



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

TEMA II. CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR

PROF. ING. JOSMERY SÁNCHEZ. MSc

Objetivo didáctico: Evaluar el comportamiento termodinámico de los ciclos de potencia de vapor Rankine en sus diferentes modalidades

CONTENIDO:

- ***Ciclo de potencia de Carnot.***
- ***Ciclo Rankine ideal.***
- ***Efectos de la presión y temperatura en un ciclo Rankine.***
- ***Divergencias entre un ciclo Rankine real e ideal.***
- ***Ciclo de vapor Rankine ideal con recalentamiento.***
- ***Ciclo de vapor Rankine ideal regenerativo.***
- ***Ciclo combinados gas-vapor.***

CICLO DE POTENCIA DE CARNOT

Introducción

Ciclos de Potencia de Carnot

Principio

Diagramas T-s y H-s

Ecuaciones

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

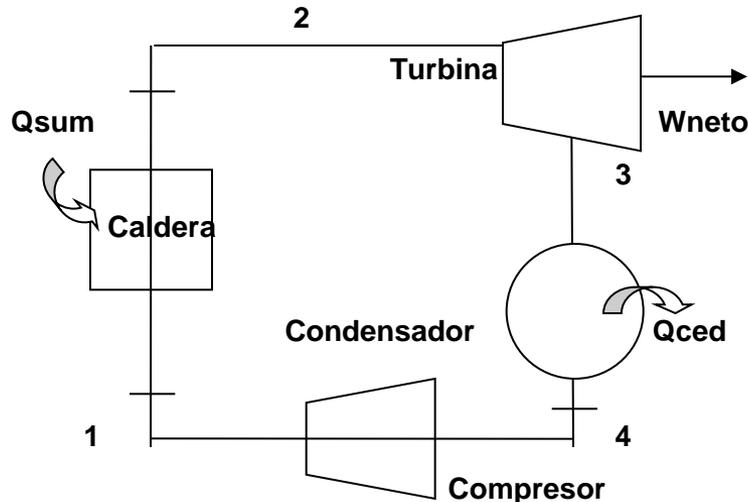
Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Principio de Carnot.



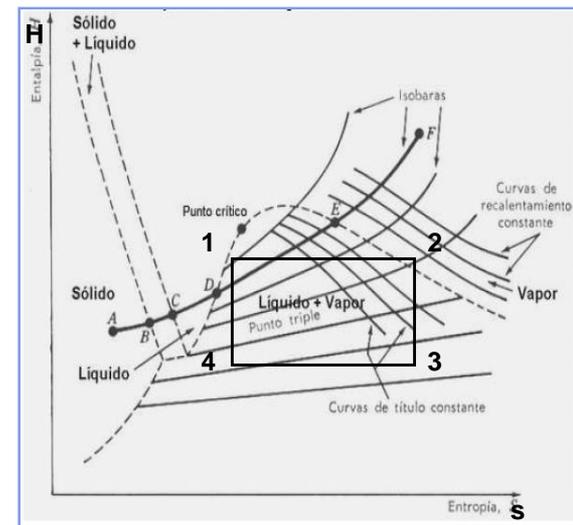
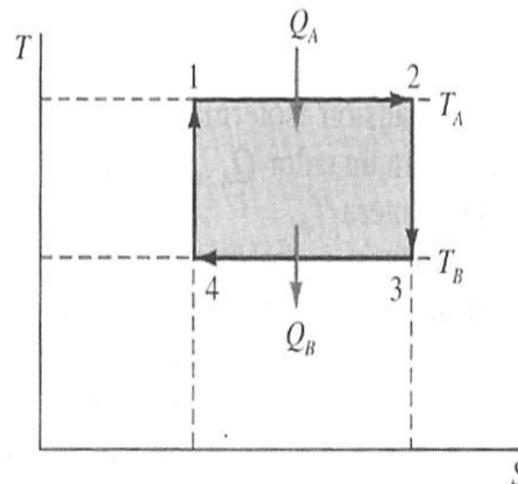
1-2 Suministro de calor reversible e isotérmico

2-3 Expansión isoentrópica

3-4 Cesión de calor reversible e isotérmico

4-1 Compresión isoentrópica

Diagramas T-s y H-s



CICLO DE POTENCIA DE CARNOT

Ecuaciones basadas en leyes fundamentales de la Termodinámica

$$\eta_T = \frac{W_{net,sal}}{Q_{sum}} = \frac{W^*}{Q^*}$$

$$\eta_T = \frac{W_{net,sal}}{Q_{sum}} = \frac{Q_{A,sum} - Q_{B,ced}}{Q_{A,sum}} = 1 - \frac{Q_{B,ced}}{Q_{A,sum}}$$

Basándonos en la sugerencia de Lord Kelvin de una escala termodinámica de temperatura se obtiene:

$$\frac{Q_{A,sum}}{Q_{B,ced}} = \frac{T_A}{T_B} \Rightarrow \eta_I = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Principio

Diagramas T-s y H-s

Ecuaciones

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Principio

Diagramas T-s

Rendimiento Térmico

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Principio del ciclo Rankine

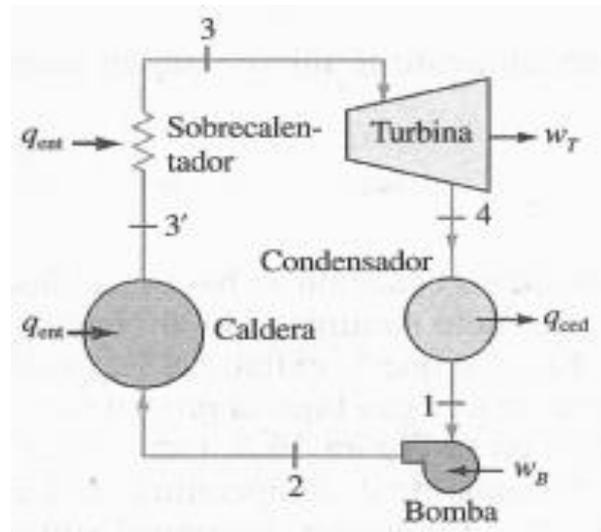
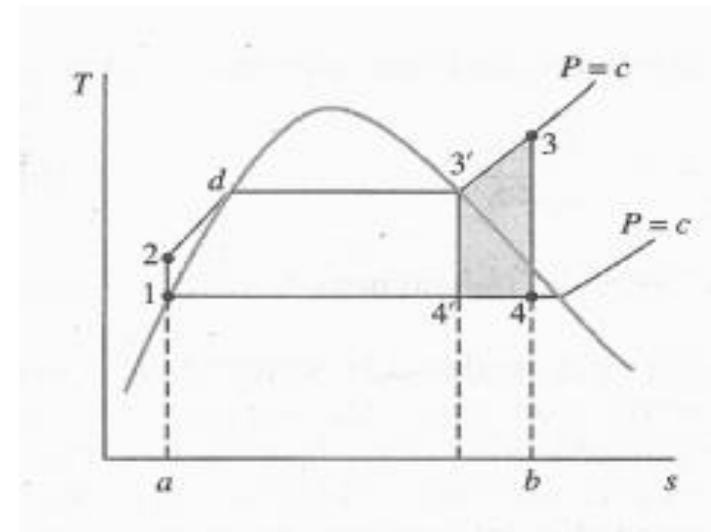


Diagrama T-s



1-2 Compresión isentrópica

2-3 Suministro de calor a presión constante

3-4 Expansión isentrópica

4-1 Cesión de calor reversible e isotérmico

CICLO RANKINE IDEAL

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Principio

Diagramas T-s

Rendimiento Térmico

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Rendimiento Térmico

Ecuación de flujo estable para cada componente por unidad de masa de vapor

$$q + w = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p$$

Despreciando los cambios de energía cinética y potencial se tiene,

$$q + w = h_{sal} - h_{ent}$$

Trabajo Isoentrópico en la bomba

$$w_{est} = \int v dP \Rightarrow w_{B,ent} = v_{f,1} (P_2 - P_1) \quad s_1 = s_2$$

Calor suministrado en la caldera

$$q_{sum} = q_{2-3} = h_3 - h_2 \quad P_3 = P_2$$

CICLO RANKINE IDEAL

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Principio

Diagramas T-s

Rendimiento Térmico

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Rendimiento Térmico

Trabajo Isoentrópico en la turbina

$$w_{T,sal} = h_3 - h_4 \quad s_3 = s_4$$

Calor rechazado en el condensador

$$q_{cond,ced} = h_4 - h_1 \quad P_4 = P_1$$

Relación de masa con el Calor y trabajo

$$\dot{Q} = \dot{m} q \quad \text{y} \quad \dot{W}_{net} = \dot{m} w_{net} \quad \Rightarrow \quad w_{net} = w_{turbina} - w_{bomba}$$

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico

$$\eta_T = \frac{W_{T,sal} - W_{B,ent}}{q_{sum}} = \frac{h_3 - h_4 - v_{f,1}(P_2 - P_1)}{h_3 - h_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{ced}}{q_{sum}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Principio

Diagramas T-s

Rendimiento Térmico

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

EFECTOS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN UN CICLO RANKINE

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Reducción de Presión

Aumento de Presión

Sobrecalentamiento del vapor

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

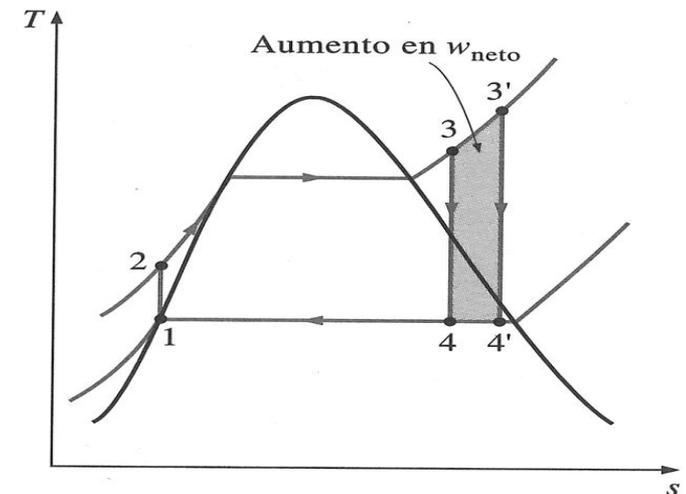
Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Reducción de Presión en el Condensador

Aumento de Presión en la Caldera

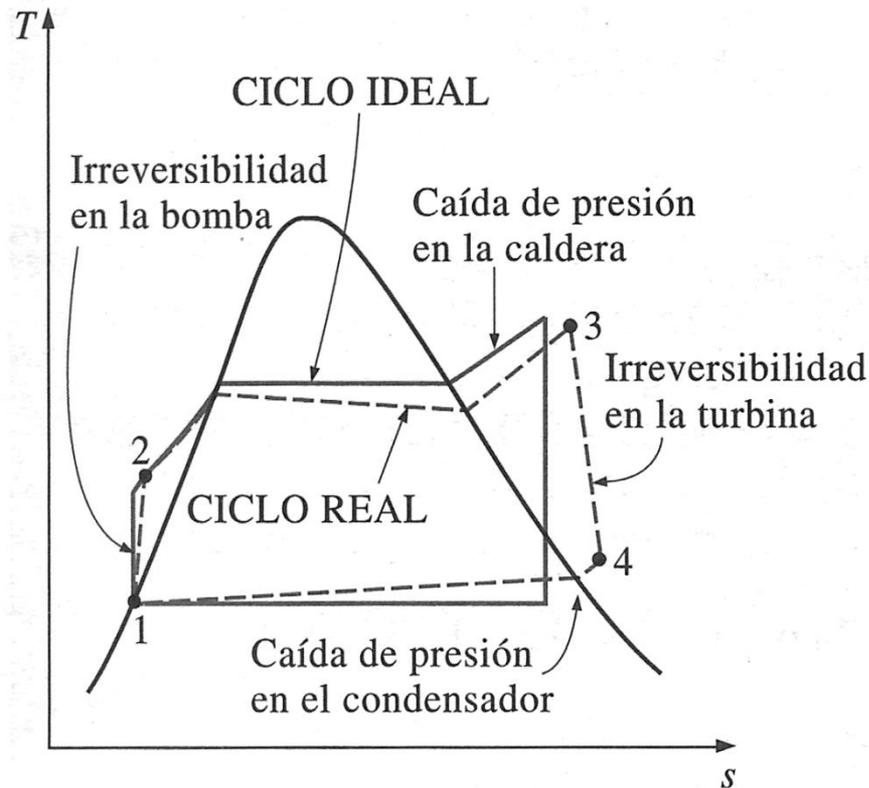
Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas



DIVERGENCIAS ENTRE UN CICLO RANKINE REAL Y UN IDEAL

Pérdidas por fricción

Pérdidas por Transferencia de calor



Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Pérdidas por fricción

Pérdidas por Transferencia de calor

Irreversibilidades en bombas y turbinas

Ciclo Rankine con Recalentamiento

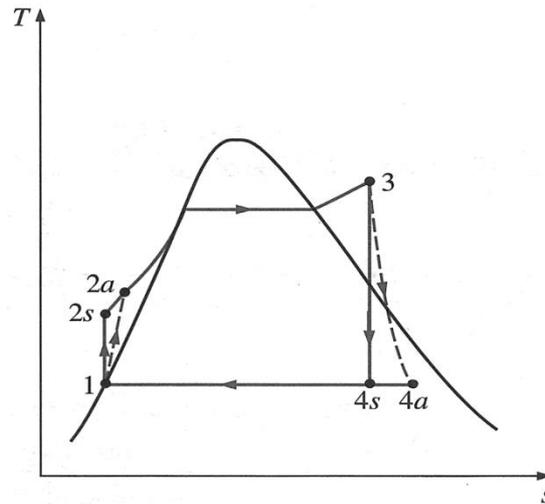
Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

DIVERGENCIAS ENTRE UN CICLO RANKINE REAL Y UN IDEAL

Irreversibilidades en bombas y turbinas



$$\eta_{\text{Bomba}} = \frac{W_{s,\text{ideal}}}{W_{a,\text{real}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_{\text{Turbina}} = \frac{W_{a,\text{real}}}{W_{s,\text{ideal}}} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Pérdidas por fricción

Pérdidas por Transferencia de calor

Irreversibilidades en bombas y turbinas

Ciclo Rankine con Recalentamiento

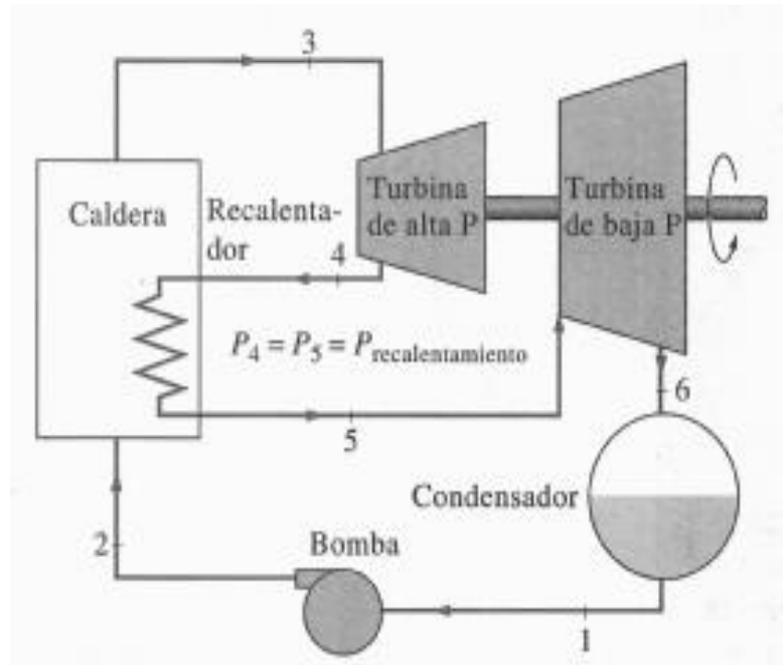
Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL CON RECALENTAMIENTO

Características y componentes



Descripción de turbinas con etapas múltiples

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Características y Componentes

Descripción de turbinas con etapas múltiples

Análisis energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL CON RECALENTAMIENTO

Análisis energético de un ciclo de vapor con recalentamiento

Trabajo Isoentrópico en Turbina de Alta Presión

$$\frac{w_{T\ alta}}{\Rightarrow} = \frac{(h_3 - h_4)}{\underline{\hspace{2cm}}}$$

Trabajo Isoentrópico en Turbina de Baja Presión

$$\frac{w_{T\ baja}}{=} = \frac{(h_5 - h_6)}{\underline{\hspace{2cm}}}$$

Trabajo Isoentrópico en la bomba

$$w_{B,ent} = v_{f,1} (P_2 - P_1) \quad s_1 = s_2$$

Suministro de Calor en el Proceso de Sobrecalentamiento de la Caldera

$$q_{cal} = q_{2-3} = h_3 - h_2 \quad P_3 = P_2$$

Suministro de Calor en el Proceso de Recalentamiento de la Caldera

$$q_{reca1} = q_{4-5} = h_5 - h_4 \quad P_4 = P_5$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Características y Componentes

Descripción de turbinas con etapas múltiples

Análisis energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

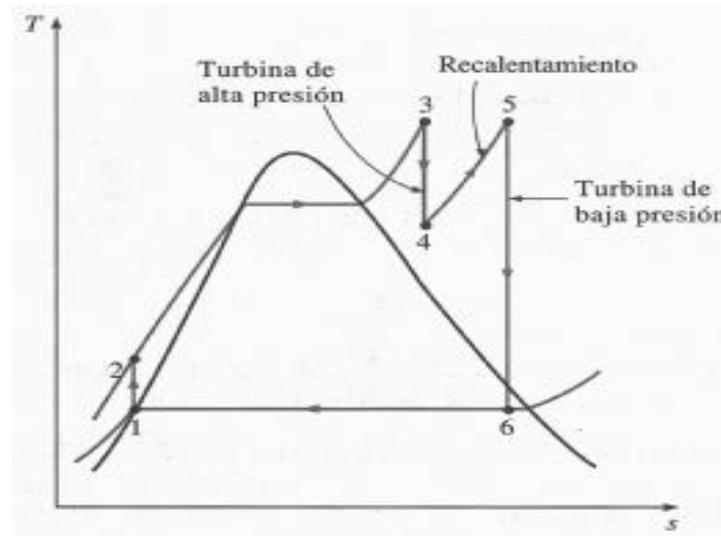
Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL CON RECALENTAMIENTO

Diagrama T-s



Rendimiento térmico

$$\eta_t = \frac{W_{T\ alta} + W_{T\ baja} - W_B}{q_{cal} + q_{recal}} \Rightarrow \frac{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) - w_B}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Características y Componentes

Descripción de turbinas con etapas múltiples

Análisis energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

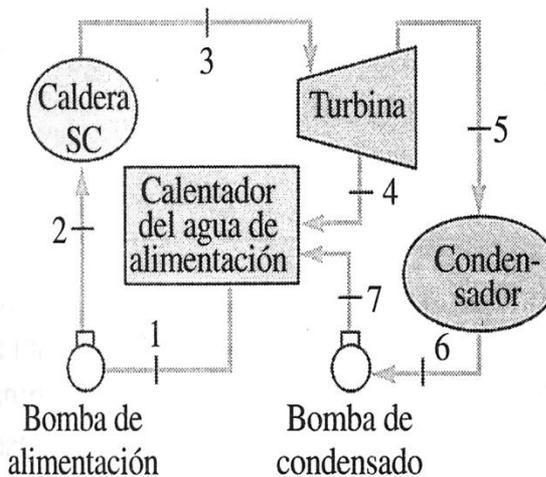
Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL REGENERATIVO

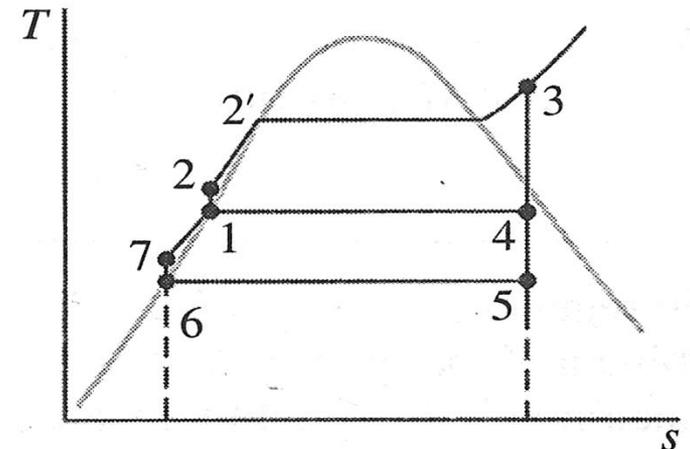
Análisis energético del ciclo para Calentadores Abiertos



$$w_{T,sal} = \frac{\dot{W}_{T,sal}}{\dot{m}_1} = 1(h_3 - h_4) + (1 - y_4)(h_4 - h_5)$$

$$w_{B,cond} = v_{f,6}(P_7 - P_6) \quad s_6 = s_7$$

Diagrama T-s



Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Calentadores Abiertos

Análisis energético

Diagrama T-s

Flujo másico

Calentadores Cerrados

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL REGENERATIVO

Flujo másico a través de Calentadores Abiertos

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal} \Rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$$

$$\sum \dot{m}_{ent} h_{ent} = \sum \dot{m}_{sal} h_{sal} \Rightarrow \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7$$

Eliminando \dot{m}_7 al combinar estas dos ecuaciones:

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_4 h_4 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_4) h_7$$

Dividiendo todo entre \dot{m}_1

$$h_1 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1} h_4 + \left(1 - \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1}\right) h_7$$

Si \dot{m}_4/\dot{m}_1 , se representa por y_4 , entonces:

$$1(h_1) = y_4 h_4 + (1 - y_4) h_7$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Calentadores Abiertos

Análisis energético

Diagrama T-s

Flujo másico

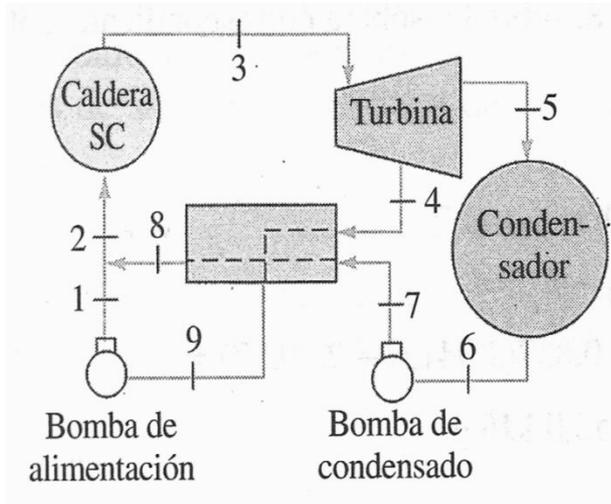
Calentadores Cerrados

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL REGENERATIVO

Análisis energético del ciclo para Calentadores Cerrados

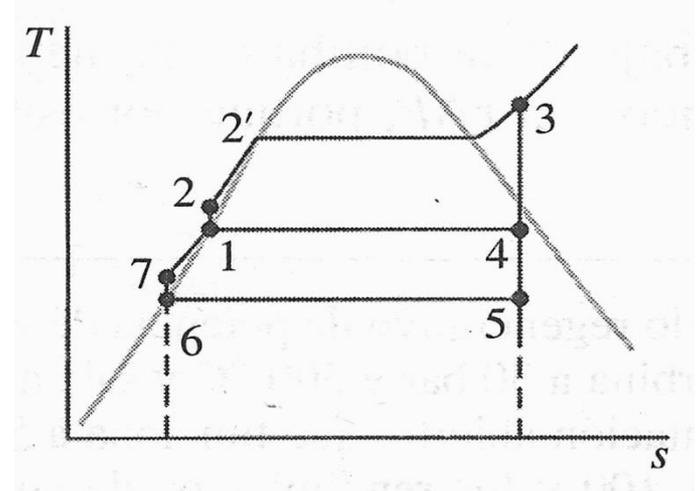


$$w_{T,sal} = \frac{\dot{W}_{T,sal}}{\dot{m}_1} = 1(h_3 - h_4) + (1 - y_4)(h_4 - h_5)$$

$$w_{B,ali} = v_{f,9}(P_1 - P_9)y_4 \quad s_1 = s_9$$

$$w_{B,ent,cond} = v(P_7 - P_6)(1 - y_4)$$

Diagrama T-s



Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Calentadores Cerrados

Análisis energético

Diagrama T-s

Flujo másico

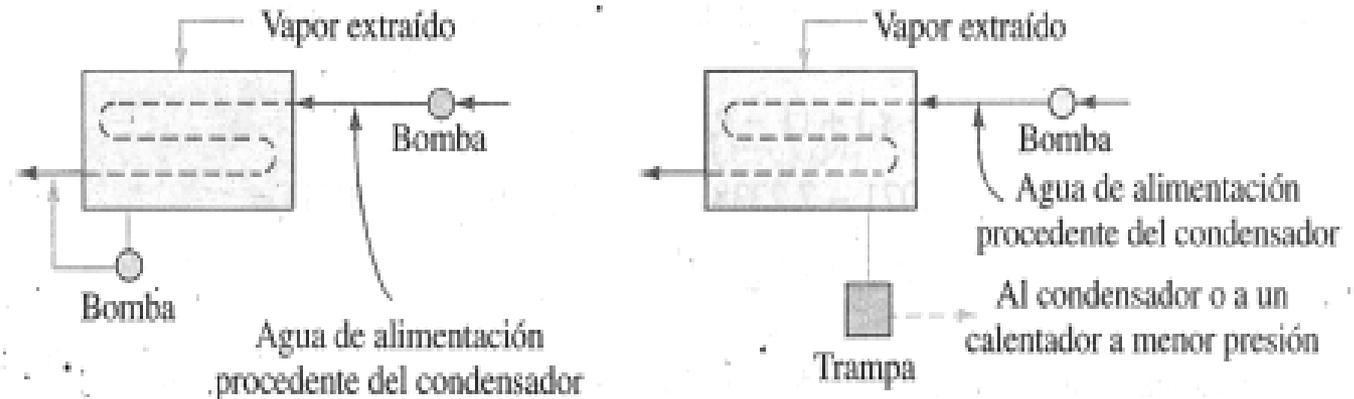
Rendimiento Térmico

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO RANKINE IDEAL REGENERATIVO

Flujo másico a través de Calentadores Cerrados



Para régimen estacionario queda:

$$0 = (\dot{m} \Delta h)_{extr} + (\dot{m} \Delta h)_{alim}$$

Rendimiento térmico

$$\eta_t = \frac{w_{T alta} + w_{T baja} - w_B}{q_{cal} + q_{reca l}}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Calentadores Cerrados

Análisis energético

Diagrama T-s

Flujo másico

Rendimiento Térmico

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

CICLO COMBINADOS GAS-VAPOR

Análisis Energético de un ciclo combinado

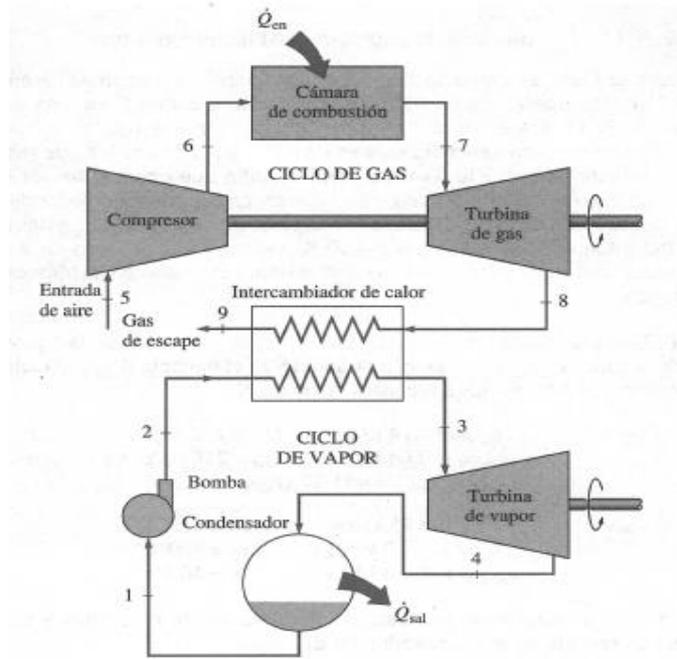
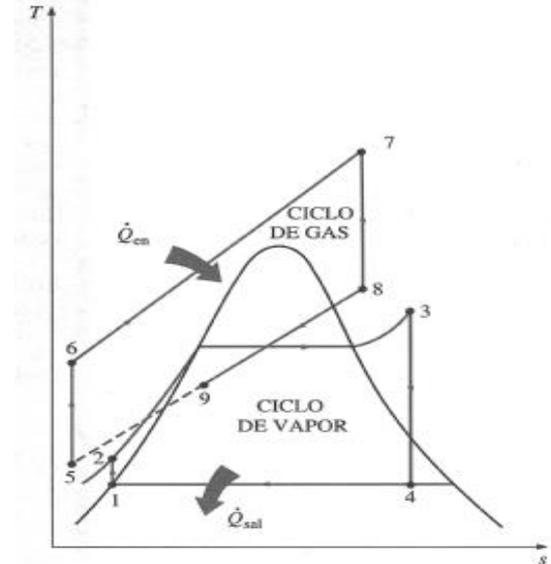


Diagrama T-S



$$\eta_{t,comb} = \frac{\dot{W}_{gas,sal} + \dot{W}_{vapor,sal}}{\dot{Q}_{gas,ent}} = \frac{\dot{m}_{gas} w_{gas,sal} + \dot{m}_{vapor,sal} w_{vapor,sal}}{\dot{m}_{gas} q_{gas,ent}}$$

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Análisis energético

Diagrama T-s

Rendimiento Térmico

Conclusiones

CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR

Introducción

Ciclo de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Conclusiones

Conclusiones

Entre sus aplicaciones se encuentran:

- 1. Producción de potencia en naves espaciales, utilizando ciclos de vapor binarios que utilicen metales alcalinos como lo son el potasio, el sodio y la mezcla de ambos.*
- 2. La conversión de energía geotérmica (energía que la naturaleza almacena en la tierra) en energía eléctrica.*
- 3. Conversión de energía térmica oceánica: se origina con el fin de utilizar motores térmicos que funcionasen entre fuentes térmicas con diferencias de temperaturas pequeñas.*
- 4. Son sistemas de generación de potencia por medio del vapor, que siguen siendo los responsables de mas de la mitad de la energía eléctrica que se produce en el mundo.*

CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR

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.**

Introducción

Ciclos de Potencia de Carnot

Ciclo Rankine ideal.

Influencia de la Presión y la Temperatura.

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Ciclo Rankine con Recalentamiento

Ciclo Rankine ideal Regenerativo

Ciclo Combinado Gas-Vapor

Referencias bibliográficas