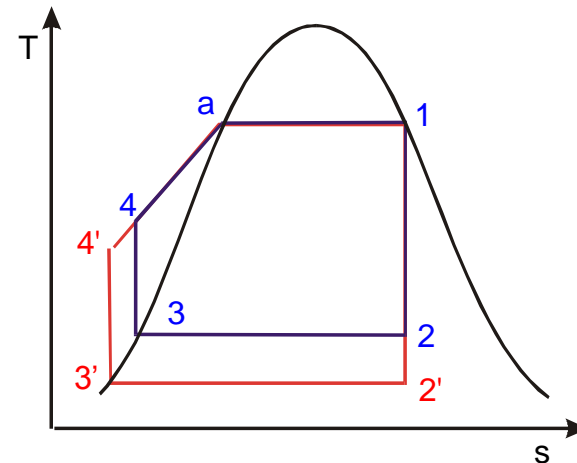
$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo:

A. Aumento de $P_{CALDERA}$



B. Disminución de $P_{CONDENSADOR}$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} \quad [6.8]$$

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

Modificaciones para aumentar la potencia y/o eficiencia térmica del ciclo:

Requisito práctico: $X_2 > 90 \%$ \longrightarrow Aumento de η limitado mediante los procedimientos A y B.



C. Sobrecalentamiento (o recalentamiento)

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

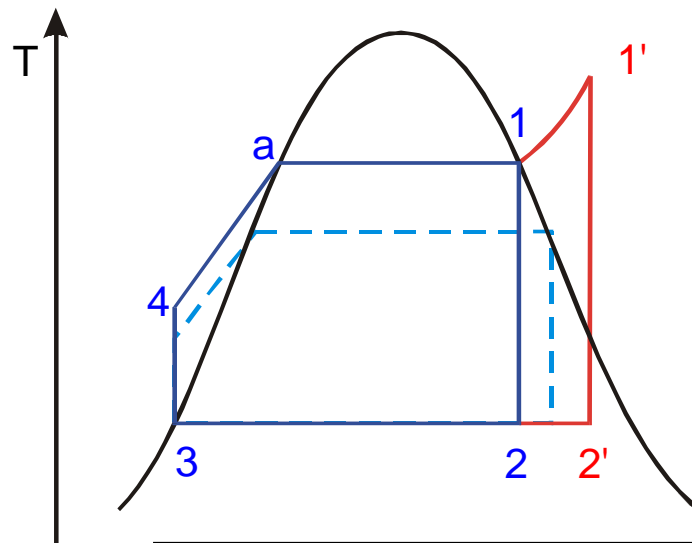
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

C. Sobrecalentamiento (o recalentamiento)

Obtención de vapor recalentado en la caldera a temperatura superior a la de saturación.



Cartagena99

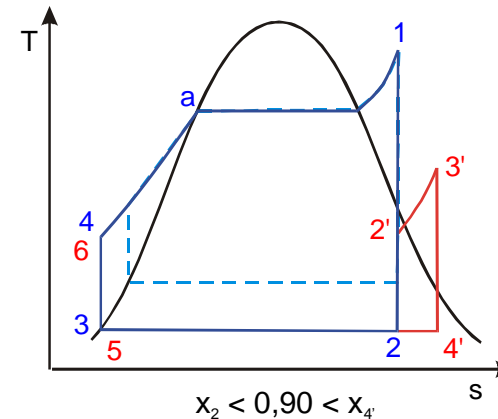
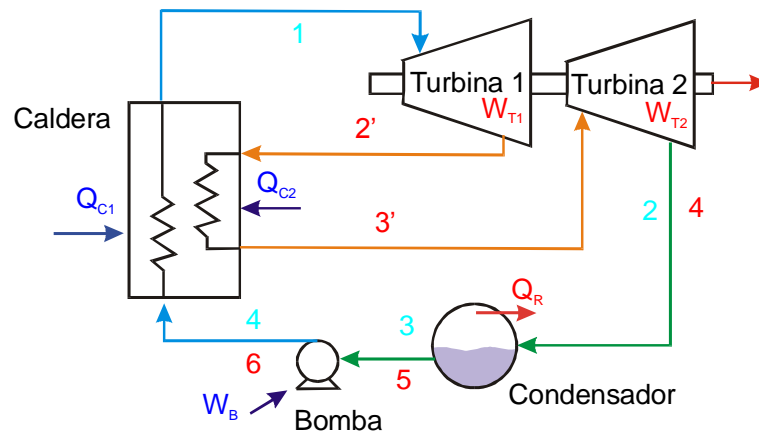
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

D. Recalentamiento intermedio

Vapor sobrecalentado se expande parcialmente en una primera etapa de la turbina, se recalienta y se vuelve a expandir en una segunda etapa de la turbina.



Ventajas

- Aumento del título del vapor a la salida de la turbina
- Mayor diferencia de presiones entre la caldera y el condensador,

$$W_{T1} + W_{T2} - (-W_B)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

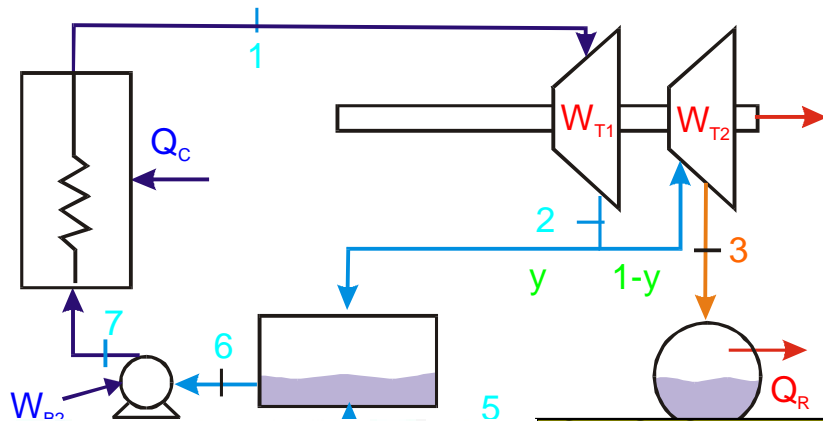
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

E. Regeneración

Aumento de la temperatura de trabajo de la caldera mediante precalentamiento del agua líquida que se introduce en la misma con parte del vapor de la turbina.

E.1 Cambiadores abiertos

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - [(-W_{B1}) + (-W_{B2})]}{Q_C} \quad [6.21]$$



Trabajos del ciclo

$$W_{T1} = h_1 - h_2$$

$$W_{T2} = (h_2 - h_3) \cdot (1 - y)$$

$$(-W_{B1}) = (h_5 - h_4) \cdot (1 - y)$$

$$(-W_{B2}) = (h_7 - h_6)$$

Intercambios de calor

$$Q_C = h_1 - h_7$$

$$(-Q_R) = (h_3 - h_4) \cdot (1 - y)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

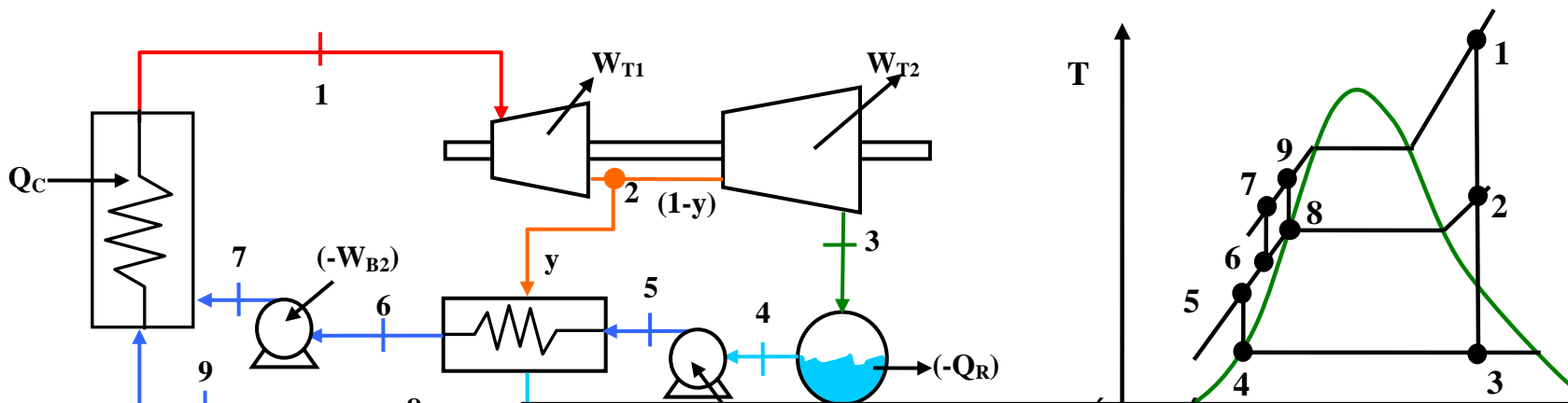
MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

OPCIÓN 1. Bombeo a caldera



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

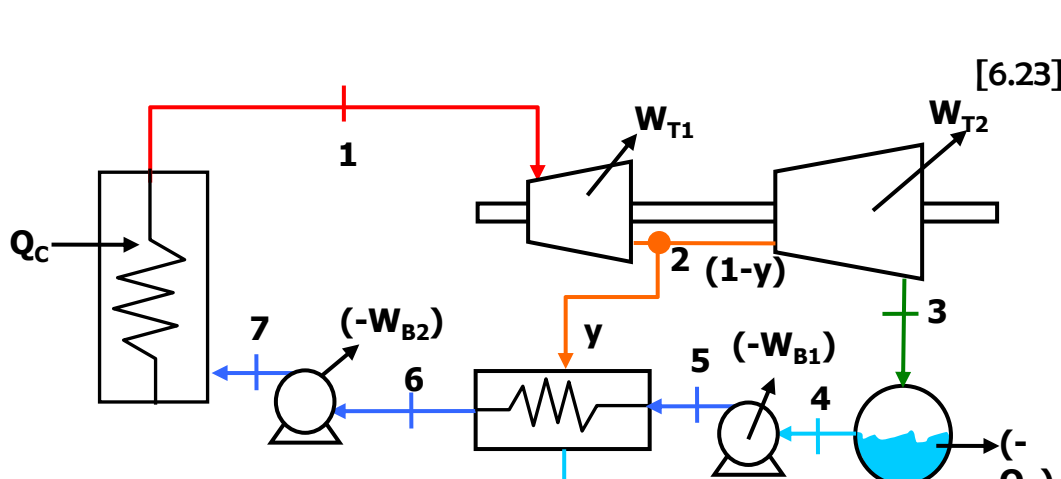
MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

OPCIÓN 2. Envío a condensador



$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - [(-W_{B1}) + (-W_{B2})]}{Q_C} \quad [6.23]$$

$$W_{T1} = h_1 - h_2$$

$$W_{T2} = (h_2 - h_3) \cdot (1 - y)$$

$$(-W_{B1}) = (h_5 - h_4)$$

$$(-W_{B2}) = (h_6 - h_7)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

Balance de energía en calentador

$$m \cdot y \cdot h_2 + m \cdot h_5 = m \cdot y \cdot h_8 + m \cdot h_6 \quad \therefore \quad y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_8} \quad [6.24]$$

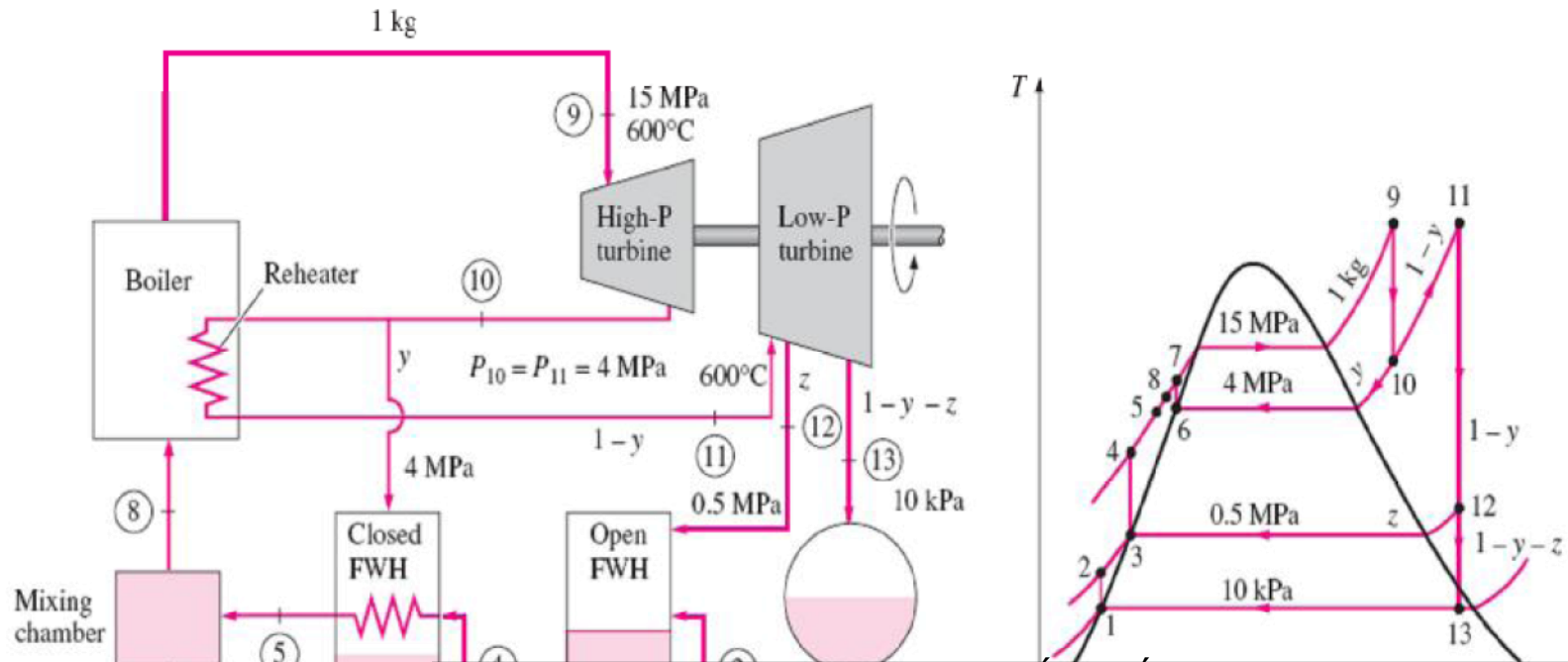


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

Combinación de modificaciones



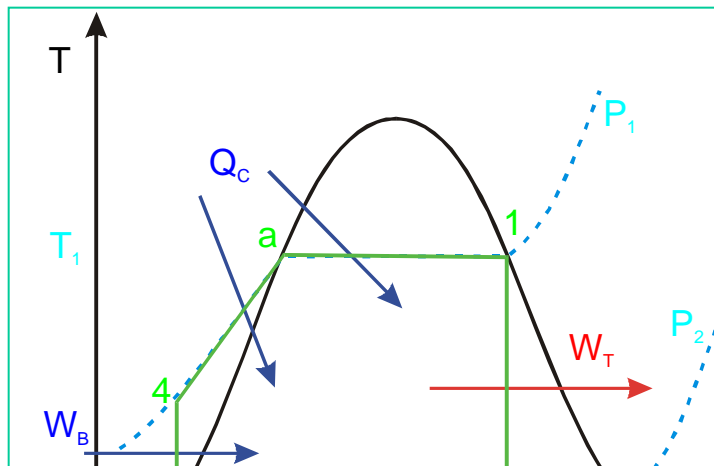
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Ejercicio N° 1

El fluido de trabajo de un ciclo Rankine Ideal es vapor de agua. A la turbina entra vapor saturado a 8,0 MPa y del condensador sale líquido saturado a la presión de 0,008 MPa. La potencia neta obtenida es de 100 MW. Determinélese para el ciclo:



- Rendimiento térmico
- Relación de trabajos
- Flujo másico de vapor en kg/h
- Calor absorbido en el paso por caldera
- El calor cedido en el condensador

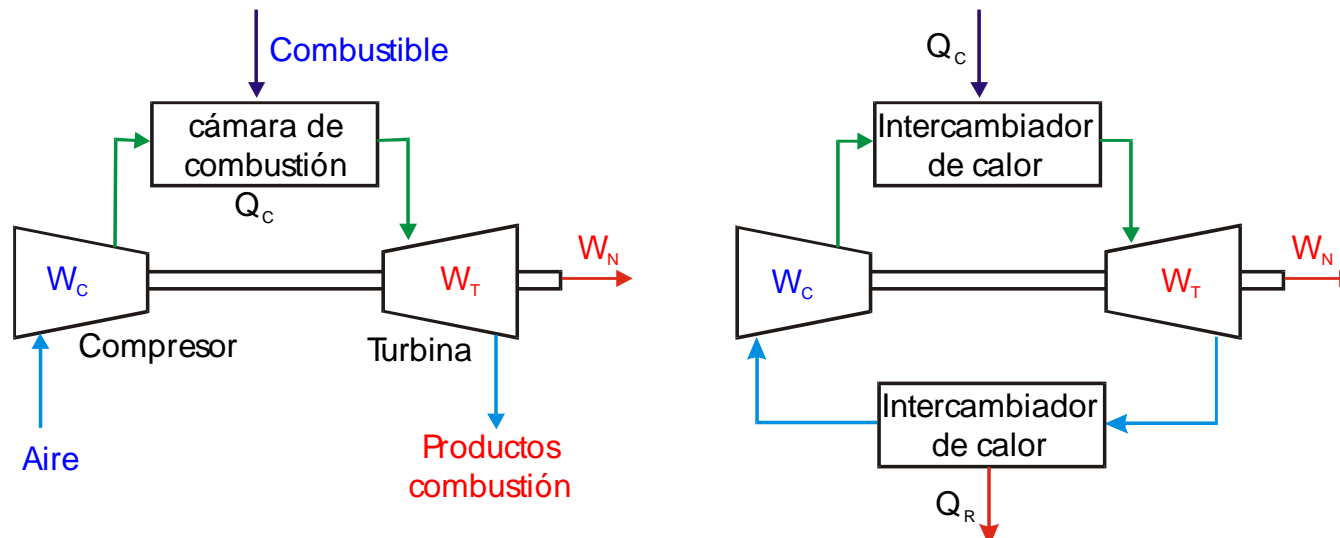
Utilícese tablas de vapor de agua

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

	Rendimiento máximo	Rendimiento real
Turbinas de vapor (550 °C)	65 %	40-45%
Turbinas de gas (1000-1400 °C)	83 %	62 %



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

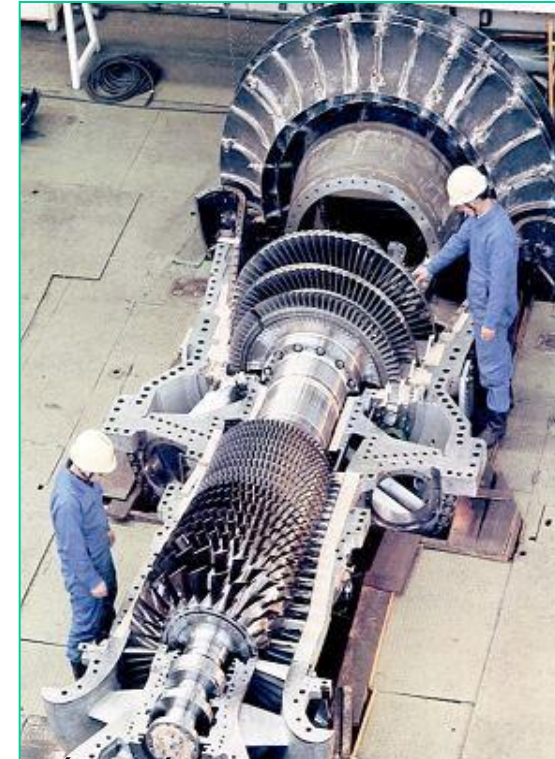
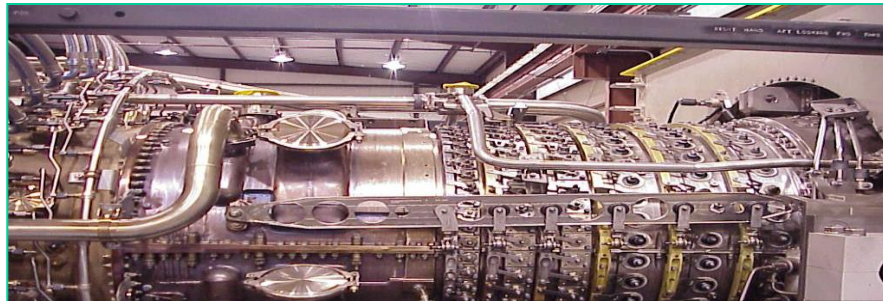
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO DE BRAYTON IDEAL

Ciclo abierto

→ *Inconveniente:* el agente de transformación cambia de composición

→ **Análisis de aire estándar**

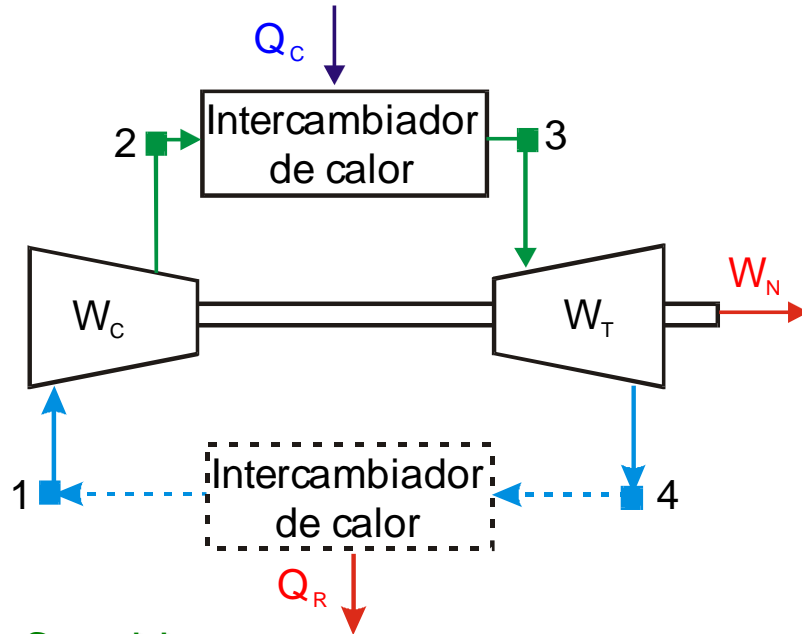
- ✓ El aire se comporta como gas ideal y sin cambio de composición
- ✓ El calor de la combustión procede de una fuente externa caliente

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

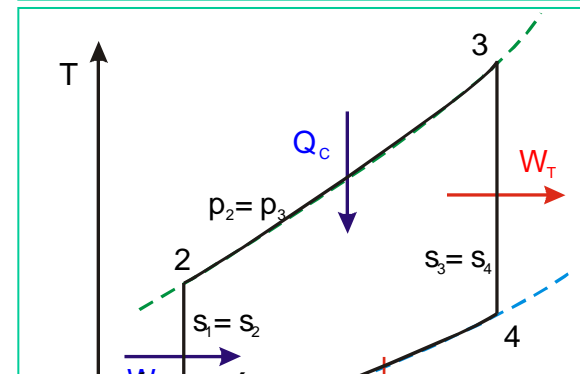
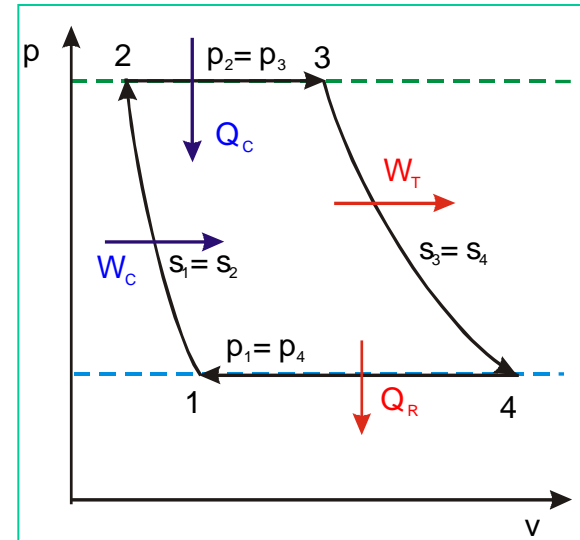
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CICLO DE BRAYTON IDEAL



Suposiciones:

- Todos los procesos son reversibles
- Sin pérdidas de presión en la circulación del AT



CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

CICLO DE BRAYTON IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:

$$\eta_{BRAYTON} = \frac{W_T - (-W_C)}{Q_C} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad [6. 14]$$

Relación de Trabajos:

$$RT = \frac{(-W_C)}{W_T} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} \quad [6. 15]$$

*Relación de trabajos
(RT)*

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

CICLO DE BRAYTON IDEAL

Análisis de Aire Estándar Frío:

Se supone C_p y $C_v = \text{cte} \rightarrow \gamma = \text{cte}$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \quad [6.16]$$

Compresión adiabática y reversible:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad [6.17]$$

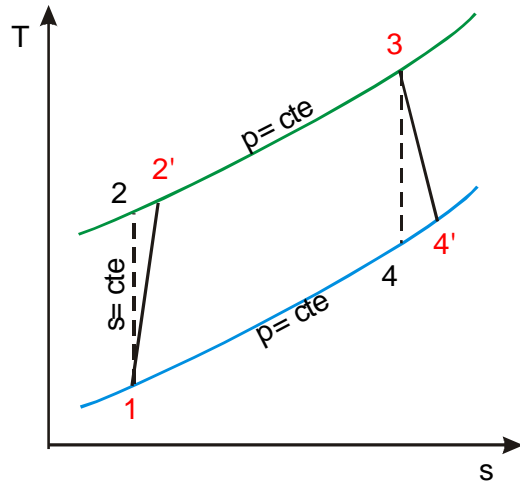
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

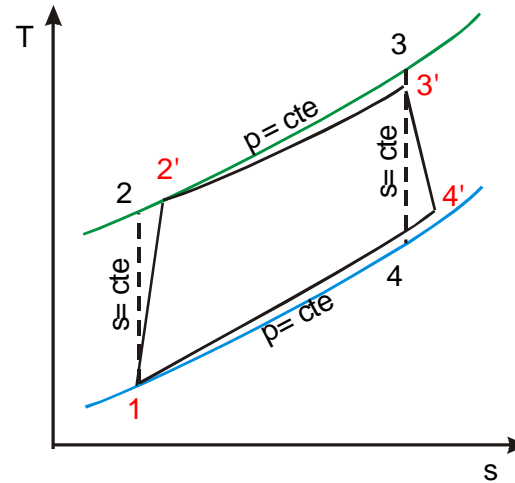
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Irreversibilidades y Pérdidas:

Análogo a lo descrito para ciclos de Turbinas de Vapor



Irreversibilidades en turbina



Irreversibilidades en turbina y

$$\eta_{TG} = \frac{W_T}{(W_T)_s} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4} \quad [6.18]$$

$$\eta_c = \frac{(-W_C)_s}{(-W_C)} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1} \quad [6.19]$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

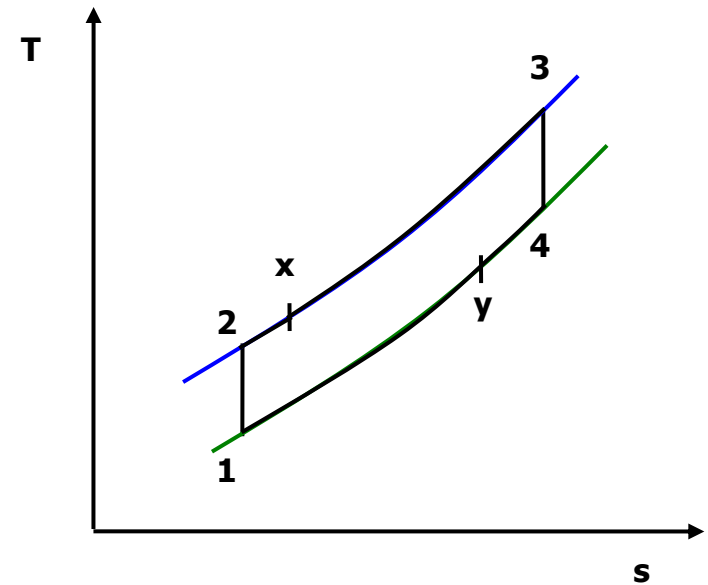
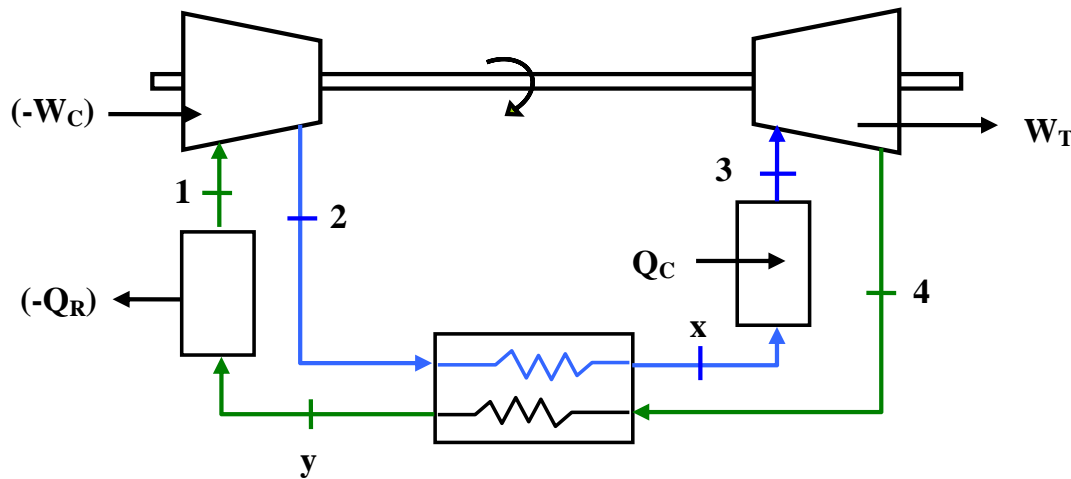
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

MODIFICACIONES DEL CICLO BRAYTON

A. Regeneración

Objetivo: disminuir Q_C

Requisito: $T_4 > T_2$



Cartagena99

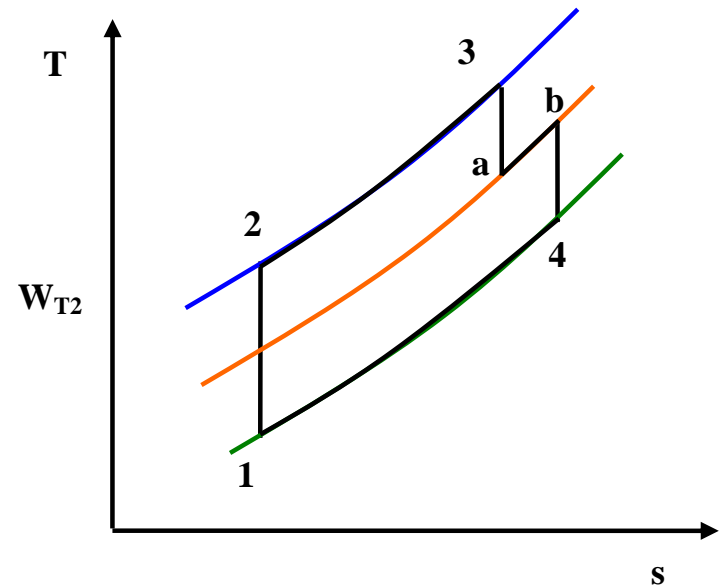
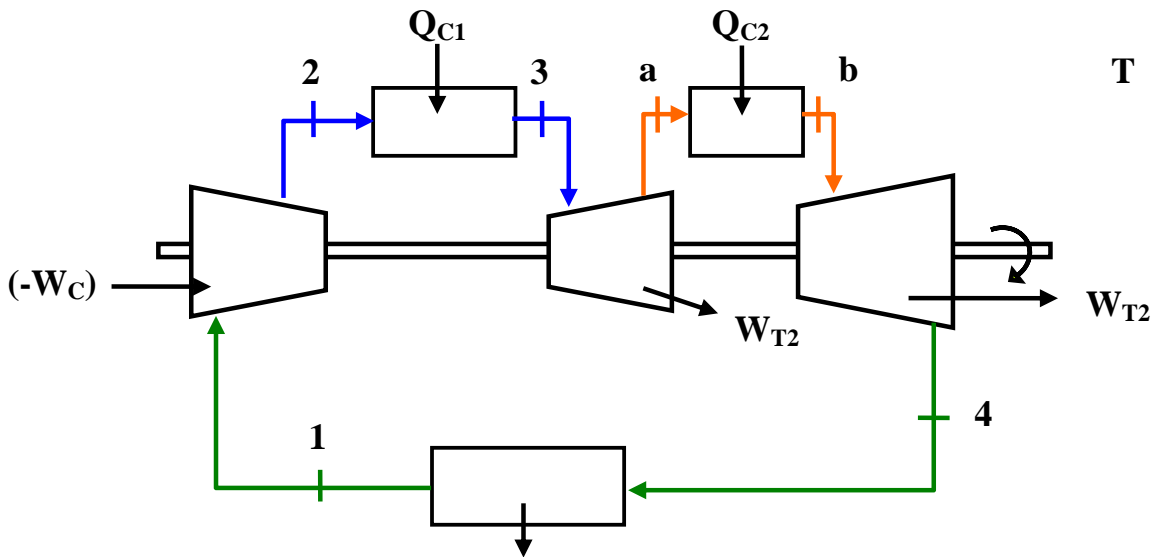
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

MODIFICACIONES DEL CICLO BRAYTON

B. Doble aporte de calor (combustión en doble etapa)

Objetivo: Aumentar W_T



Cartagena99

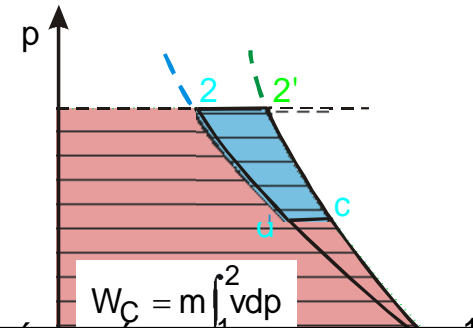
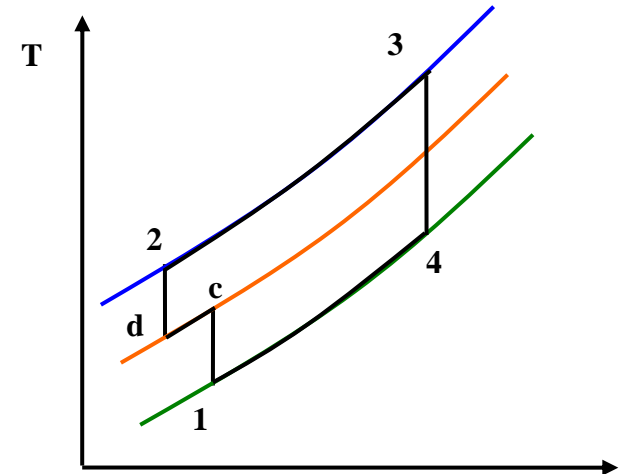
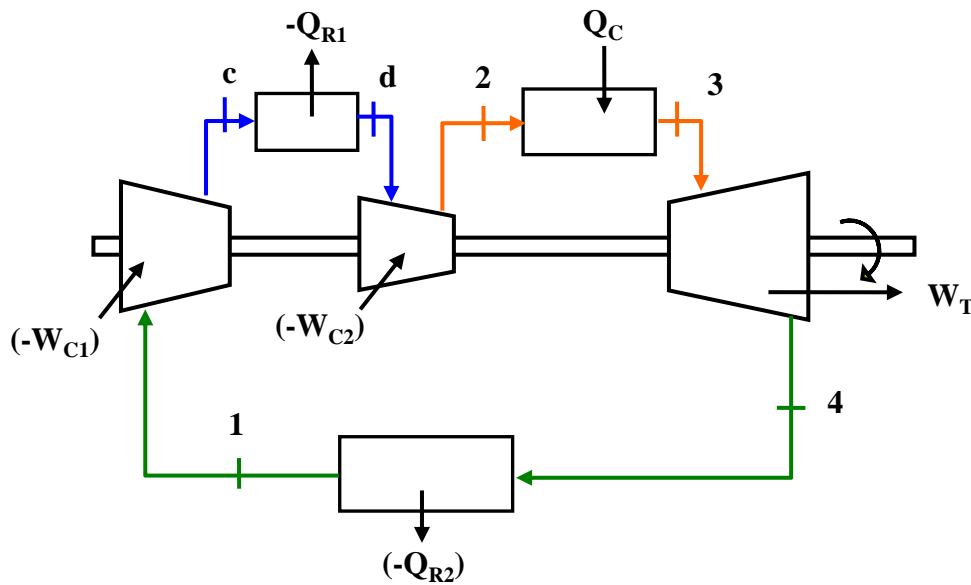
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

MODIFICACIONES DEL CICLO BRAYTON

C. Compresión con refrigeración

Objetivo: Disminuir W_C (aunque aumenta Q_C)

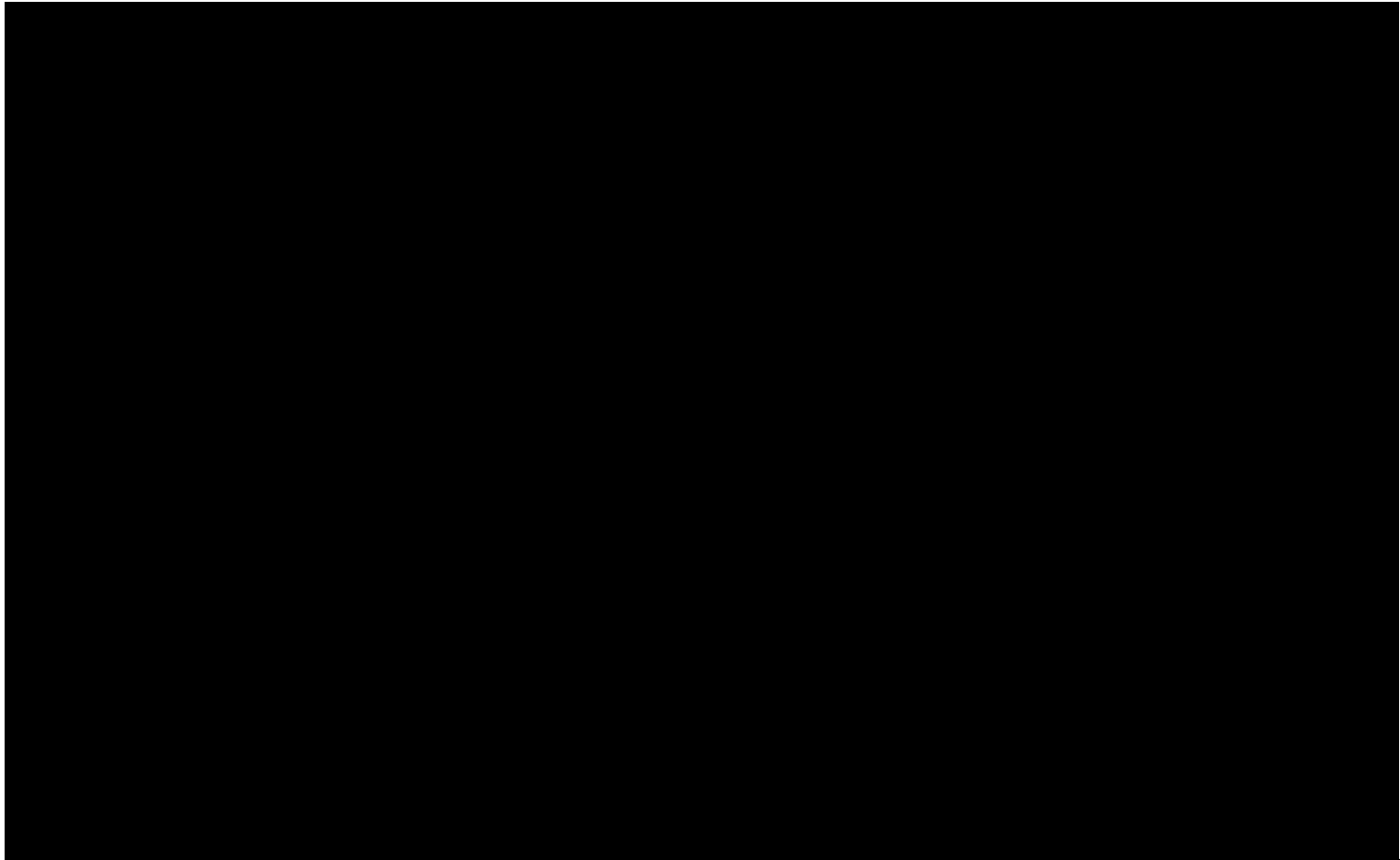


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

• Mayor potencial de regeneración



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70