

**JULIO BIANCHINI**  
**E**  
**FERNANDO SANTANA**

**Mayor Eficiencia Energética con Menos Combustible**  
**Ciclo Rankine x Ciclo Rankine Regenerativo**

**Veracruz**  
**2015**

## Lista de Figuras

Figura 01 – Ciclo Rankine.....	02
Figura 02 – Ciclo Rankine Regenerativo. ....	02
Figura 03 – Ciclo Rankine – Calderas.....	03
Figura 04 – Ciclo Rankine.....	04
Figura 05 – Ciclo Rankine Regenerativo.....	04
Figura 06 – Ciclo Rankine Regenerativo – Ingenio Convencional.....	04
Figura 07 – Ciclo Rankine Regenerativo – Ingenio Eficiente.....	05
Figura 08 – Comparativo Entalpia__.....	06
Figura 09 – Comparativo Tomadas Vapor.....	07
Figura 10 – Comparativo Ciclo Rankine Convencional x Regenerativo.....	10

## **Resumo**

La idea principal es mostrar como la relación entre presión y la temperatura puede mejorar los beneficios y la eficiencia del generador de turbina de vapor y cuando es posible, mejorar más esta eficiencia, cuando podemos utilizar un ciclo regenerativo, para ahorrar combustible y aumentar la ganancia

Siguiendo siempre en la búsqueda de un mejor desarrollo de soluciones con mayores ganancias financieras para las empresas, menor impacto ambiental y un mejor uso de los recursos disponibles, cada vez más, las empresas de tecnología que fabrican equipos destinados a la generación de energía utilizando vapor generado a través de los ciclos disponibles, tratan de mejorar y cada vez incrementar la eficiencia de todo el conjunto de equipos utilizados en el proceso productivo de la planta. Conocer la mejor relación entre la presión y la temperatura del vapor utilizado como fuerza motriz para las turbinas, se ha demostrado ser muy importante para la elección perfecta del conjunto de equipo para ser utilizado. Estos avances, proporcionan a las empresas, seguir firmes y fuertes en el camino del desarrollo sostenible y la garantía de los artículos más preciados en el desarrollo de la raza humana hasta nuestros días: la electricidad. Por eso, el uso de turbinas de vapor de reacción y el uso de la tecnología de ciclo combinado, cuando sea posible, ha demostrado ser soluciones cada vez más eficaces en la búsqueda de una mayor eficiencia.

Palabras Clave: Generación. Energía. Vapor.

## **Abstract**

The main idea is to show how the relation between pressure and temperature can improve can improve the profits and efficiency of the Steam Turbine Generator and when is possible to improve this efficiency and when it is possible to use a Regenerative Cycle to save fuel and increase the gain.

Always following the search for a better development of profitable solutions for companies, a lower environmental impact and the better use of available resources, ever more, technology companies that manufacture equipment for power generation using steam generated through the available cycles, keeping try to improve more and more the efficiency of the entire set of equipment used in the production process of the plant. Knowing the best relationship between pressure and temperature of the steam used as motive power for turbines, it has proven to be very important for the right choice of the set of equipment to be used, in order to have the best solution. These advances provide companies, stay firm and strong on the road of sustainable development and the guarantee of the most precious in the development of the human race items to this day: electricity. Therefore, the use of steam turbines of reaction and the use of regenerative cycle technology, when is possible, has proved increasingly effective solutions in the search for greater efficiency.

Key words: Generation, Energy, Steam

**Indice:**

Listado de Figuras.....i

Resumo.....ii

Abstract.....iii

1 – Introducción..... 1

1.1 - Mayor Eficiencia Energética con Menos Combustible.....1

2 – Método.....2

2.1 - Ciclo del Vapor – Rankine.....2

2.2 - Ciclo Rankine Regenerativo.....2

2.3 - Equipos – Caldera .....3

2.4 - Equipos – Turbinas .....4

2.5 – Equipos Auxiliares del Ciclo de Vapor .....5

2.5.1 - Condensadores.....5

2.5.2 - Calentadores Regenerativos.....5

2.5.3 - Desaieradores.....5

2.5.4 - Torres de Enfriamiento .....5

2.5.5 - Precalentador.....6

3 – Resultados .....6

4 – Discusión.....7

5 – Conclusiones.....8

6 – Referencias Bibliográficas.....8

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - Mayor Eficiencia Energética con Menos Combustible

Conocido en los procesos industriales, el ciclo de Rankine se utiliza para generar electricidad o cogenerar energía a través de turbinas de vapor. El accionamiento de la turbina se produce por la expansión de vapor de alta presión procedente de un generador de vapor. Esta expansión se transforma primero en energía cinética y luego en energía mecánica, conduciendo el eje del generador de energía para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. El vapor que abandona la turbina puede ser utilizada en un proceso industrial cuando se necesita la energía térmica, o puede ser condensado y se devuelve a la caldera.

En la búsqueda de una mayor eficiencia en el ciclo de Rankine, el condensado vuelve a la caldera puede calentarse en precalentadores alimentados por el vapor extraído de las turbinas de varias tomas. Este concepto se denomina **Ciclo Regenerativo**.

Su principal efecto se puede explicar tanto con base en la reducción del flujo de vapor que llega al condensador y la reducción de las pérdidas correspondientes en la fuente de frío, como el aumento de temperatura promedio termodinámica de suministro de calor al ciclo.

Entre los factores que influyen en el rendimiento del ciclo, hay que destacar la temperatura del agua de alimentación de caldera. Con el agua pre-calentada, hay una disminución en el volumen de combustible que se consume para "calentar" el agua para producir la misma cantidad de vapor.

Con esto, llegamos a tres condiciones de funcionamiento de la planta:

Primero - Mantener la misma cantidad de combustible: Con el agua de alimentación de calderas "pre-calentada", la misma cantidad de combustible, logra generar más vapor y por lo tanto más energía. En esta condición, la caldera tendría un flujo mayor y una turbina de mayor potencia.

Segundo - Manteniendo de la misma generación de vapor: Generando la misma cantidad de vapor, la cantidad de combustible consumido en el agua de la caldera "pre-calentado" se reduce considerablemente, pero la capacidad de energía generada también disminuye debido a las tomas en la turbina de vapor. Esta condición se vuelve interesante para la generación de energía para un período más largo debido a la economía de combustible.

Tercero - Manteniendo Electricidad generación: Manteniendo la generación de electricidad con un mayor consumo de vapor en la turbina, debido a la tomada, pero la cantidad de combustible consumido en la caldera es menor, lo que resulta en la eficiencia del ciclo superior.

La máxima eficiencia característica para los números de tomas y de precalentadores, puede ser explicado como sigue: el aumento de la temperatura del agua de alimentación se obtiene por tomas en la turbina en las etapas con una mayor presión, que al mismo tiempo reduce la potencia que se generaría por ese vapor purgado.

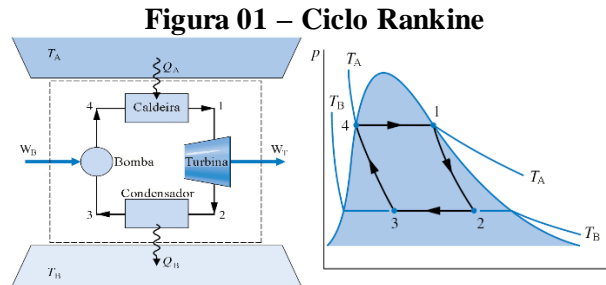
Como el aumento del número de extracciones (tomas y precalentador) en un sistema de ciclo regenerativo, el valor de la entalpía del agua de alimentación que corresponde a la máxima eficiencia energética del ciclo se incrementa. El número óptimo de calentadores de agua de alimentación se determina a partir de consideraciones económicas.

Esta tecnología se puede aplicar no sólo a las nuevas instalaciones, sino también para las unidades existentes, que a menudo se encuentran en su máxima producción con baja eficiencia, lo que resulta en la necesidad de la optimización de los equipos existentes, o mejora de diseño ciclo de generación de energía.

## 2 – MÉTODO

### 2.1 - Ciclo del Vapor – Rankine

El ciclo de Rankine describe el funcionamiento de la turbina de vapor que se encuentra comúnmente en las plantas de producción de energía. Hay cuatro fases en un ciclo Rankine:

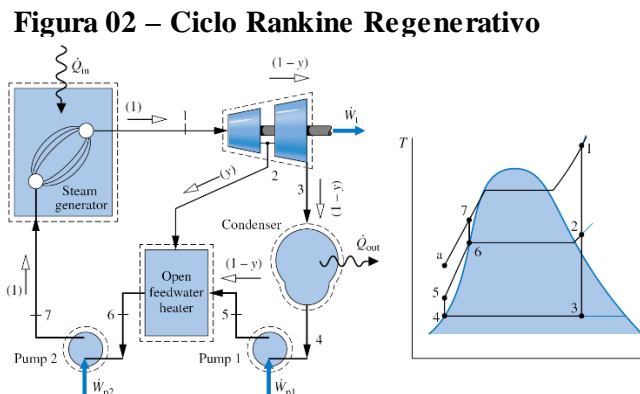


- Paso 3-4 Compresión: El fluido se bombea desde una baja presión hasta una alta presión utilizando una bomba. El bombeo requiere energía.
- Paso 4-1 Transferencia de calor isobárica: El fluido presurizado entra en la caldera, donde se calienta a una presión constante hasta que se convierte en vapor sobrecalentado.
- Paso 1-2 Expansión: El vapor sobrecalentado se expande a través de una turbina para generar trabajo. Idealmente, esta expansión es isoentrópica. En esta expansión, se reducen tanto la presión y la temperatura.
- Paso 2-3 Transferencia de calor: El vapor entra entonces en un condensador donde se enfría y cambia para la fase líquida. Este líquido vuelve entonces a la bomba y el ciclo se repite.

### 2.2 - Ciclo Rankine Regenerativo

Se caracteriza por el precalentamiento del condensado antes de entrar en la caldera.

El ciclo Rankine regenerativo se denomina de esta manera pues, el fluido (agua) será recalentado por el vapor de la sangría de la turbina, después de salir del condensador hasta la entrada en la caldera. Esto incrementa la temperatura media del fluido circulante (agua), lo que aumenta la eficiencia termodinámica del ciclo.

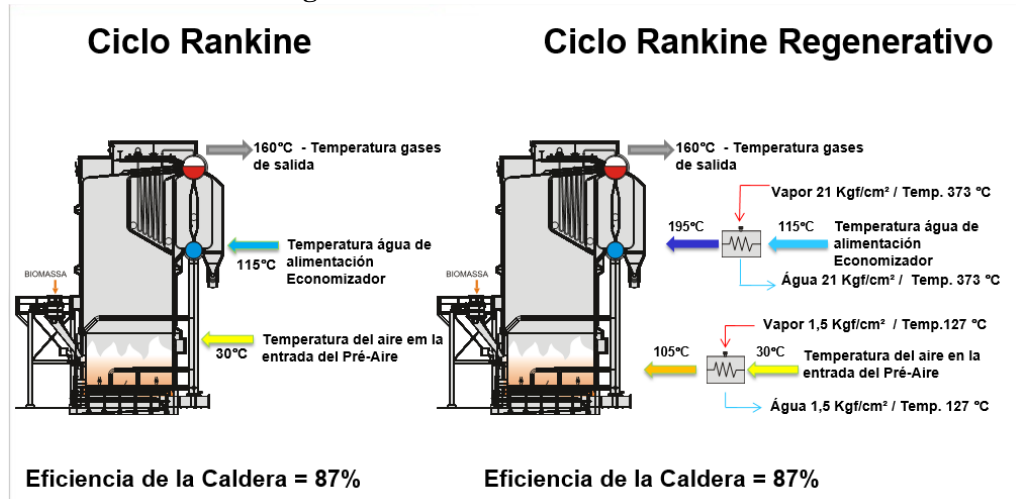


Su principal efecto puede explicarse con base en la reducción del flujo de vapor que alcanza el

condensador, y por la reducción de las pérdidas correspondientes en la fuente fría (torres de enfriamiento), o por el aumento de la temperatura media del agua de retorno a la caldera.

### 2.3 - Equipos – Caldera

Figura 03 - Ciclo Rankine - Calderas



Mismo aumentando la relación vapor/combustible, la Eficiencia de la caldera prácticamente no se cambia. Esto se debe a:

$$\eta_{\text{Caldera}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7)$$

Donde:

q<sub>2</sub>: la pérdida de calor por los gases de escape - cuanto mayor sea la temperatura del gas, mayor es la pérdida, porque se está recuperando menos energía transmitida por los gases.

q<sub>3</sub>: la pérdida de calor por la combustión incompleta química - se considera como cero, ya que normalmente funciona con un exceso de aire en el balanceo estequiométrico en equilibrio, asegurando una combustión completa.

q<sub>4</sub>: La pérdida de calor por la combustión mecánica incompleta - se relaciona con la cantidad de no quemado en la caldera, es decir, la calidad del combustible.

q<sub>5</sub>: La pérdida de calor a través de superficies de radiación y de convección.

q<sub>6</sub>: La pérdida de calor debido a las cenizas - energía transmitida que se gasta para calentar las cenizas.

q<sub>7</sub>: La pérdida de calor a través de la toma de la caldera - está relacionado con la pérdida debida a la purga.



## 2.4 - Equipos – Turbinas

Figura 04 – Ciclo Rankine

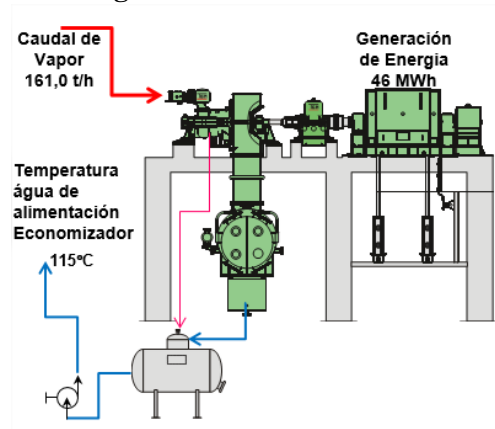


Figura 05 – Ciclo Rankine Regenerativo

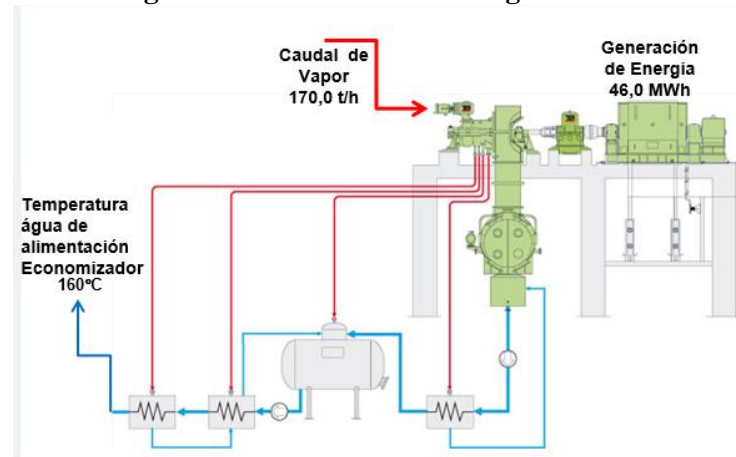
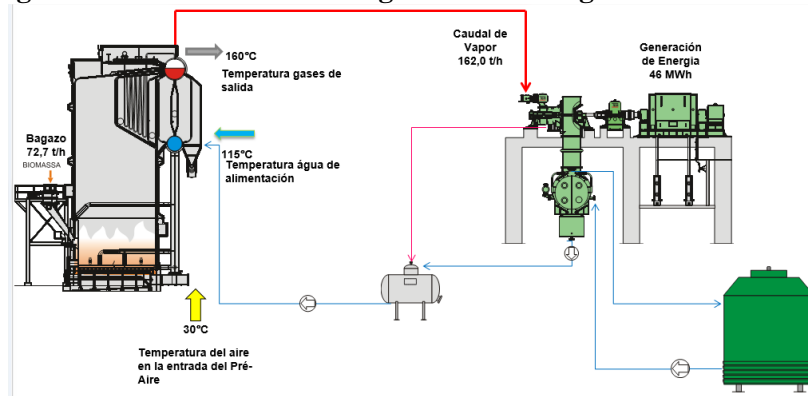
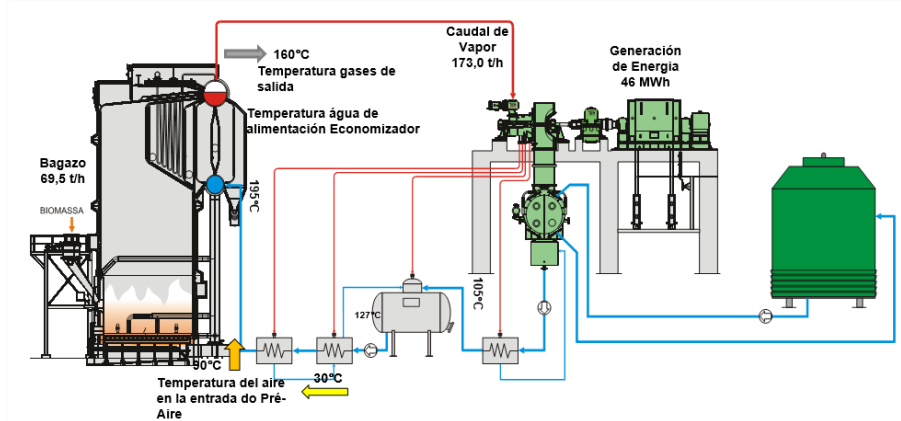


Figura 06 – Ciclo Rankine Regenerativo – Ingenio Convencional



**Figura 07 – Ciclo Rankine Regenerativo – Ingenio Eficiente**



## 2.5 – Equipos Auxiliares del Ciclo de Vapor

### 2.5.1 - Condensadores

Intercambiador de calor utilizado para la conversión del vapor de escape de la turbina al estado líquido

### 2.5.2 - Calentadores Regenerativos

Calentador de Mezcla – El calentamiento del agua se lleva a cabo por contacto directo con el vapor.

En estos tipos de calentadores, el agua se calienta a la temperatura de saturación del vapor de agua, y el potencial de vapor se utiliza de manera más eficiente. Tiene las ventajas de ser simple, barato y tienen buenas características de transferencia de calor.

La desventaja es la necesidad de una bomba después de cada calentador que reduce la confiabilidad y aumenta el consumo de energía. La presión del agua fría y del vapor que sale de la turbina debe ser la misma.

Calentamiento de Superficie - el intercambio de calor ocurre a través de las paredes de los tubos de un intercambiador de calor. En este caso, el agua circula dentro de los tubos y el vapor por fuera (carcasa).

Tiene la ventaja de no requerir una bomba en cada calentador, ya que la presión es diferente.

La desventaja es la complejidad (red de tubería interna), es más caro y más bajo en rendimiento de transferencia de calor, ya que los dos fluidos no están en contacto.

Normalmente las plantas utilizan una combinación con Calentadores de mezcla y de Superficie.

### 2.5.3 - Desaireadores

Remoción de los gases disueltos en el agua ( $O_2$  e  $CO_2$ ). La presencia de estos gases en forma de solución es la causa de la corrosión interna de las áreas de equipos de energía (balón separador de humedad, los tubos de los economizadores).

Además de la desaireación también tiene las siguientes funciones:

- Calentamiento regenerativo del condensado;
- Crear una reserva de agua en el sistema, suficiente para 5 a 20 minutos de operación de la central térmica con carga máxima.

### 2.5.4 - Torres de Enfriamiento

Elemento característico de los sistemas de refrigeración de agua en ciclo cerrado.

Función: bajar la temperatura del agua en circulación, incorporando lo otra vez al circuito de refrigeración del condensador

**2.5.5 - Precalentador**

Intercambiador de calor para calentar el agua antes de la entrada en la caldera. El vapor extraído de la turbina se condensa en el intercambiador de calor y el líquido regresa al ciclo.

**3 - RESULTADOS**

El calentamiento regenerativo aumenta considerablemente el rendimiento del ciclo de vapor, por esta razón es utilizado en los proyectos de las plantas termoeléctricas. La decisión sobre la temperatura de calentamiento del agua de alimentación de la caldera se basa en un análisis técnico económico, teniendo en cuenta el aumento de la eficiencia del ciclo y el costo de los calentadores. Para una planta termoeléctrica de cogeneración (con proceso), la temperatura final del agua de alimentación generalmente se establece en el rango desde 160 hasta 180 °C. Para grandes termoeléctricas, esta temperatura está arriba de 225°C.

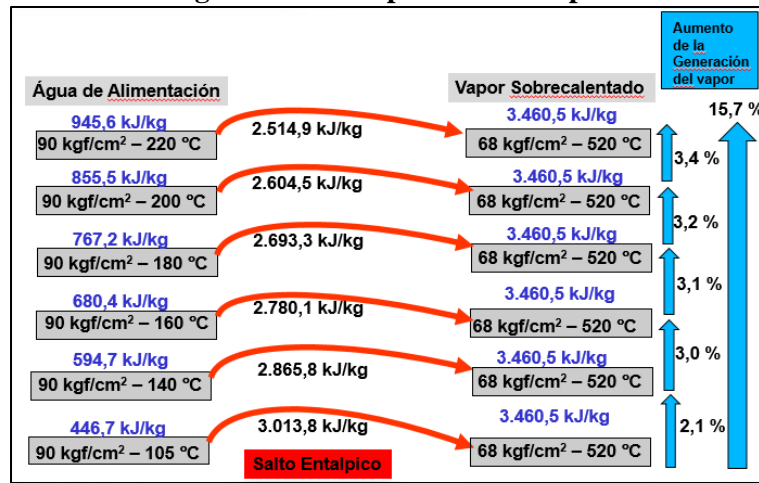
El número óptimo de tomas de vapor en la turbina es determinado en los balances del ciclo térmico. Esta especificación se realiza en conjunto con el proveedor de la caldera, para asegurar la eficiencia del ciclo. En este aspecto no hay una fórmula estándar, sólo los estudios individuales y específicos que determinarán la mejor solución para la planta.

Con el ciclo regenerativo, la economía de combustible es alrededor de 10 a 15%, para una misma producción de vapor.

La ganancia en generación de energía eléctrica es de 3 al 7%

La eficiencia del ciclo se incrementa desde el 25% al 35%

**Figura 08 – Comparativo Entalpia**



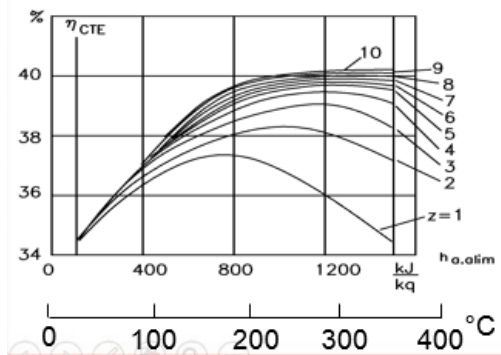
En la medida que se aumenta el número de tomas (y de precalentadores) en un ciclo de calentamiento regenerativo, se aumenta también la entalpía del agua de alimentación.

La máxima característica en la eficiencia para el número de tomas (y precalentadores) puede ser explicado como: el aumento de la temperatura del agua de alimentación se obtiene aumentando el flujo de vapor a través de los puntos de tomas, lo que disminuye simultáneamente el trabajo total realizado por el vapor en la turbina.

Los datos correspondientes a una instalación de acuerdo a la figura 09:

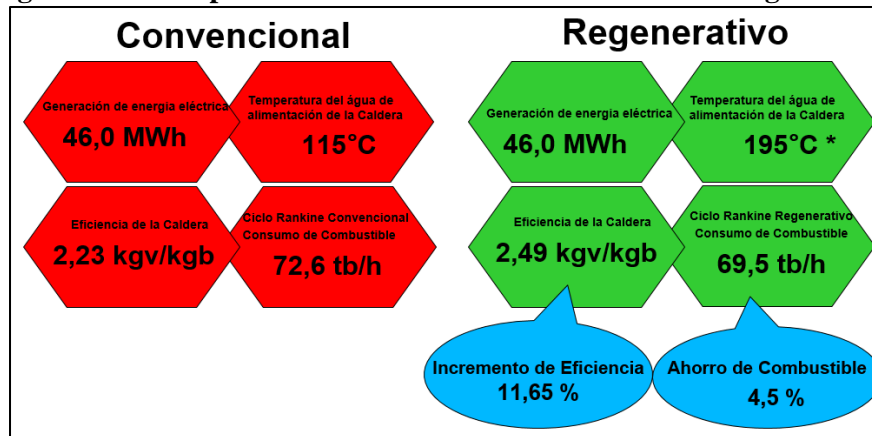
$p_0 = 120 \text{ Bar(a)}$ ,  $t_0 = 535^\circ\text{C}$  e  $p_{\text{cond}} = 0,10 \text{ Bar(a)}$

**Figura 09 – Comparativo Tomadas Vapor**



El número óptimo de precalentadores de agua de alimentación se determina a partir de consideraciones económicas. Se puede añadir un precalentador, pero con un número mayor de precalentadores es posible acercarse a la eficiencia de Carnot, pero con un costo más elevado. La Figura 10 explica el ahorro de Combustible y el incremento de eficiencia:

**Figura 10 – Comparativo Ciclo Rankine Convencional x Regenerativo**



## 4 - DISCUSIÓN

### 4.1 - Ciclo Regenerativo – Por qué utilizarlo?

En virtud de la segunda ley de la termodinámica, parte del calor absorbido para la producción de trabajo útil se pierde. En los ciclos de generación de energía, parte de esta pérdida se da en las torres de enfriamiento. Esta energía no regresa al ciclo, por lo que es una pérdida irreversible.

Normalmente estas plantas consumen combustibles fósiles (gas natural, fuel oil, carbón) que tienen costo significativo.

En los Ingenios Azucareros, durante la zafra, se usa el retorno del condensado de vapor del proceso ( $90^{\circ}$  -  $95^{\circ}C$ ) como agua de alimentación de la Caldera. En el período de no zafra estas fuentes de calor no están disponibles. Así que para aumentar la eficiencia del ciclo se utiliza ciclo regenerativo ampliamente utilizado en grandes plantas termeléctricas.

En general las calderas están dimensionadas para recibir agua de alimentación con temperatura alrededor de  $110^{\circ}C$  /  $120^{\circ}C$ , sin embargo, en ciclo de condensación la temperatura del condensado es alrededor de  $45$  a  $50^{\circ}C$ .

El Ciclo Regenerativo permite que el calentamiento del condensado sea durante su retorno a la caldera. Cuánto más estaciones precalentadoras mayor será la temperatura del condensado.

El calentamiento se dá a partir de tomas (sangrias) no controladas en diferentes etapas de la turbina. Normalmente son 3 o 4 tomas para precalentadores y el desaireador.

El balance de energía debe hacerse en conjunto con el fabricante de la caldera.

## **05 – CONCLUSIONES**

Es la especificación en conjunto con el proveedor de la turbina y la caldera se asegurará la eficiencia esperada de esta configuración. En este aspecto no hay una fórmula estándar, sólo los estudios individuales y específicos determinarán la mejor solución para la planta.

La empresa que suministra el soporte para el cliente debe ser altamente calificada y estar lista para calcular y apoyar el cliente en la instalación de los Ciclos Regenerativos a través de soluciones de ingeniería, que realiza estudios de balances térmicos de las plantas a través del análisis detallado de toda la cadena de producción, sobre la base de los flujos de energía y herramientas especiales ciclo de cálculo. A partir de estos estudios, la compañía enumera las cantidades consumidas por el equipo y se presentan las ecuaciones de todas las pérdidas de energía, centrándose en una mayor eficiencia de la ganancia reconciliado ciclo de la energía.

No existe una fórmula estándar. Sólo con estudios de cada caso podemos determinar la mejor solución. Sin embargo, la decisión de modernizar o reemplazar el equipo existente, debe basarse en un análisis técnico económico, tales como:

- Análisis de las turbinas existentes. Posibilidad de instalación de tomada de vapor en etapas intermedias para el calentamiento del agua de alimentación y el aire de la combustión de la caldera;
- Análisis de las calderas existentes. Posibilidad de recibir aire / agua a temperaturas más alta.

## **6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Wisser, Wendell H; (2000); Energy resources: occurrence, production, conversion, use.
- Moran, Michael J.; Shapiro, Howard H.; (2013); Fundamentals of Engineering Thermodynamics.
- Wylen, Van; (2013); Fundamentos de la Termodinámica.