

# ESTUDIO DEL CICLO DE RANKINE

## 1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de Rankine es el ciclo ideal que sirve de base al funcionamiento de las centrales térmicas con turbinas de vapor, las cuales producen actualmente la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo. La evolución de las centrales térmicas ha estado condicionada por la búsqueda de mejoras en el rendimiento térmico del ciclo termodinámico, ya que incluso pequeñas mejoras en el rendimiento significan grandes ahorros en los requerimientos del combustible. La idea básica detrás de todas las modificaciones para incrementar el rendimiento de un ciclo de potencia es aumentar la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la cual el fluido de trabajo cede calor al condensador. Vamos a analizar en esta práctica, por medio del programa informático CYCLEPAD las diferentes maneras de lograr este objetivo con el ciclo de Rankine.

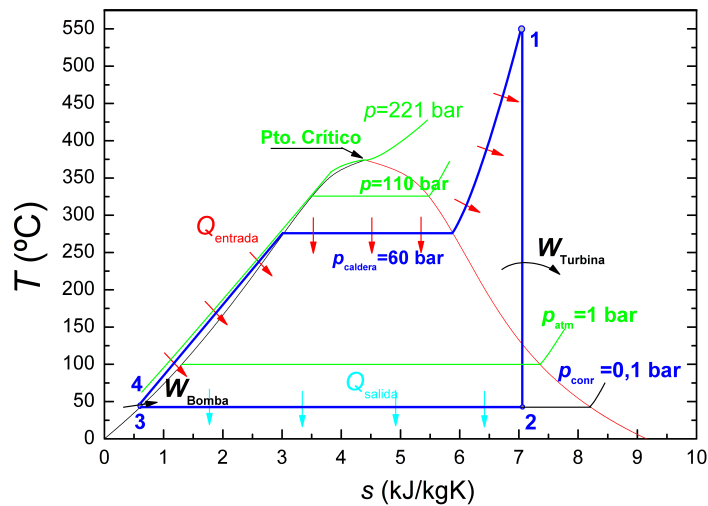


Figura 1: Diagrama  $T - s$  del ciclo Rankine

## 2. ESTUDIO DEL CICLO DE RANKINE SIMPLE

### 2.1. Configuración inicial

Inicialmente consideraremos en la instalación bombas y turbinas ideales, para posteriormente analizar el efecto de las irreversibilidades sobre el funcionamiento de la planta.

Diseñe inicialmente el esquema de la planta con sus componentes: caldera, turbina, bomba y condensador. Suponer las siguientes características de trabajo de los dispositivos: Turbina y bomba son isoentrópicos; condensador y caldera son isobáricos.

Comenzaremos por las tres formas de aumentar el rendimiento en un ciclo de Rankine simple.

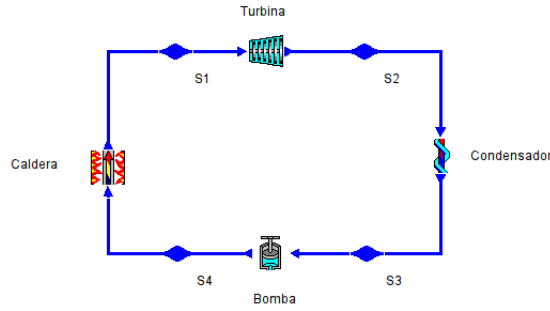


Figura 2: Ciclo de Rankine simple en CYCLEPAD

## 2.2. Reducción de la presión en el condensador

El vapor existe como mezcla saturada en el condensador a la temperatura de saturación correspondiente a la presión dentro del condensador. Por consiguiente, la reducción de la presión de operación del condensador reduce automáticamente la temperatura del vapor y, en consecuencia, la temperatura a la cual cede el calor de desecho. Lógicamente existe un límite inferior en la presión del condensador que puede usarse: no puede ser inferior a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del medio refrigerativo.

Para estudiar la influencia de la presión del condensador en el rendimiento del ciclo de Rankine, vamos a variar la presión de entrada al condensador desde **0.1 bar** hasta **1.0 bar**, en intervalos de 0.1 bar, dejando fijo los valores de entrada a la turbina según la siguiente tabla:

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	460	480	500	520	540	560	580	440	420	410
$p$ (bar)	150	145	140	135	130	125	120	155	160	165

1. Elaborar una tabla con los valores de la presión en el condensador, el rendimiento térmico y el título de vapor a la salida de la turbina.
2. Represente el rendimiento térmico del ciclo frente a la presión en el condensador. ¿Qué mejora del rendimiento se ha obtenido? ¿A qué temperatura sale el vapor de la turbina en el caso óptimo?
3. Suponiendo que la temperatura de un río disponible donde verter el calor de desecho es de  $10^{\circ}\text{C}$  ¿Cuál es la presión mínima con la que se podría operar en el condensador?
4. Represente la calidad del vapor a la salida de la turbina frente a la presión en el condensador. ¿Qué efecto tiene la reducción de la presión en el condensador sobre la calidad del vapor a la salida de la turbina? ¿Es un efecto deseable o indeseable?

## 2.3. Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas

El sobrecalentamiento del vapor hasta altas temperaturas aumenta el rendimiento térmico del ciclo al aumentar la temperatura promedio a la que se proporciona el calor. El sobrecalentamiento del vapor está limitado hasta un máximo de  $620^{\circ}\text{C}$  por consideraciones metalúrgicas, es decir, por la capacidad de los materiales para soportar altas temperaturas.

En este apartado analizaremos el ciclo de Rankine al variar la temperatura de entrada a la turbina desde **340 °C** hasta **620 °C** en intervalos de 40 °C. Los valores de la presión de la caldera y del condensador son fijos para cada grupo según la siguiente tabla:

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{caldera}$ (bar)	150	145	140	135	130	125	120	155	160	165
$p_{condensador}$ (bar)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

1. Elaborar una tabla con los valores de la temperatura de entrada a la turbina, el rendimiento térmico del ciclo y el título del vapor a la salida de la turbina.
2. Represente el rendimiento térmico del ciclo frente a la temperatura de entrada a la turbina. ¿Qué mejora del rendimiento se ha obtenido?
3. Represente la calidad del vapor a la salida de la turbina frente a la temperatura de entrada a la turbina. ¿Qué efecto tiene el sobrecalentamiento del vapor la calidad del vapor a la salida de la turbina? ¿Es un efecto deseable o indeseable?
4. Si se considera que los álabes de una turbina no toleran un vapor con calidad inferior al 90%, ¿a qué temperatura como mínimo hay que sobrecalentar el vapor en la caldera?

## 2.4. Incremento de la presión en la caldera

Si incrementa la presión de operación de la caldera, automáticamente se eleva la temperatura a la cual tiene lugar la ebullición. Esto produce un incremento de la temperatura promedio a la que se añade calor al vapor y de ese modo aumenta el rendimiento térmico del ciclo. Las presiones máximas de operación en las calderas han ido aumentando con el tiempo hasta alcanzar hoy día valores hipercríticos en torno a los 30 MPa.

En este apartado analizaremos el ciclo de Rankine al variar la presión de la caldera  $p_{caldera} = 5, 10, 30, 50, 75, 100, 150, 190$  y **210 bar**. Los valores de la temperatura del vapor a la entrada de la turbina y de la presión del condensador son fijos para cada grupo según la siguiente tabla:

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T$ (°C)	460	480	500	520	540	560	580	440	420	410
$p_{condensador}$ (bar)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

1. Elaborar una tabla con los valores de la presión de la caldera, el rendimiento térmico del ciclo y el título del vapor a la salida de la turbina.
2. Represente el rendimiento térmico del ciclo frente a la presión de la caldera. ¿Qué mejora del rendimiento se ha obtenido?
3. Represente la calidad del vapor a la salida de la turbina frente a la presión en la caldera. ¿Qué efecto tiene el sobrecalentamiento del vapor la calidad del vapor a la salida de la turbina? ¿Es un efecto deseable o indeseable?
4. ¿Cuál de los tres procedimientos analizados anteriormente permite una mayor variabilidad del rendimiento térmico? ¿Qué valores de la presión en la caldera, en el condensador y de la temperatura del vapor vivo elegiría para operar la planta con máximo rendimiento?

### 3. ESTUDIO DEL RENDIMIENTO DEL CICLO DE RANKINE CON RECALENTAMIENTO

Hemos comprobado que la mejora del rendimiento asociada con presiones más altas en la caldera trae consigo un efecto colateral indeseable de un contenido de humedad excesivo en el vapor a la salida de la turbina. ¿Cómo resolver este problema? Una solución consiste en expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre ellas. Lo más usual es que el recalentamiento tenga lugar hasta la temperatura de entrada de la primera etapa de la turbina.

El rendimiento de un ciclo de Rankine con recalentamiento aumenta conforme se incrementa el número de etapas de expansión y recalentamiento. Sin embargo, la mejora que introduce un segundo recalentamiento es aproximadamente la mitad de la que introduce un tercer recalentamiento, y la de un tercero la mitad de la que se alcanza con el segundo. Esto hace que el empleo de más de dos etapas de recalentamiento no sea práctico, ya que para más etapas la ganancia tan pequeña no compensa el coste y la complejidad de la instalación.

Consideremos un ciclo en donde el vapor entra a las dos etapas de la turbina a **550 °C** y cuyas presiones máxima y mínima sean las de la siguiente tabla:

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{caldera}$ (bar)	150	145	140	135	130	125	120	155	160	165
$p_{condensador}$ (bar)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

1. Elaborar una tabla con los valores de la presión de recalentamiento ( $p_{rec} = \mathbf{1.5, 5, 8, 15, 20, 28, 35, 40, 60, 80, 100, 110 \text{ bar}}$ ), el rendimiento térmico del ciclo, el título del vapor a la salida de la turbina de alta presión y el título de vapor a la salida de la turbina de baja presión.
2. Represente el rendimiento térmico del ciclo frente a la presión de recalentamiento. ¿Cuál es la presión óptima de recalentamiento? ¿qué proporción representa esta presión respecto a la presión de la caldera? ¿a qué temperatura se extraería el vapor para el recalentamiento?
3. Represente la calidad del vapor a la salida de la turbina de baja presión frente a la presión de recalentamiento. ¿Se mantiene la calidad del vapor en valores aceptables a la presión óptima de recalentamiento?
4. A partir del título del vapor a la salida de la T.A.P. ¿cuál sería el límite inferior para la presión de recalentamiento?
5. Compare el ciclo óptimo de recalentamiento con un ciclo de Rankine simple con los mismos parámetros a la entrada y salida de la turbina. ¿Qué mejoras en el rendimiento y la calidad del vapor supone introducir el recalentamiento?

### 4. ESTUDIO DEL RENDIMIENTO DEL CICLO DE RANKINE REGENERATIVO

Un examen cuidadoso del ciclo de Rankine revela que otro punto mejorable es el hecho de que el agua de alimentación que sale de la bomba entra en la caldera a una temperatura relativamente baja. Una solución sería comprimir más el agua hasta alcanzar una temperatura más elevada, pero las altas presiones que esto requeriría hacen que esta solución sea poco práctica. La solución habitual consiste en extraer o sangrar vapor de la turbina en diversos puntos. Este vapor que

podría haber producido más trabajo si hubiera continuado su expansión en la turbina, se utiliza para calentar el agua de alimentación en un dispositivo llamado *regenerador*. La fracción de vapor enviada al regenerador se ajusta automáticamente para cada valor de la presión de extracción, de forma que el vapor salga del regenerador como líquido saturado.

Supongamos que el vapor entra a la turbina a **550 °C** y las presiones de la caldera y del condensador vienen dadas por la siguiente tabla:

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{caldera}$ (bar)	150	145	140	135	130	125	120	155	160	165
$p_{condensador}$ (bar)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

1. Elaborar una tabla con los valores de la presión de regeneración ( $p_{reg} = \mathbf{1.5, 5, 8, 15, 20, 28, 35, 40, 60, 80, 100, 110 \text{ bar}}$ ) el rendimiento térmico del ciclo y el título del vapor a la salida de la turbina.
2. Represente el rendimiento térmico del ciclo frente a la presión de extracción. ¿Cuál es la presión óptima de extracción? ¿a qué temperatura se purga el vapor?
3. Represente la calidad del vapor a la salida de la turbina frente a la presión de recalentamiento. ¿Se mantiene la calidad del vapor en valores aceptables a la presión óptima de recalentamiento?
4. Compare el ciclo óptimo de recalentamiento con un ciclo de Rankine simple con los mismos parámetros a la entrada y salida de la turbina. ¿Qué mejoras en el rendimiento y la calidad del vapor supone introducir la regeneración?