

## 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.

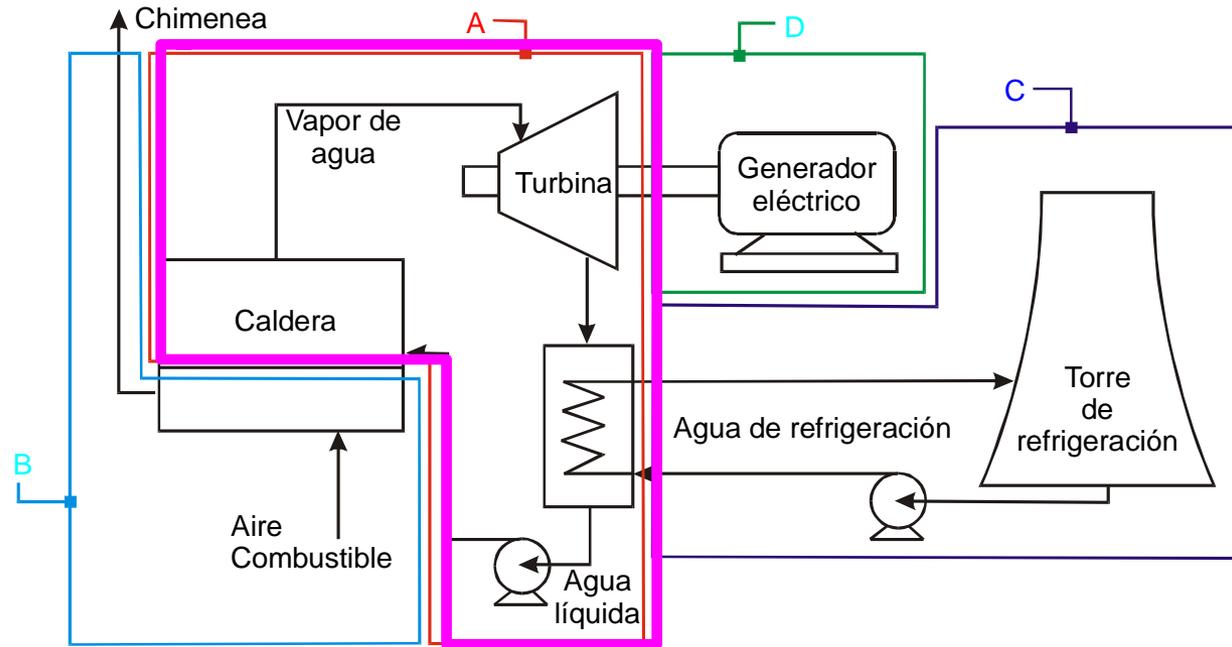
Generación de calor.

**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

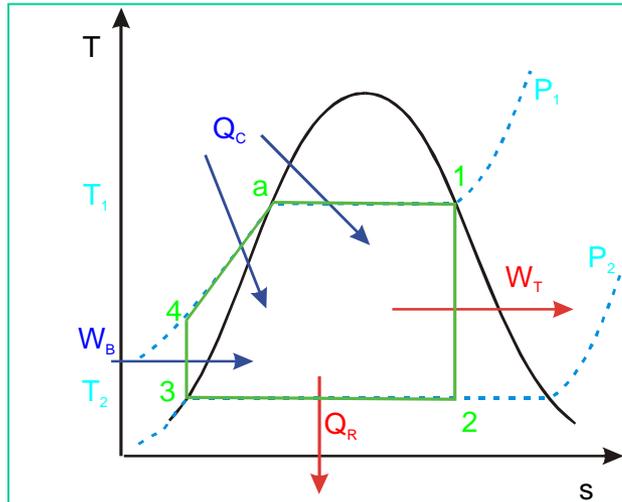
---

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



## CICLO RANKINE IDEAL

### 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

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

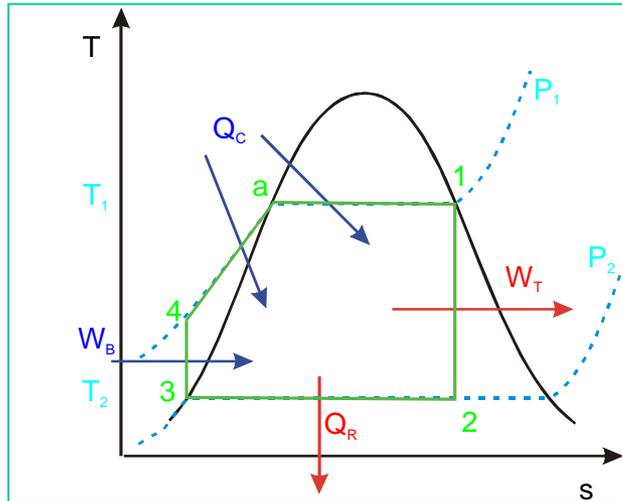
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

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

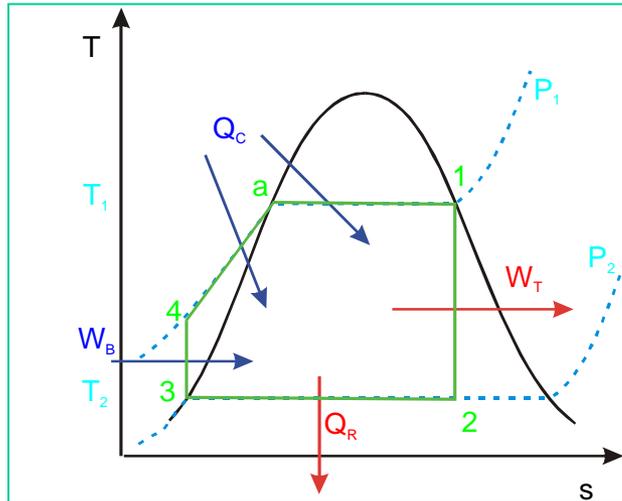
---

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



## CICLO RANKINE IDEAL

### Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 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

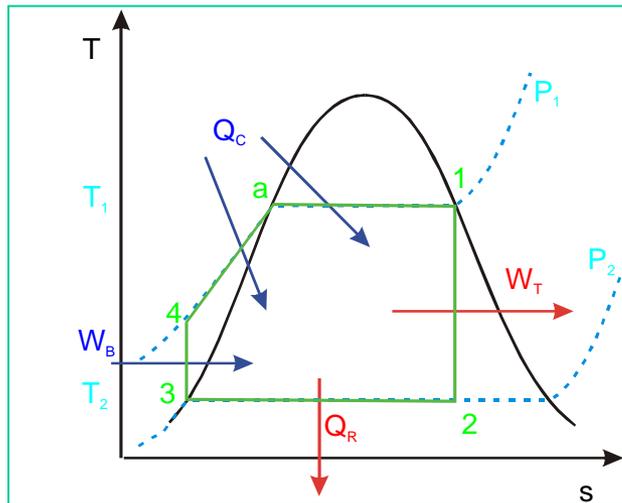
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

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

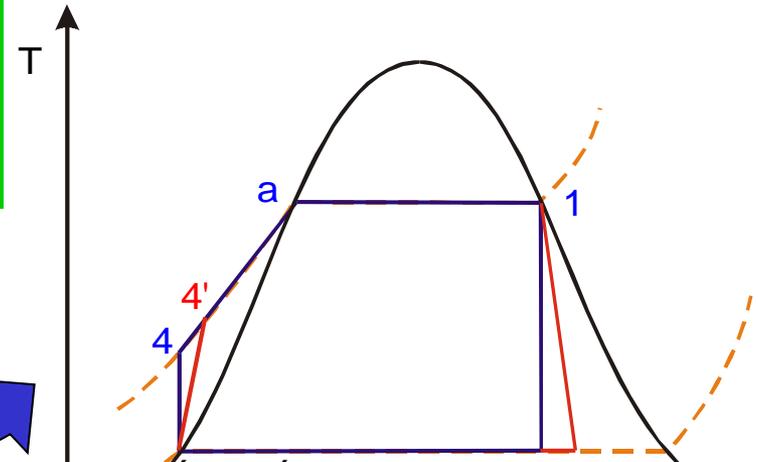
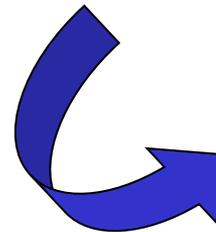
### Irreversibilidades y Pérdidas:

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

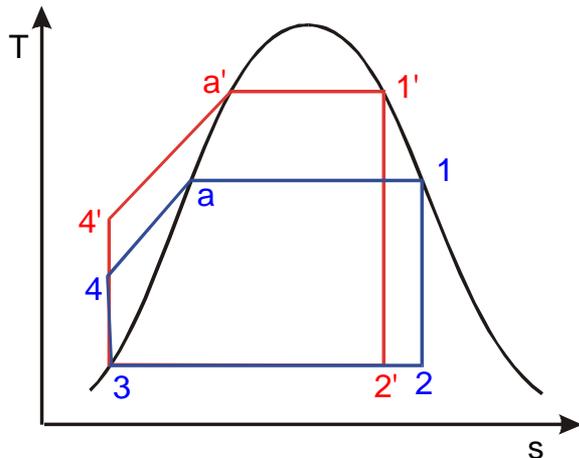
## MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

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

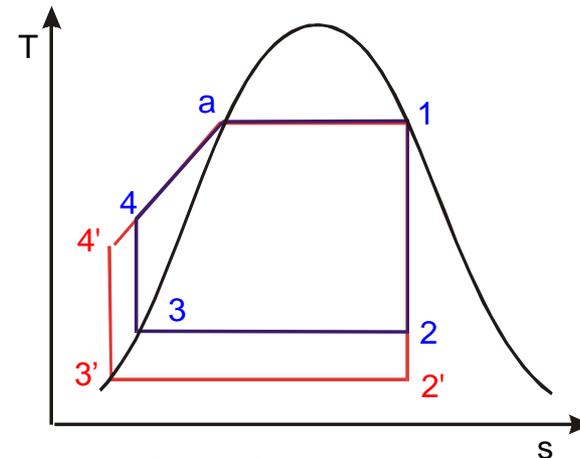
$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

### 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  $\eta$  limitado mediante los procedimientos A y B.



### C. Sobrecalentamiento (o recalentamiento)

Cartagena99

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

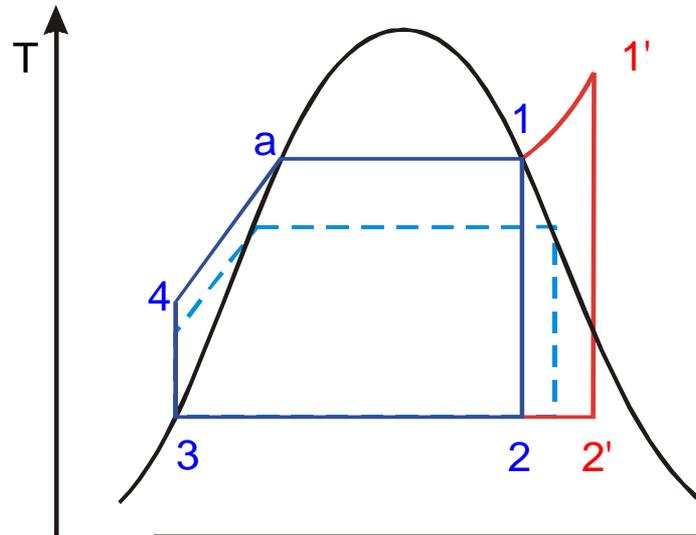
---

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

## MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

### 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





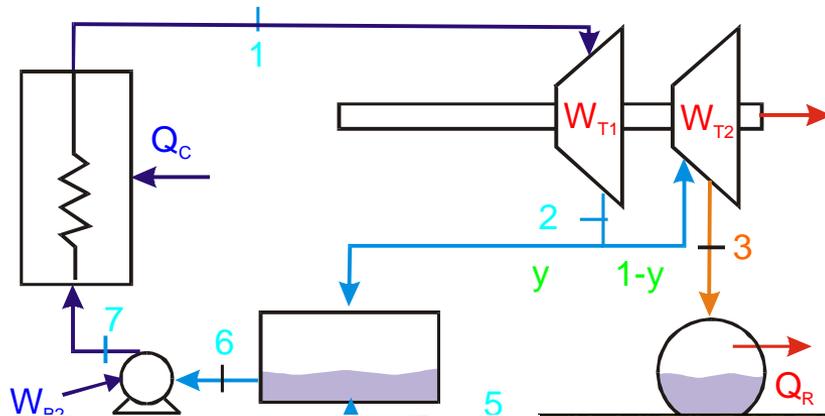
## MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

### 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



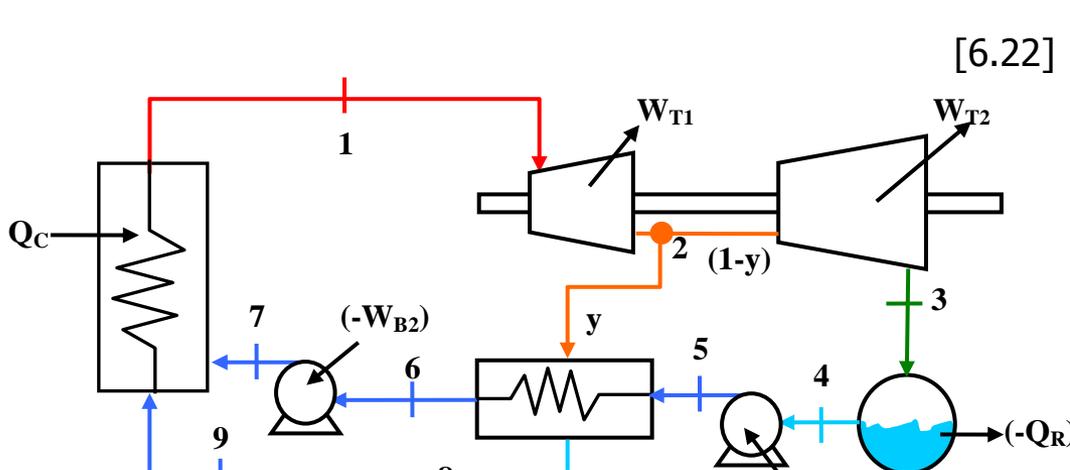
## MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

### 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



[6.22]

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - [(-W_{B1}) + (-W_{B2}) + (-W_{B3})]}{Q_C}$$

$$W_{T1} = h_1 - h_2 \quad W_{T2} = (h_2 - h_3) \cdot (1 - y)$$

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

$$(-W_{B2}) = (h_7 - h_6) \cdot (1 - y)$$

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

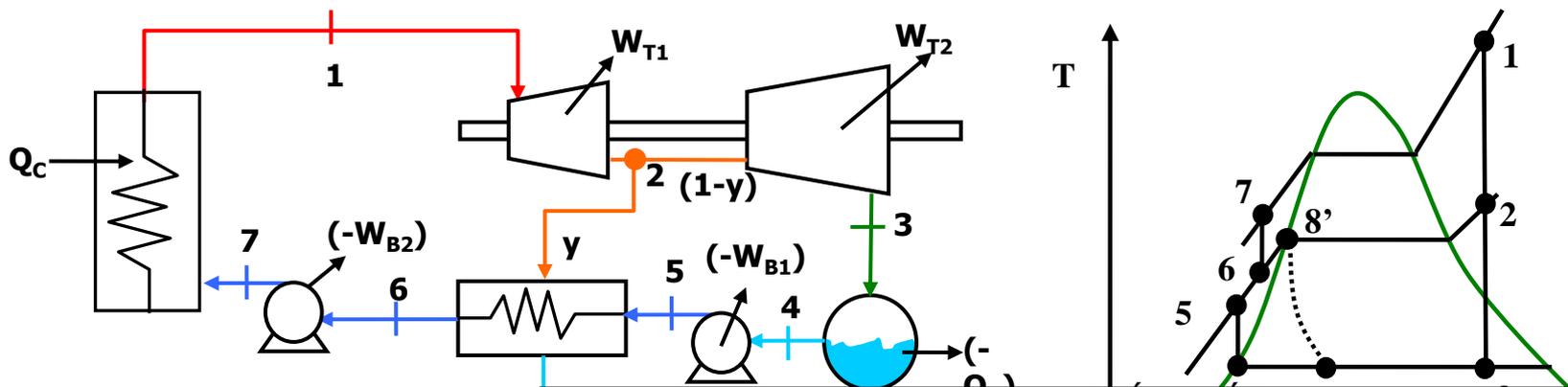
## MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

### E. Regeneración

#### E.2 Cambiadores cerrados

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

#### OPCIÓN 2. Envío a condensador



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

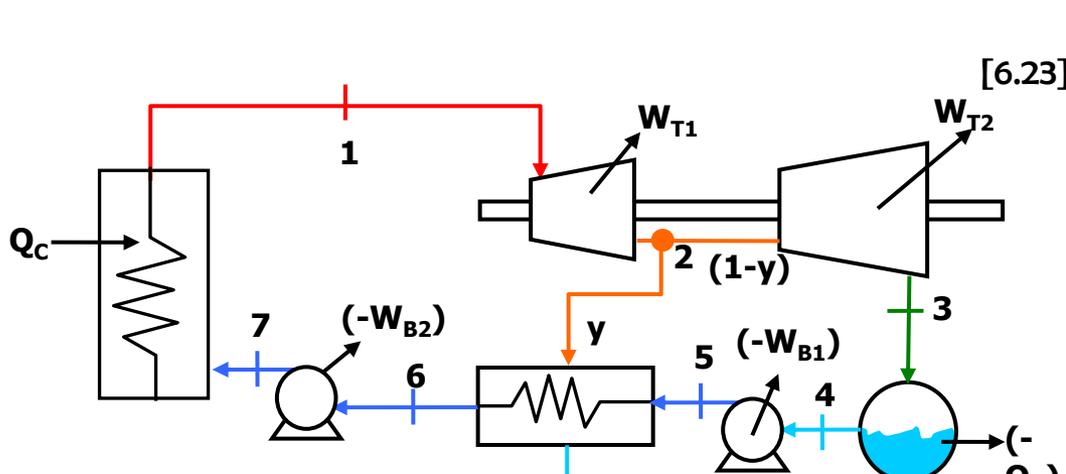
## MODIFICACIONES DEL CICLO RANKINE

### 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



[6.23]

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

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

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

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

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

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

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



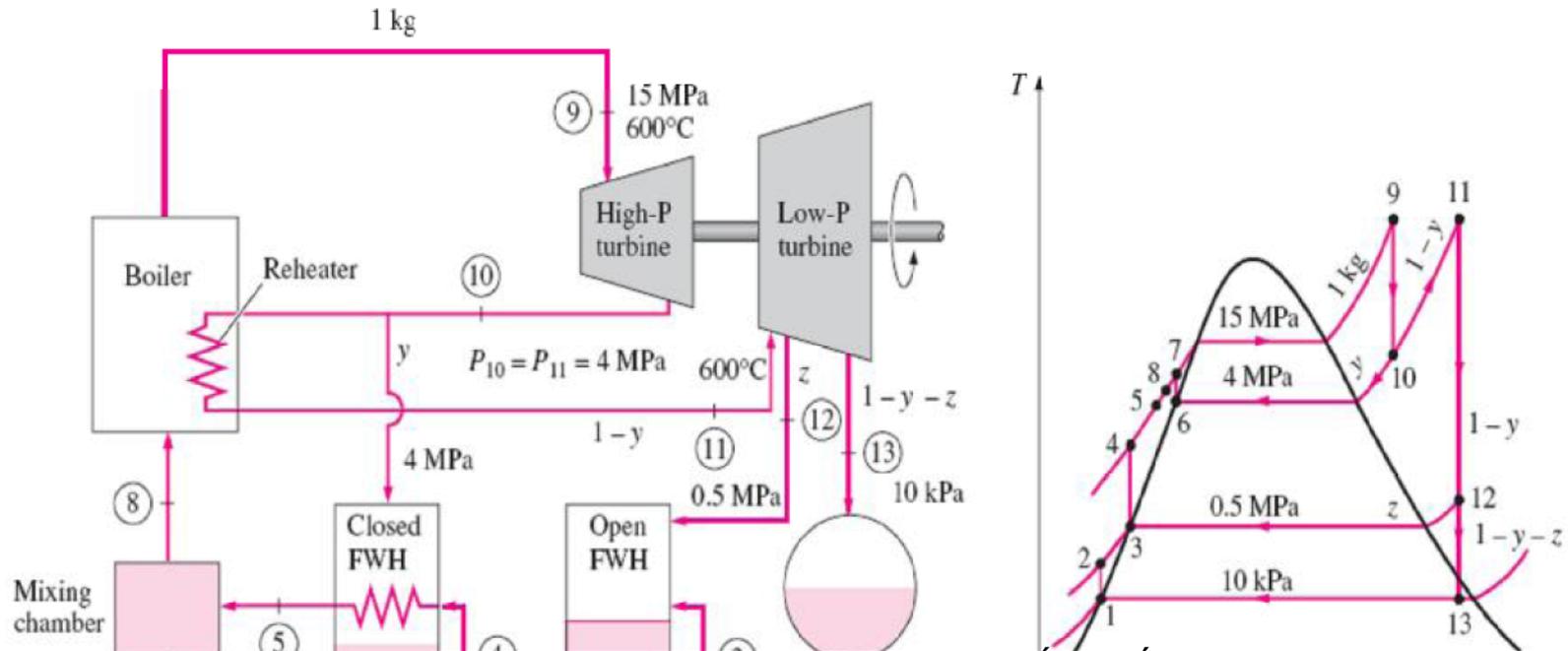
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

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

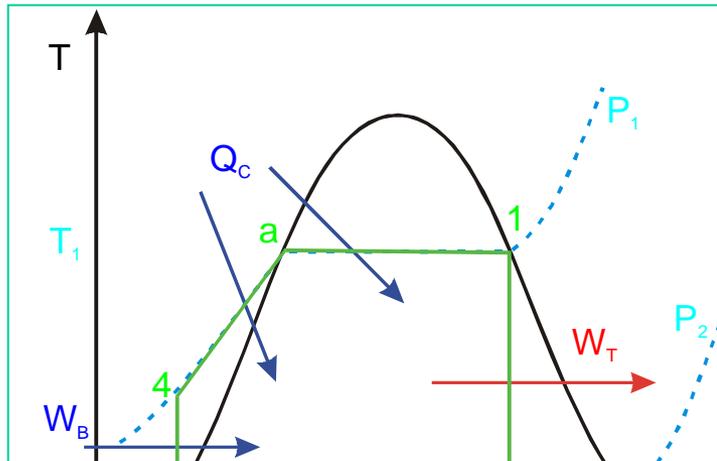
---

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*

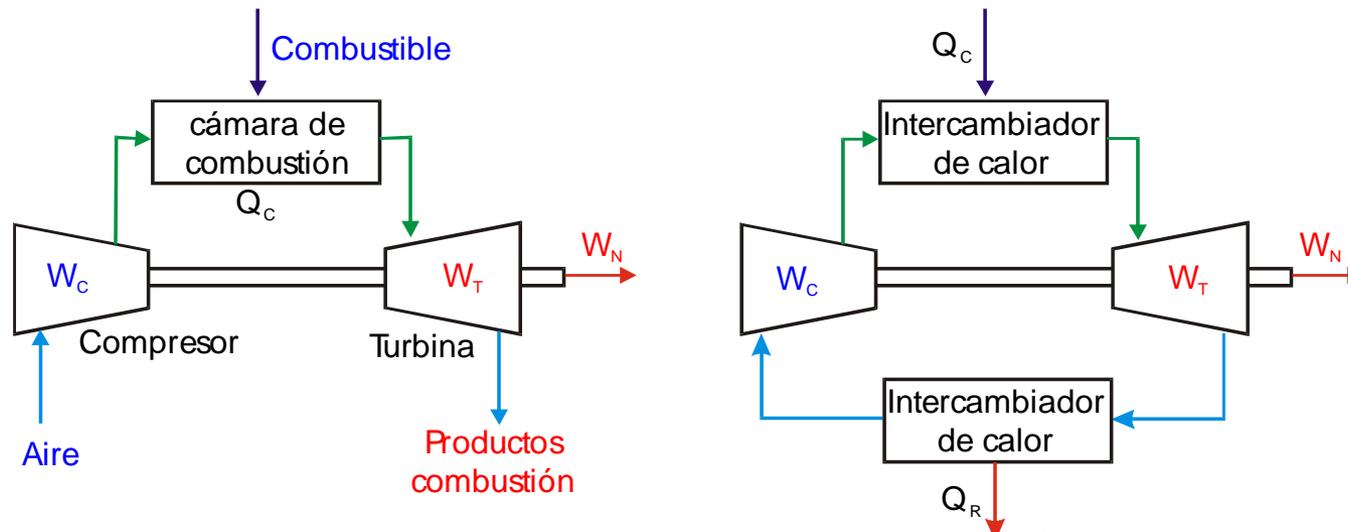
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

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



## 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

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

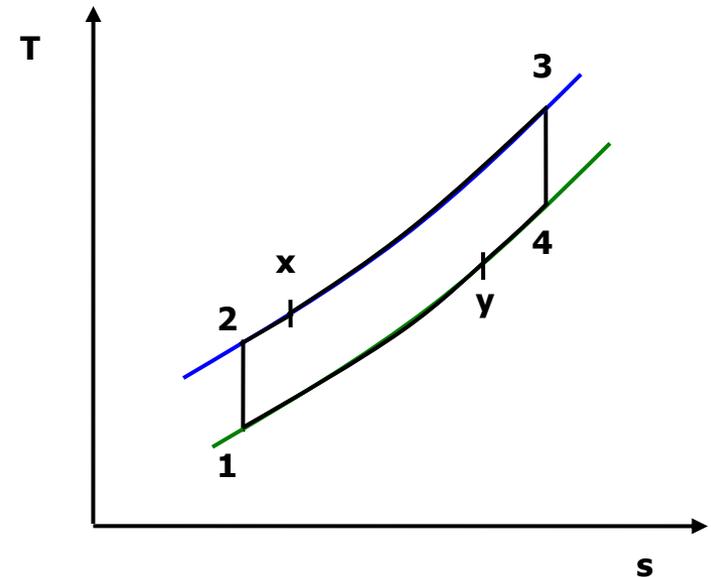
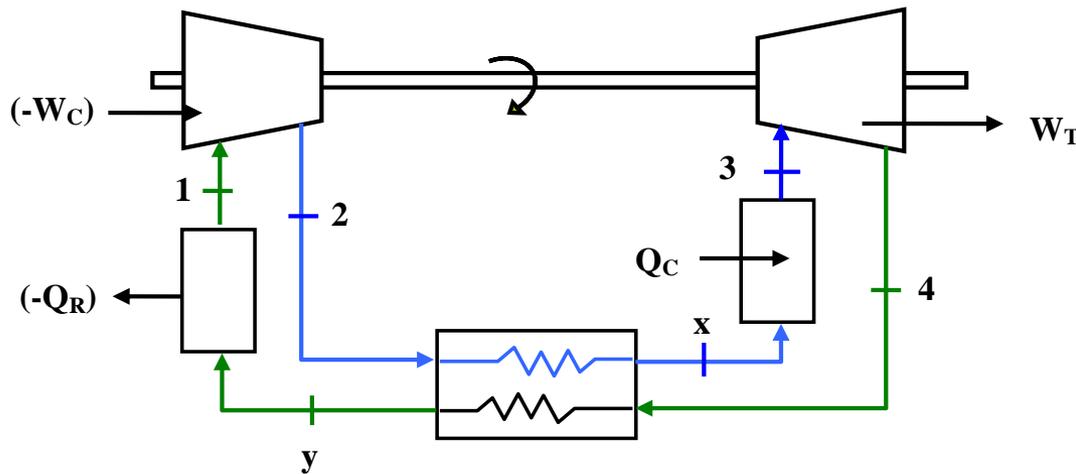


## MODIFICACIONES DEL CICLO BRAYTON

### 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

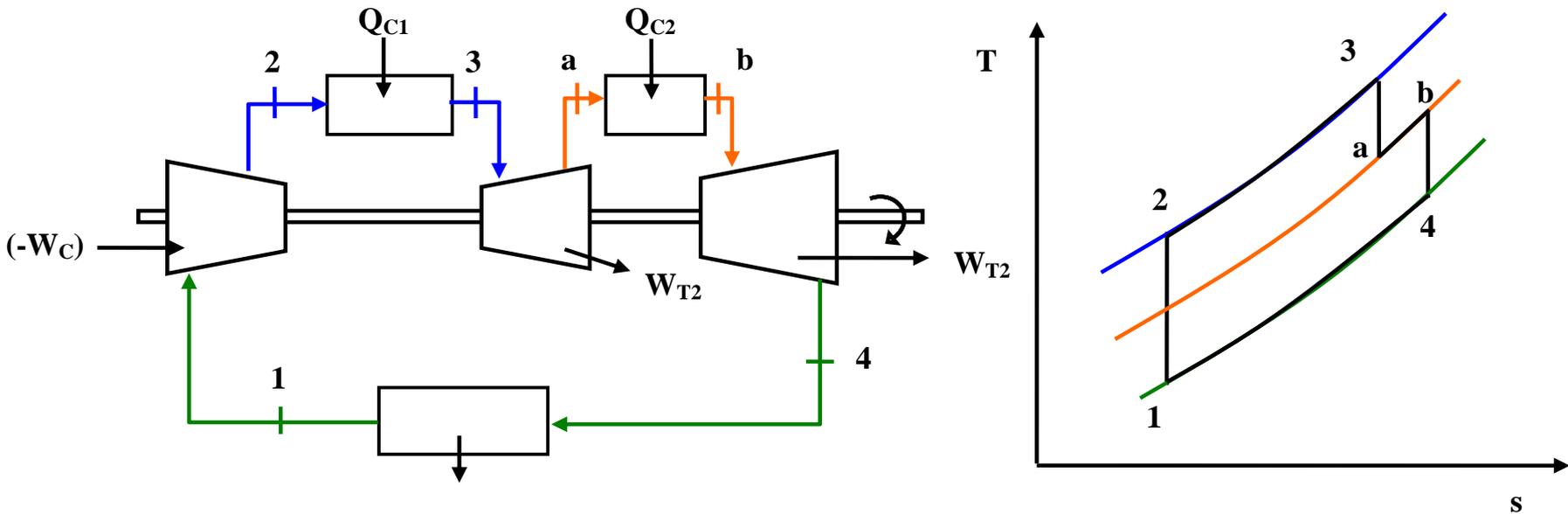
---

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

## MODIFICIACIONES DEL CICLO BRAYTON

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

Objetivo: Aumentar  $W_T$



Cartagena99

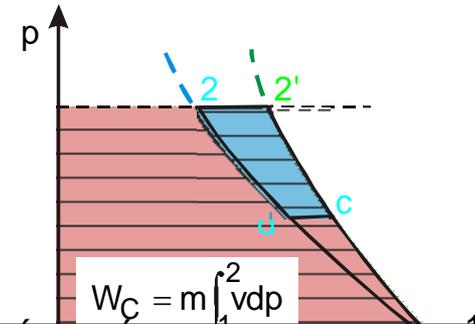
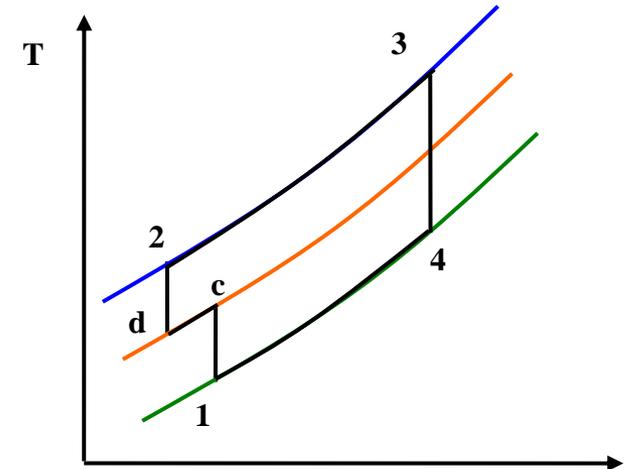
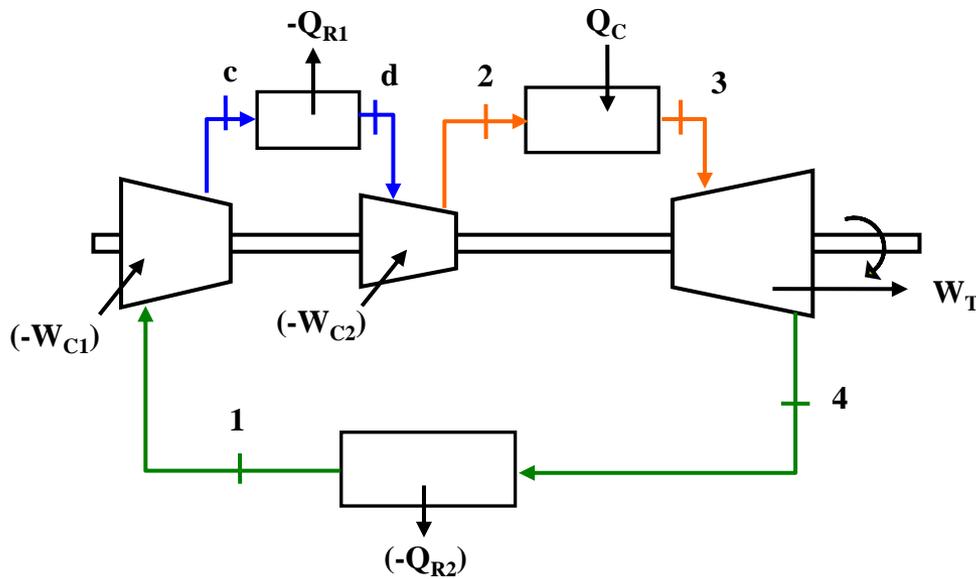
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

