

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**DETERMINACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO A PARTIR  
DE LA RECUPERACIÓN DEL VAPOR CONDENSADO EN  
UNA FÁBRICA DE PAPEL *TISSUE***

Presentado por:

**Froylán Arturo Suárez Cabellos**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO FORESTAL

---

Lima - Perú  
2015

## *DEDICATORIA*

*A Dios, por estar conmigo a dondequiera que vaya (Josué 1:9).*

*A mis Padres, por su amor incondicional y apoyo constante.*

*A mi hija .V.X.S.A., por escogerme ser su ejemplo.*

*Al Sr. Esaú Pérez, a quién conozco desde niño, por mostrarte que con esfuerzo y constancia se puede seguir luchando; un ejemplo de vida.*

*A mis amistades, y a los que fueron, les agradezco el haberme aceptado en sus vidas.*

*A ti, que te llenas de preguntas sobre la vida: ¡disfruta del proceso!*

*#FuerzaCristal*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A los Ingenieros Jorge y Renato Reyes, dueños y Gerentes de Papelera Reyes S.A.C. por haber permitido realizar el presente estudio en las instalaciones de la mencionada fábrica. A todos los ingenieros, técnicos y operarios que me apoyaron durante todo el tiempo que estuve preguntando, indagando, molestando: ¡GRACIAS!*

*A mis Patrocinadores y miembros del Jurado, por su tiempo dedicado en revisar y corregir este humilde trabajo. Su confianza y el apoyo brindado desde el momento de presentado el proyecto me sirvieron para culminarlo.*

*A Manuel Caballero, quién me conoce desde siempre y no dudó en apoyarme con sus extensos conocimientos y experiencia en el mundo termodinámico.*

*A mis Padres, por todo el sudor, lágrimas y sangre dejados en el camino.*

*A Dios, por responderme cada pregunta formulada de la manera más maravillosa y perfecta: como él solo sabe hacerlo.*

## *RESUMEN*

Para la realización del presente estudio se tomó información histórica correspondiente al desempeño del caldero, máquina papelera y sistema de vapor durante 30 días de operación de una máquina papelera, en una fábrica de papel *tissue* ubicada en la provincia constitucional del Callao, Perú. El objetivo general fue determinar el ahorro energético del sistema de vapor con la recuperación del vapor condensado, el cual permitió realizar un análisis económico en el área de estudio. Primero, se realizó el análisis energético del sistema inicial de vapor, el cual se caracteriza por descargar el vapor condensado proveniente de la máquina papelera al tanque de alimentación del caldero y que ventea vapor *flash*, o instantáneo, a la atmósfera. Luego, se determinó el calor total generado por el sistema final de vapor, el cual reingresa el vapor condensado directamente al caldero. Para determinar la existencia de una diferencia significativa entre los calores totales generados por ambos sistemas se realizó la prueba de Wilcoxon para diferencia de medias relacionadas, determinándose una diferencia. Finalmente, se realizó un análisis económico del ahorro energético concluyendo que la cantidad de calor ahorrado en promedio es de  $6,82 \times 10^5$  de kJ/h representando un valor económico promedio de  $8,8 \times 10^4$  dólares/año. Este valor representa un ahorro del 19,87 por ciento en el consumo de gas natural para la producción de papel *tissue* y del 1,39 por ciento con respecto al costo total del mismo.

**Palabras claves:** Caldero, vapor *flash*, papel *tissue*.

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>II. Revisión de Literatura.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Proceso de fabricación de papel tissue .....</b>	<b>3</b>
1.1. Preparación de pasta .....	3
1.1.1. Desintegración .....	3
1.1.2. Depuración.....	4
1.1.3. Blanqueo.....	10
1.1.4. Refinación.....	10
1.2. Formación del papel.....	12
1.3. Prensado.....	12
1.4. Secado.....	13
1.5. Crepado.....	14
1.6. Bobinado.....	15
<b>2. Secado del papel .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Caldero .....</b>	<b>20</b>
3.1. Clasificación de los calderos.....	20
3.2. Rendimiento de un caldero.....	22
<b>4. Vapor de agua.....</b>	<b>23</b>
<b>5. Vapor <i>flash</i> y recuperación de vapor condensado .....</b>	<b>26</b>
<b>6. Entalpía .....</b>	<b>30</b>
<b>7. Balance de masa y energía .....</b>	<b>33</b>
7.1. Balance de masa.....	33
7.2. Balance de energía.....	33
7.3. Energía transportada por la masa.....	34
<b>8. Ahorros de energía en la industria papelera.....</b>	<b>36</b>
<b>III. Materiales y métodos .....</b>	<b>39</b>
<b>1. Lugar de estudio .....</b>	<b>39</b>
<b>2. Descripción de las actividades de la empresa .....</b>	<b>39</b>
<b>3. Materiales y equipos.....</b>	<b>40</b>
3.1. Materiales.....	40
3.2. Equipos.....	40
<b>4. Metodología .....</b>	<b>41</b>
4.1. Análisis energético.....	42
4.1.1. Análisis energético – sistema inicial de vapor .....	42
4.1.2. Análisis energético – sistema final de vapor .....	46
4.2. Análisis estadístico .....	51
4.2.1. Diseño experimental .....	51
4.2.2. Análisis estadístico.....	51
4.3. Análisis económico.....	52
<b>IV. Resultados y discusión.....</b>	<b>55</b>
<b>1. Características de los sistemas de vapor .....</b>	<b>55</b>
1.1. Características del sistema inicial de vapor.....	55
1.2. Características del sistema final de vapor .....	58
<b>2. Análisis estadístico.....</b>	<b>61</b>
<b>3. Análisis económico .....</b>	<b>64</b>

<b>V.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>69</b>
<b>VI.</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>71</b>
<b>VII.</b>	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>73</b>
<b>VIII.</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>81</b>

## *Índice de tablas*

	Página
Tabla 1 Pruebas de normalidad Kolmogorov - Smirnov .....	61
Tabla 2 Estadísticos de prueba Wilcoxon.....	62
Tabla 3 Análisis económico .....	64
Tabla 4 Costos de producción del sistema inicial y final de vapor.....	67

## Índice de figuras

	Página
Figura 1 Pulper de alta consistencia.....	4
Figura 2 Eficiencia de operaciones en la depuración de contaminantes en el procesamiento de papel.....	5
Figura 3 Principio del cribado .....	6
Figura 4 Criba vertical .....	6
Figura 5 Depurador ciclónico de alta consistencia.....	7
Figura 6 Principio de flotación .....	8
Figura 7 Lavado de fibra por espesador .....	9
Figura 8 Principio del lavado .....	9
Figura 9 Refinador cónico.....	11
Figura 10 Prensado del papel <i>tissue</i> .....	13
Figura 11 Cilindro secador con capotas de secado.....	14
Figura 12 Crepado del papel <i>tissue</i> .....	15
Figura 13 Estándar Pope reel.....	15
Figura 14 Máquina papelera <i>tissue</i> .....	16
Figura 15 Variación de la consistencia en la máquina papelera.....	17
Figura 16 Vista interna de un cilindro secador <i>Yankee</i> .....	18
Figura 17 Capota de papel <i>tissue</i> .....	19
Figura 18 Clasificación de Calderos .....	20
Figura 19 Esquema general de un Caldero Acuotubular .....	21
Figura 20 Esquema general de un Caldero Pirotubular .....	22
Figura 21 Relación temperatura con el volumen específico a presión constante .....	25
Figura 22 Formación de vapor <i>flash</i> a partir de la caída de presión del vapor condensado .....	27
Figura 23 El vapor saturado a la salida de una tubería al ser venteado a la atmósfera.....	28
Figura 24 Bomba centrífuga vertical multietápica Grundfos.....	30
Figura 25 Proceso cuasi estático a presión constante (a) estado 1 (b) estado 2.....	31
Figura 26 Diagrama de una cámara de mezclado .....	35
Figura 27 Comparación de costos de combustibles para usuarios gran industria.....	38
Figura 28 Diagrama de la metodología aplicada para la determinación del ahorro energético .....	41
Figura 29 Diagrama del sistema inicial del vapor.....	43



Figura 30 Diagrama del sistema final del vapor .....	47
Figura 31 Sistema inicial de Generación de vapor del presente estudio. ....	57
Figura 32 Sistema final de Generación de vapor del presente estudio .....	59
Figura 33 Calor total generado por el caldero.....	60
Figura 35 Distribución de los costos de producción .....	66

## *Índice de anexos*

	Página
Anexo 1 Cálculo del calor generado por el sistema inicial de vapor .....	81
Anexo 2 Análisis del Sistema inicial de vapor.....	86
Anexo 3 Cálculo del calor generado por el sistema final de vapor .....	93
Anexo 4 Análisis del sistema final de vapor.....	98
Anexo 5 Prueba de Normalidad.....	107
Anexo 6 Prueba de Wilcoxon.....	108

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, en los últimos 100 años se han realizado grandes esfuerzos para abastecerse de recursos energéticos, no sólo por obtener recursos tradicionales, no renovables fuera de sus fronteras: en el 2008, Estados Unidos, el mayor consumidor de energía en el mundo, producía 8,3 millones de barriles de petróleo al día y consumía 20,6, lo que significaba un déficit de 12,3 millones de barriles al día (Velasco *et al* citando a Barragan, 2009). Por consiguiente, se debe recurrir al aprovechamiento de los diferentes recursos energéticos con la mayor eficiencia energética posible: energía química, eléctrica, nuclear, térmica, etc. Así mismo, en los últimos años han aumentado considerablemente las exigencias por la disminución de agentes contaminantes para el cuidado del medio ambiente. En el sector industrial se contempla también modalidades que contribuyan al ahorro energético y mejora de las eficiencias.

Durante el año 2012 la participación del sector industrial en el Perú representó el 29 por ciento del consumo del total de energía. El uso de fuentes primarias para el sector se obtuvieron a partir del consumo de líquidos del gas natural (LGN) más petróleo (31 por ciento), electricidad (36 por ciento), gas natural (16 por ciento), biomasa (5 por ciento) y carbón (12 por ciento) llegando a los 198 TJ (Morales *et al*, 2012). En muchos de estos procesos industriales se requiere del aporte de calor en diferentes estados (vapor, agua sobrecalentada, fluido térmico), de forma que se vuelve imprescindible la presencia de calderos para su producción (Fenercom, 2004).

El caldero es uno de los puntos de consumo de combustible y químicos más elevados en un establecimiento industrial, incluyendo las fábricas de papel. Su principal función es transformar la energía química, mediante la combustión, en energía térmica; ésta energía es transferida al agua para convertirse en vapor, y que posteriormente es usado en diferentes tipos de procesos. Por lo cual, es importante iniciar estrategias de ahorro energético en estos procesos para mejorar la rentabilidad en las empresa industriales.

El vapor de agua es un insumo en la industria que se utiliza para transportar la energía térmica en los procesos de transformación de materias primas a productos, por lo que la eficiencia en el sistema de generación, la distribución adecuada y el control de su consumo, tendrán un gran impacto en la eficiencia total en una planta. Esta situación se refleja en los costos de producción del vapor y, en consecuencia, en la competitividad y sustentabilidad de la empresa (CONAE, 2002).

Los productos de papel están muy ligados a la actividad económica de un país, siendo su consumo insustituible, con mucha demanda bajo la forma de envases, embalajes, revistas, libros, cuadernos, papeles sanitarios o *tissue*. Al respecto, se considera además que el nivel social, cultural y económico de una población tiene un claro impacto en el consumo de papel, por las relaciones al nivel de estudios, difusión de prensa escrita, consumo cultural, hábitos de higiene, etc. Los productos de papeles sanitarios se caracterizan en la actualidad por su gran demanda, amplio consumo en todos los tipos: papel higiénico, papel toalla, papel servilleta, papel para pañuelos, papel *tissue*. En las fábricas de papeles sanitarios, lo que corresponde a gasto energético es por el consumo de electricidad, como energía mecánica en motores, alumbrado; la otra forma de consumo, como calor, para las etapas de secado del papel. La mayor parte de la energía del vapor se usa para evaporar agua, del papel. La sección de secado es el área con el más alto consumo de vapor en las plantas papeleras. La pérdida de vapor *flash* en el sistema de vapor es un área donde comúnmente se pueden realizar mejoras. Además, el retorno de condensado a mayores temperaturas (presiones) hacia la estación de calderos también puede constituir un área de mejoramiento en la eficiencia energética (Hill, 2006).

Durante años, no se consideró el aporte energético que se puede obtener a partir de la reutilización de los condensados provenientes de las máquinas papeleras luego de la utilización del vapor en el proceso de secado del papel. Es así que en una fábrica de papel *tissue* se decidió mejorar su sistema de vapor evitando la pérdida de energía calorífica producida por el venteo a la atmósfera de vapor *flash* en el tanque de alimentación de agua para el caldero.

El presente estudio tiene como objetivo determinar el ahorro energético a partir del vapor condensado recuperado y cómo éste repercute en la economía de la producción de papel *tissue*, de esta manera se contribuye con la información existente sobre el consumo de energía en una fábrica de papel.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL TISSUE**

La fabricación del papel, independientemente del tipo de máquina que se emplee, consiste en la formación de hoja a partir de una suspensión diluida de pasta de papel; para el cual se mencionan las siguientes etapas (CAR/PL, 2005):

#### **1.1. PREPARACIÓN DE PASTA**

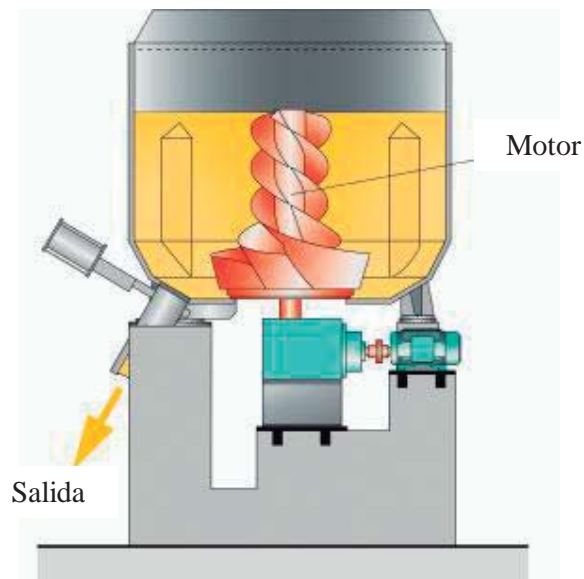
A través de procesos físicos y químicos, se eliminan los aditivos e impurezas del papel reciclado para quedarse con la pasta de papel que servirá para hacer las bobinas (KC – P, 2014). Por lo regular, se llevan a cabo cuatro sub-etapas: desintegración, depuración, blanqueado, refinado.

##### **1.1.1. DESINTEGRACIÓN**

La separación de la fibra se realiza en un equipo llamado pulper de alta consistencia (8 - 12%) en donde la pasta frota constantemente contra una disco ubicado en el fondo que lleva una serie de aletas que sobresalen, consiguiendo separar las fibras del resto de los componentes del papel y cartón. Cuando la hoja está lo suficientemente disuelta, el pulper es vaciado a través de una rejilla con ranuras que evita el paso de fragmentos grandes que no hayan sido suficientemente desechos o de impurezas de la fibra secundaria obtenida como plásticos grandes, trozos de telas, alambres, sogas, etc., como se observa en la figura 1 (Torraspapel, 2008).

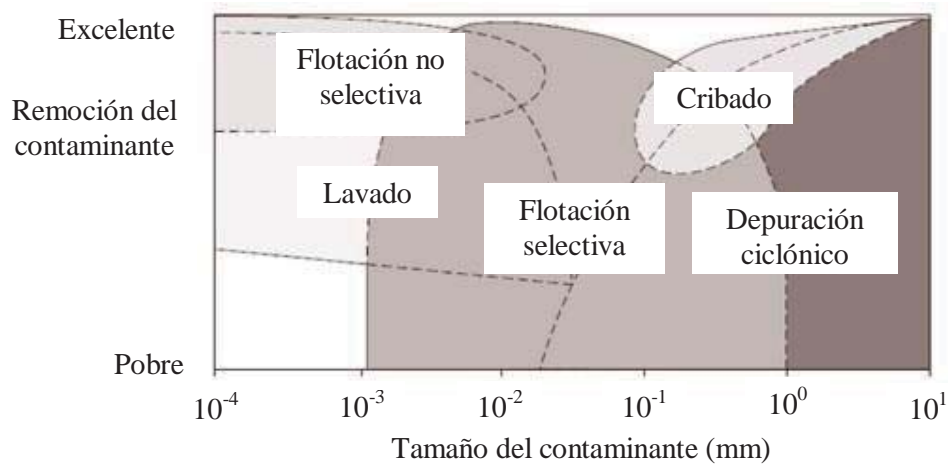
### 1.1.2. DEPURACIÓN

Una completa depuración de la fibra reciclada es imposible en una sola etapa. El principio fundamental es eliminar los contaminantes lo antes posible, prevenir que se reduzcan de tamaño y evitar las pérdidas de fibras. Dependiendo de la calidad deseada se llevan a cabo más o menos etapas de depuración, con recirculaciones, para una óptima recuperación de fibras (CAR/PL, 2005). El tamaño de las partículas que se elimina en cada una de las etapas se puede observar en la figura 2:



**Figura 1 Pulper de alta consistencia**

*FUENTE: Hollik, 2006.*



**Figura 2 Eficiencia de operaciones en la depuración de contaminantes en el procesamiento de papel**

*FUENTE: Hollik, 2006.*

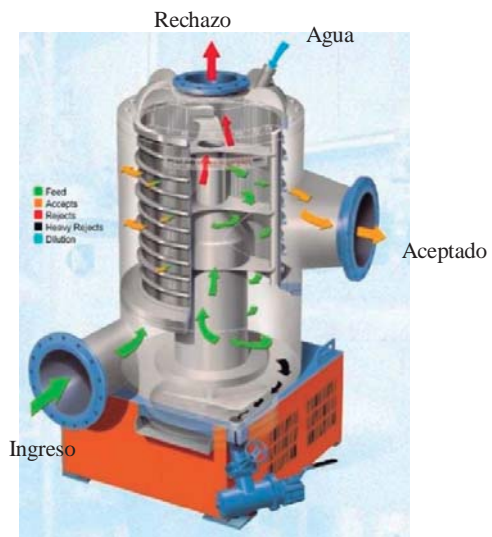
La eliminación de contaminantes se basa en sus diferentes propiedades en comparación de fibras, finos y cargas (Carré *et al*, 2007):

- Diferencias en tamaño: las partículas más pequeñas que las fibras se pueden eliminar por lavado y contaminantes más grandes, si son lo suficientemente rígido, se pueden eliminar mediante el cribado.
- Diferencias de densidad: sin son suficientemente largas, las partículas que tienen una densidad diferente a uno, pueden ser eliminadas por limpieza centrífuga. Algunos equipos de cribado están diseñados para eliminar contaminantes de alta densidad ( $>1$ ) y otros para eliminar contaminantes de peso ligero ( $<1$ ).
- Diferencias en las propiedades de superficie: la flotación puede remover partículas hidrofóbicas. Aditivos, como tensioactivos sintéticos o jabones, son usados generalmente para recoger las partículas de tinta que mejoran la eficiencia de la flotación.

La pasta que proviene del pulper pasa a ser depurada debido al contenido de materiales impropios como plásticos, arena, pequeños metales, vidrios, tintas etc., que perjudican al papel así como a los equipos (Torraspapel, 2008). Se realizan sub procesos de cribado, depuración ciclónica, flotación y lavado (Carré *et al*, 2007).

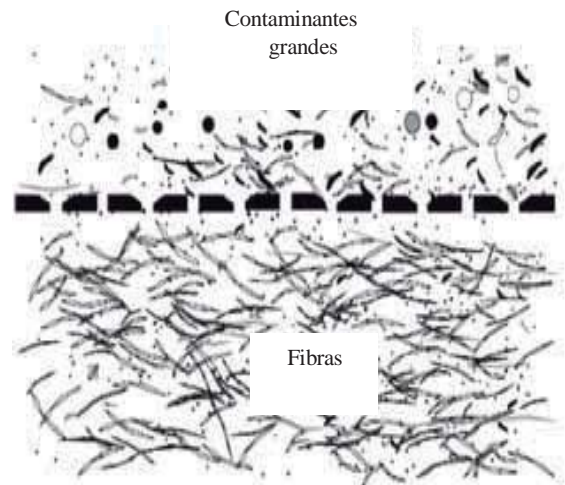
**a. CRIBADO**

Consiste en la eliminación de contaminantes manteniéndolos en una criba mientras que las fibras pasan a través de las aberturas (ranuras o agujeros) como se observa en la figura 3. El cribado puede quitar contaminantes grandes y rígidos como plásticos, documentos con resistencia en húmedo, agramizas en equipos como en la figura 4 (Carré *et al*, 2007).



**Figura 4 Criba vertical**

*FUENTE: Kadant Lamort, 2000.*



**Figura 3 Principio del cribado**

*FUENTE: Carré et al, 2007.*

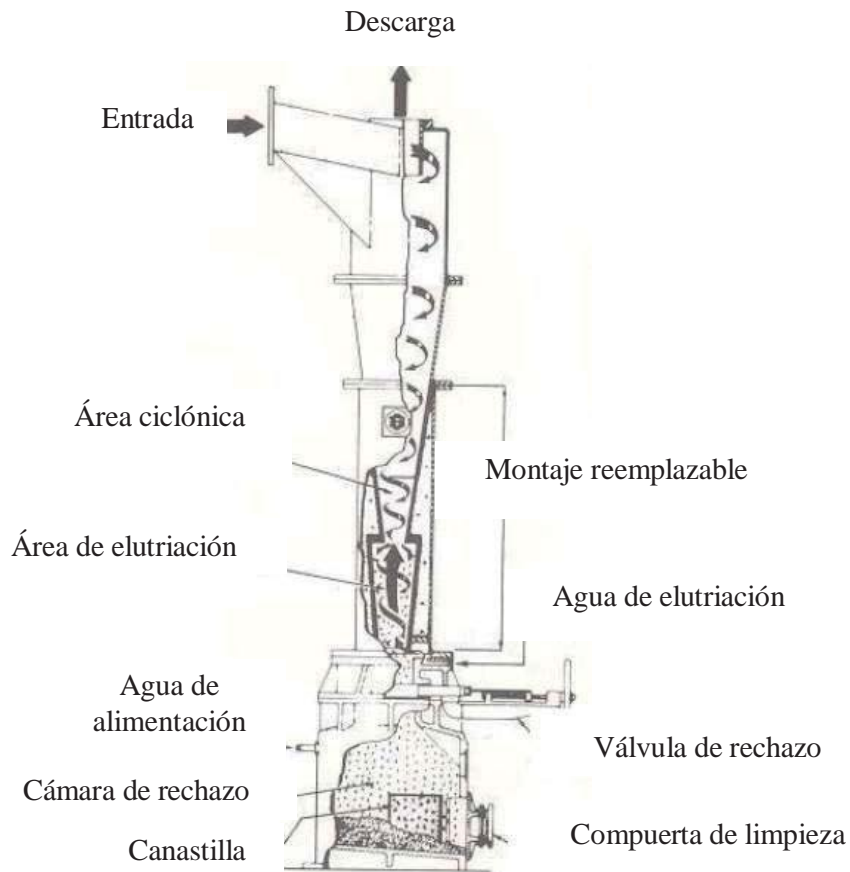
**b. Depuración ciclónica**

Se basa en la separación de partículas en un campo de flujo centrífugo. Un movimiento de remolino es creado por el flujo de entrada tangencial. El movimiento en remolino crea fuerzas centrífugas que hace que las partículas más pesadas migren hacia el exterior del



depurador, mientras las partículas livianas migran hacia el centro. Depuradores ciclónicos de alta consistencia pueden remover contaminantes como grapas, pequeñas piedras (figura 5).

Depuradores ciclónicos de baja consistencia, llegan a remover pequeñas partículas de adhesivos, plásticos, arenilla (Carré y Galland, 2007).



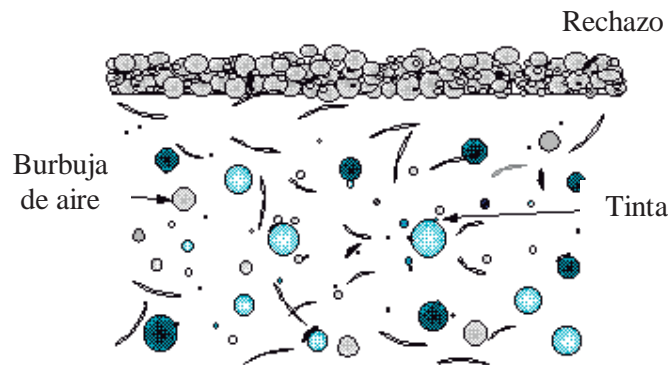
**Figura 5 Depurador ciclónico de alta consistencia**

*FUENTE: Barrientos, 2009.*

### c. Flotación

Consiste en la eliminación de partículas hidrofóbicas llevándolas por flotación a la superficie a través de burbujas; principalmente, partículas de tinta. Hoy en día, se proponen diversos dispositivos diseñados con el fin de mejorar la mezcla de aire y la eliminación de espuma

(figura 6). La flotación puede eliminar tinta (a base de aceite con características hidrofóbicas), barnices y algunas partículas adhesivas (Carré *et al*, 2007).

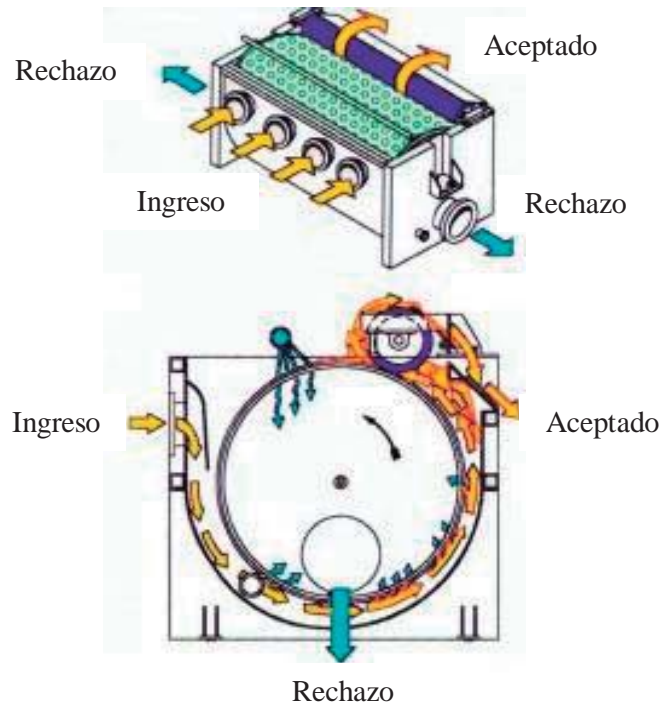


**Figura 6 Principio de flotación**

*FUENTE: Carré et al 2007.*

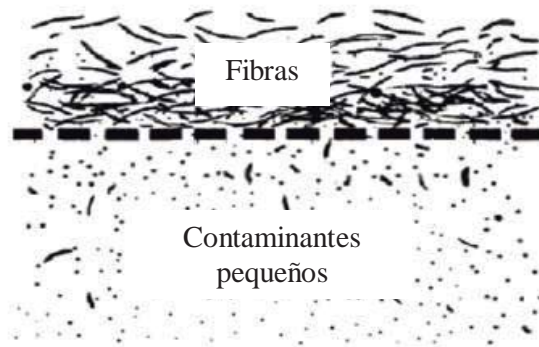
#### **d. Lavado**

Consiste en la eliminación de pequeñas partículas, como tinta, cargas y partículas contaminantes, por espesamiento o aclarado de la pasta. El principio de separación consiste en depositar la suspensión de fibras y partículas de tinta sobre tamices de dimensiones de malla apropiadas que permiten el paso de las partículas de tinta y retienen las fibras. La tecnología del lavado deriva de la tecnología del espesamiento: eliminación de agua y de partículas solubles y coloidales, como se observa en la figura 8 (Carré *et al*, 2007). En un espesamiento sencillo, el filtrado se recircula o bien se separan los sólidos del filtrado y se reutilizan de nuevo en el proceso (figura 7). En los casos ideales, la cantidad de tinta eliminada es proporcional a la cantidad de agua eliminada, siempre y cuando las partículas de tinta sean lo bastantes pequeñas para no ser retenidas en la parte fibrosa y estén bien dispersas (Holik, 2006).



**Figura 7 Lavado de fibra por espesador**

*FUENTE: Holik, 2006.*



**Figura 8 Principio del lavado**

*FUENTE: Carré et al, 2007.*

### **1.1.3. BLANQUEO**

El blanqueo contribuye a lograr las características ópticas necesarias en una pulpa destintada. Las fibras recicladas sin blanquear se utilizan para la producción de papeles de embalaje y cartón. Por razones económicas, el blanqueamiento sólo ocurre cuando el papel manufacturado con fibras recicladas, requiere características ópticas como la blancura y el brillo. (León *et al*, 2012). Cuando se tiene fibras de pulpa química, mecánica o secundaria y son usadas en la producción de papeles blancos, de impresión, escritura o tissue; estas pastas deben ser blanqueadas hasta cierto brillo. (Holik, 2006).

El término de blanqueo está reservado para (Weinstock, 1993):

- 1) remoción de color, remoción química o modificación de los colorantes.
- 2) deslignificación, y
- 3) brillo

Para León *et al* (2012), citando a Motato, una variedad de químicos es utilizada para abrillantar o blanquear la pulpa de fibra reciclada. Algunos de los químicos son compuestos oxidativos y algunos son reductivos. Las reacciones de oxidación-reducción son las que decoloran los colorantes y la lignina en el papel. Es la lignina la que causa que la fibra se vuelva amarilla cuando se expone a la luz o pH alto. Cada etapa de blanqueo se define por su agente blanqueador, pH, temperatura y duración. Después de cada una de ellas, la pasta debe lavar con agentes cáusticos para eliminar los agentes blanqueadores y disolver lignina antes de pasar a la siguiente. (León *et al*, 2012 citando a Campos).

### **1.1.4. REFINACIÓN**

El proceso de refinación es la operación clave en la fabricación de papel en lo que se refiere al tratamiento de las fibras. Con la refinación, la fibra consigue la resistencia necesaria para

que la hoja resista las tensiones a las que es sometida en la máquina de papel. En la práctica, sin embargo, la refinación es posible hasta cierto límite, para que no interfiera negativamente en la drenabilidad de la hoja, en el cuerpo del papel, y en su estabilidad dimensional (figura 9). La calidad de la fibra refinada depende de las condiciones a que es sometida durante el tratamiento de refinación (Martins *et al*, 2006).



**Figura 9 Refinador cónico**

*FUENTE: Andritz, 2009.*

El primer efecto es la eliminación parcial de la pared primaria. Aunque la pared primaria es permeable al agua, no se “hincha”. La eliminación de la pared primaria deja al descubierto la pared secundaria y permite la hidratación (esto es, la absorción de agua en la estructura molecular) y la flexibilidad de la fibra. La acción posterior de la fibrilación implica la liberación de las fibrillas y la producción de micro fibrillas más finas en la superficie de la fibra, dando como resultado un sensible aumento de la superficie específica de las fibras refinadas. Algún acortamiento de fibras (o corte) casi siempre ocurre durante el refinado debido a la acción de cizalladura producida en el cruzamiento de las cuchillas. El corte de las fibras es normalmente considerado indeseable porque provoca un menor drenaje y una pérdida de resistencia. Eventualmente, se provoca una acción de corte para obtener una buena formación de hoja con pulpa de fibras largas (Smook, 1990).

## **1.2. FORMACIÓN DEL PAPEL**

La máquina de papel, figura 14, es la unidad principal y más característica de este proceso. El procedimiento para producir papel reciclado o papel proveniente de pasta virgen es muy similar (Barrientos, 2009). La fabricación de papel, independientemente del tipo de máquina que se emplee, consiste en la formación de la hoja a partir de una suspensión diluida de pasta de papel. Para ello la suspensión se deposita en una tela o malla, con el fin de que los sólidos queden retenidos sobre la tela y el líquido drene a su través (Ángeles, 1994).

Una vez preparada la suspensión de pasta, ésta se bombea a la caja de alimentación, cuya función es distribuir homogéneamente la suspensión diluida de fibras y aditivos (0.05 – 1%) sobre la mesa de formación a través del labio.

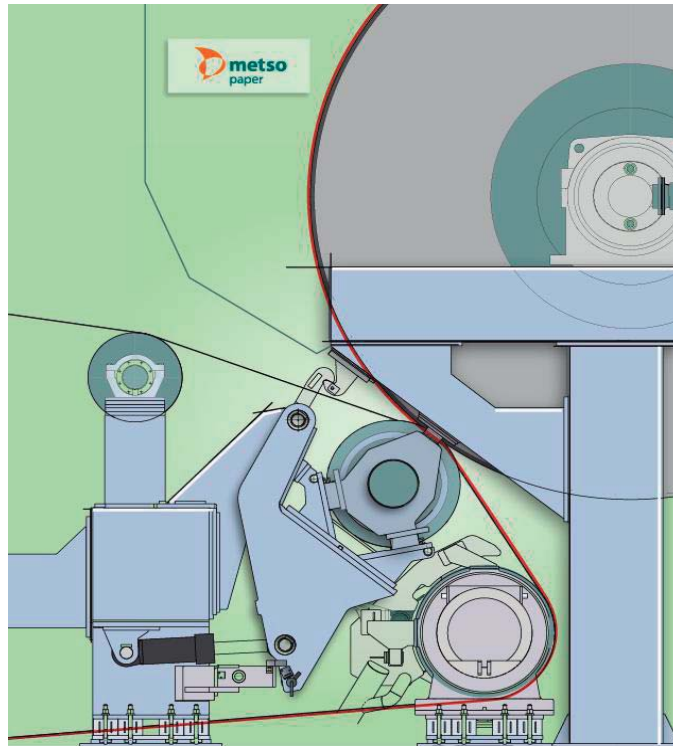
La mesa de formación, de hasta 10 metros de ancho y 35 de largo, está formada por una tela plástica sin fin, que actúa de filtro. Bajo la tela hay distintos elementos que favorecen el drenaje. Cuando la suspensión se deposita sobre la tela, el agua dreña, primero por gravedad y después por vacío mientras que los sólidos en suspensión quedan en su mayoría retenidos, formando una torta húmeda sobre la tela. Los distintos elementos de drenaje producen diferentes velocidades de drenaje y su disposición debe optimizarse con el fin de conseguir un desgote progresivo de la pasta y evitar el sellado de la hoja.

Una buena formación requiere una distribución homogénea de las fibras, finos y cargas minerales en la hoja (CAR/PL, 2005).

## **1.3. PRENSADO**

El propósito de la sección de prensa es aumentar el contenido seco del papel tanto como sea posible por compresión (figura 10). Este tipo de deshidratación mecánica reduce el consumo de vapor en la sección de secado y aumenta la resistencia de la hoja con el fin de evitar rotura durante la producción (Holik, 2006).

El prensado tiene acción exclusivamente de compresión transversal sobre las fibras. (CAR/PL, 2005).



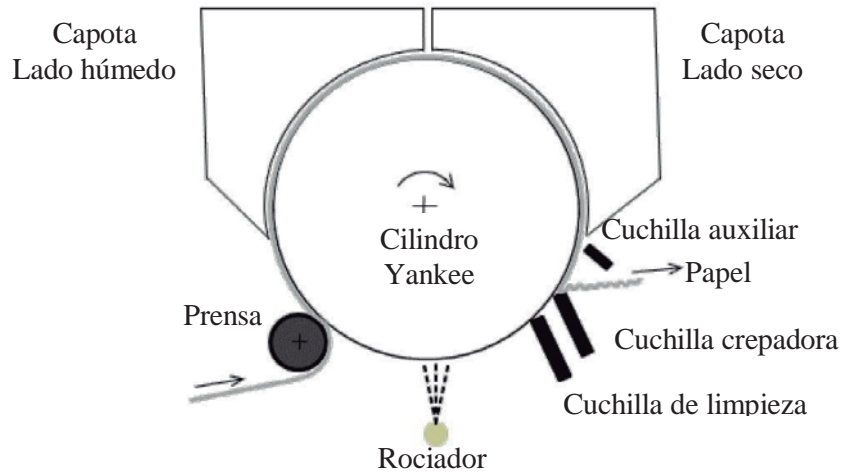
**Figura 10 Prensado del papel *tissue***

*Fuente: Metso, 2012.*

#### **1.4. SECADO**

La sección de secado, figura 11, está compuesta de un cilindro secador denominado *Yankee*, el cual trabaja con vapor saturado. Éste es el encargado de transferir calor a la hoja de papel por conducción, mientras el vapor realiza su trabajo, éste se condensa. El condensado se recoge en unos orificios que se encuentra dentro del cilindro llamados sifones, para regresarlo a la caldera de la planta y recircularlo en el sistema. Además, el sistema posee dos campanas llamadas “capota” de lado seco y “capota” de lado húmedo, las cuales son encargadas de introducir y remover el aire del sistema. Estas recogen la humedad que tiene el papel mediante la transferencia de calor y masa de forma simultánea. Al sistema de las capotas se les inyecta aire caliente, este proviene de un sistema de ventilación compuesto por ventiladores, encargados de recircular el aire del sistema, introducir aire fresco y expulsar el aire húmedo. En promedio, el papel después de la sección de prensado se encuentra con 40 por ciento de consistencia, al finalizar el proceso de secado el papel tiene una consistencia del 95 por ciento (León *et al*, 2012).

El papel se seca en el cilindro *Yankee* en aproximadamente un segundo, alrededor de las tres cuartas partes de un giro del cilindro. (Boudreau, 2014).



**Figura 11 Cilindro secador con capotas de secado**

*FUENTE: Boudreau, 2013.*

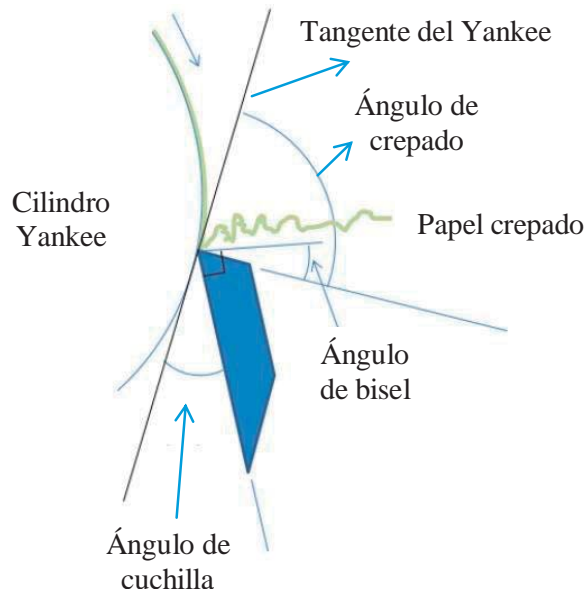
### **1.5. CREPADO**

El crepeado es probablemente la operación que está más asociado con la fabricación de papel *tissue*; una cuchilla “crepadora” es utilizada para raspar la hoja fuera del cilindro. La energía de la cuchilla, arruga el papel rompe la estructura física de la hoja tal como se observa en la figura 12 (Kullander, 2012, mencionando a Boudreau).

Se crean micropliegues y se apilan en la parte superior de uno al otro, y cuando la pila es lo suficientemente alta se cae y crea un macropliegue. Este mecanismo se repite continuamente en toda la hoja que resulta en un producto final estructurado.

El crepado da un papel de mayor volumen de, suavidad y estiramiento (Kullander, 2012, mencionando a Gavelin).



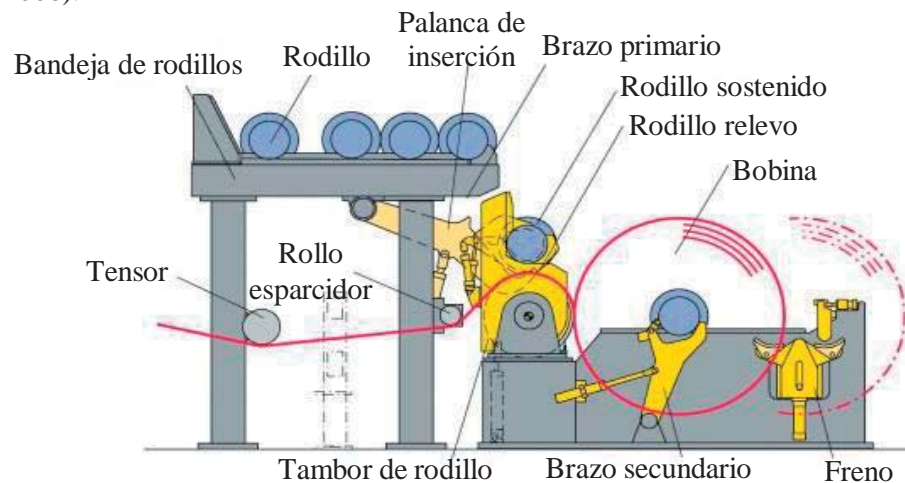


**Figura 12 Crepado del papel *tissue***

*FUENTE: Boudreau, 2013.*

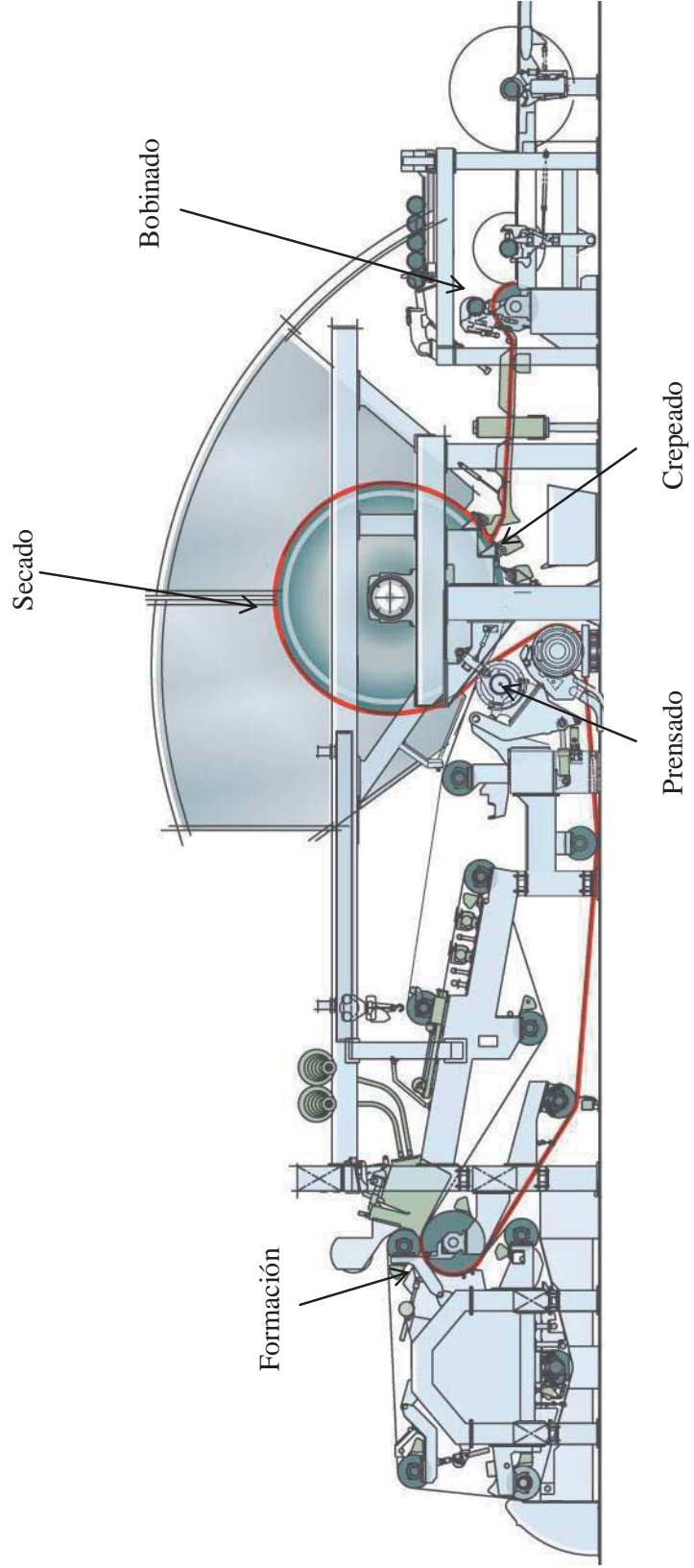
## 1.6. BOBINADO

El propósito del bobinado es recibir el papel producido de forma continua en bobinas de hasta 4,5 metros de diámetro, figura 13, cumpliendo los requisitos para los siguientes pasos del proceso. Estos requisitos se refieren principalmente a la estructura de la bobina, tales como la dureza y el perfil de la hoja. Como el bobinado es una operación discontinua, aspectos económicos como las roturas del papel o cambio de rodillos son importantes. (Holik, 2006).



**Figura 13 Estándar Pope reel**

*FUENTE: Holik, 2006*



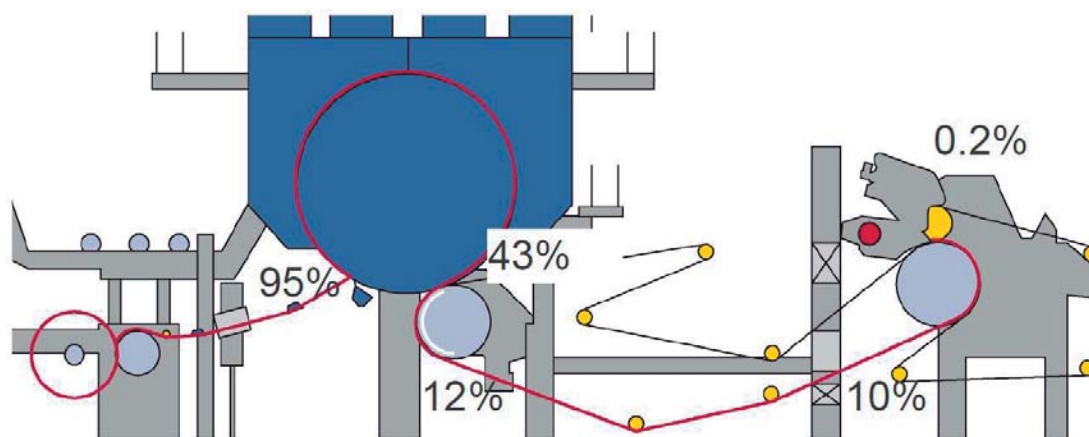
**Figura 14** Máquina papelera *tissue*

FUENTE: *Metso, 2012.*

## 2. SECADO DEL PAPEL

En una máquina de papel *tissue*, el secado por evaporación se transforma en una sola operación de mucha trascendencia, porque es un solo secador, aunque el papel es de peso base muy bajo (Hernández *et al*, 2010).

El propósito de la sección de secado es aumentar la masa seca de la hoja de papel, por lo general a 90 – 98 por ciento, por evaporación (figura 15). Durante el secado, las fibras desarrollan enlaces “puentes de hidrógeno” que proporcionan la fuerza natural del papel. El secado es una operación conjunta de transferencia de masa y energía, por lo que el calor tiene que ser transferido de una fuente energética y el vapor generado tiene que ser retirado. Durante el secado, la hoja de papel que se ha sido recogida de la sección de prensado tiene que ser guiado con seguridad a lo largo de la sección de secado hasta el bobinado (Holik, 2006).



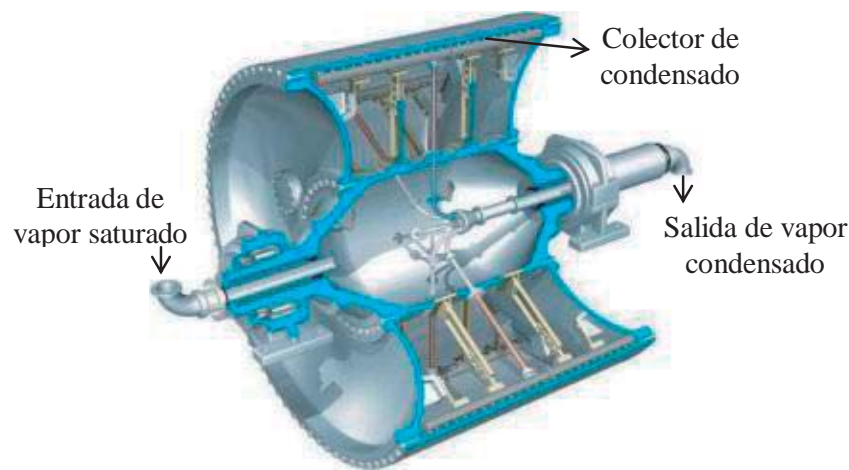
**Figura 15 Variación de la consistencia en la máquina papelera**

FUENTE: Voith, 2012.

El cilindro de secado (figura 16) está diseñado para satisfacer la necesidad, pero ya que la capacidad de secado se ha incrementado con máquinas más rápidas en los últimos años, los cilindros se han convertido más grandes. Un cilindro de secado, modelo Yankee tiene de 5 a 6 metros de diámetro con temperaturas en la superficie cercanas a los 100 °C. El secador Yankee suministra energía para el secado eficiente de la hoja, pero tiene otras tres funciones (Kullander, 2012):

- Para el transporte de la hoja durante el proceso de secado.
- Para funcionar como un rollo en la operación de prensado en caliente.
- Proporcionar la base para el proceso de crepado.

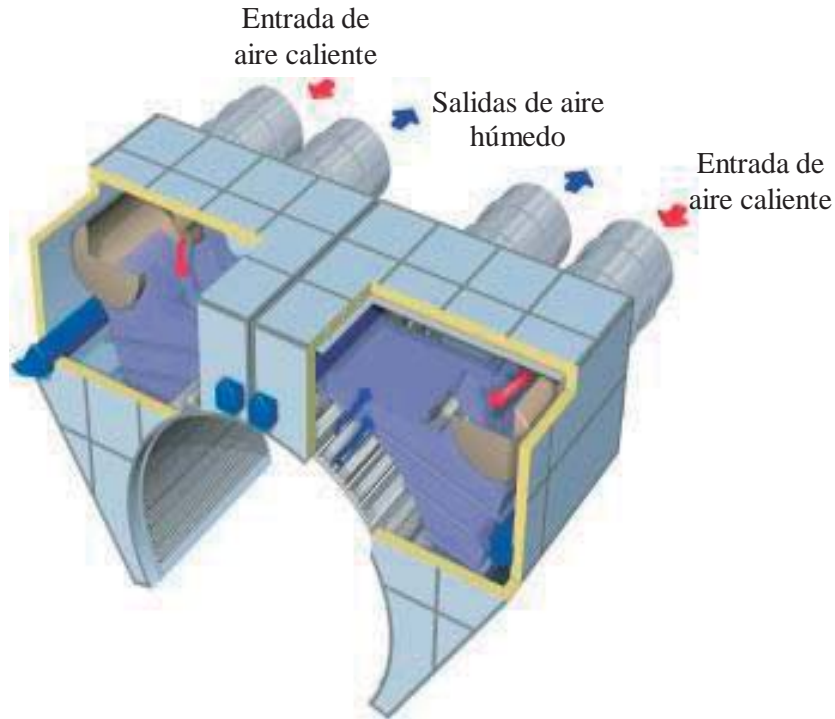
El calor es proporcionado por el vapor que entra al cilindro a través de la entrada frontal. El vapor se condensa en las paredes de las superficies interna y es recogido por pequeños tubos. El condensado se recoge en las cabeceras transversales y conducido a través de tubos largos doblados en el eje interno y sale del cilindro por la salida posterior (Kullander, 2012).



**Figura 16 Vista interna de un cilindro secador *Yankee***

*FUENTE: Voith, 2012.*

La capota del *Yankee*, figura 17, se encuentra normalmente conectada con el cilindro secador y este sopla aire caliente sobre la hoja a temperaturas de hasta 550 °C (Kullander, 2012, mencionando a Kimari). El cilindro *Yankee* también está equipado con un sistema de pulverización química en la que los adhesivos y agentes de liberación se pulverizan sobre la superficie para dar un mayor área de contacto de la hoja, y una buena separación de la hoja del cilindro durante el proceso de crepado.



**Figura 17 Capota de papel *tissue***

*FUENTE: Holik, 2006.*

La operación de secado es la más costosa dentro de la fabricación de papel. Por eso, es necesario tener una serie de cuidados durante el desarrollo de la misma para reducir al máximo sus costes.

El agua que se encuentra en el papel antes de ser eliminada es de tres tipos (TorrasPapel, 2008):

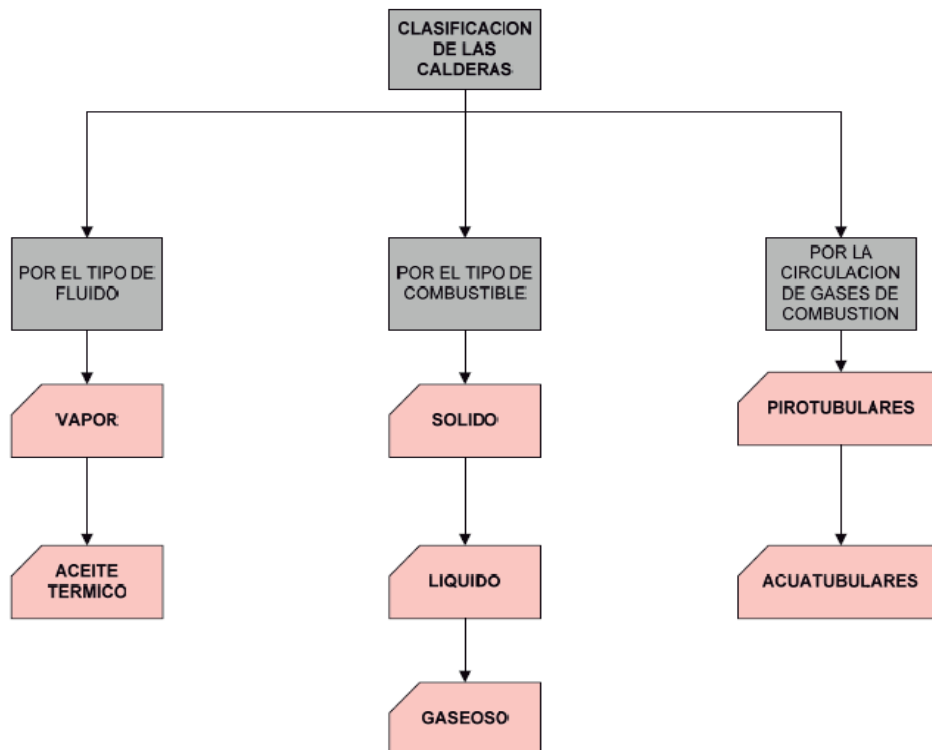
- Agua embebida: Es aquella que está ocupando los huecos del papel. Se encuentra en un 20 – 30 por ciento. Es fácil de eliminar.
- Agua capilar: Es aquella que proviene del refino. Se encuentra ocupando las zonas amorfas de las fibras. Oscila entre el 6 – 8 por ciento. Es más difícil de eliminar.
- Agua coloidal: Es la que está formando parte de los compuestos químicos (hidratos de carbonos). Su contenido es de un 0 – 6 por ciento. No se elimina en el secado.

### 3. CALDERO

La Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) y el MITINCI (2002) definen al caldero como un equipo de transferencia de calor en el cual gases calientes, producidos por la combustión de un combustible con aire en un quemador, transfieren calor a través de tubos al agua que se alimenta al caldero produciendo finalmente vapor a presión que sale del caldero.

#### 3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS CALDEROS

Los calderos se pueden clasificar, figura 18, de acuerdo a las temperaturas y presiones finales, tipo de energía calorífica disponible y volumen o flujo de vapor (Cabrera *et al*, 2012).



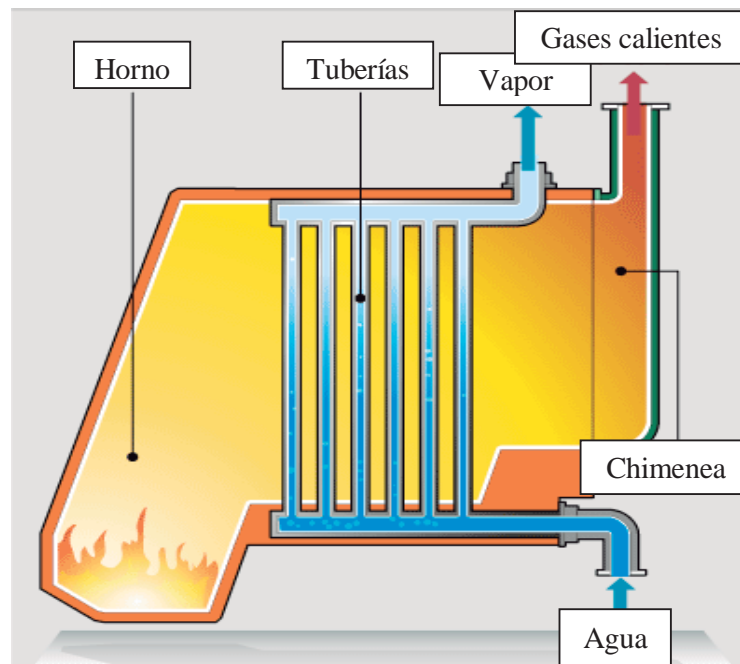
**Figura 18 Clasificación de Calderos**

*FUENTE: Cabrera et al, 2012.*

Según el código de calderos ASME, los calderos se clasifican como calderos de calefacción de baja presión a los que producen vapor sin exceder los 1,03 bar y a todos los calderos para agua caliente cuya presión no excedan los 11,03 bar y cuyas temperaturas no sobrepasen los 121 °C. Los calderos para generación de fuerza son aquellos cuyas condiciones de operación sobrepasan los límites señalados anteriormente (Burgos, 2007).

Fenercom (2004), clasifica los Calderos según la disposición de los fluidos en:

- Acuotubulares: aquellos calderos en los que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos (figura 19). Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por debajo de los 22 bar. El título de vapor producido es muy bajo (85 por ciento), es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es muy alto (15 por ciento). Si no se le añaden subconjuntos secadores del vapor, tales como recalentadores o sobrecalentadores.

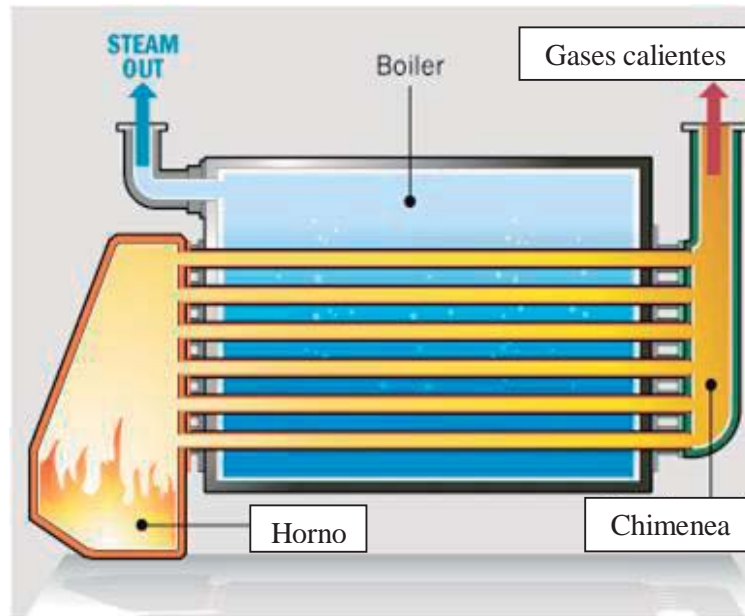


**Figura 19** Esquema general de un Caldero Acuotubular

*FUENTE: Adaptado de How stuff works, 2008.*

- Pirotubulares: aquellos calderos en los que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos (figura 20). Son de aplicación cuando se requiere una presión por encima de los 22 bar.

El vapor producido por las mismas suelen tener un título de vapor cercano a 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (3 por ciento), no siendo necesario instalar equipos auxiliares complementarios.



**Figura 20 Esquema general de un Caldero Pirotubular.**

*FUENTE: Adaptado de How stuff works, 2008.*

### **3.2. RENDIMIENTO DE UN CALDERO**

El rendimiento, o eficiencia, de un caldero relaciona su habilidad de transferir calor del combustible al agua satisfaciendo ciertas especificaciones de operación. El rendimiento del caldero incluye todos los aspectos de la operación. (Rodríguez, 2006).

Las especificaciones de rendimiento incluyen la capacidad operativa y los factores para ajustar esa capacidad, la presión del vapor, la calidad del agua de la caldera, las temperaturas de la caldera, el análisis de los gases de combustión, el análisis del combustible y de los



residuos de combustión. Especificaciones adicionales de rendimiento indican incluir los requerimientos energéticos de los ventiladores. (Lindsley, mencionado por Rodríguez, 2006). El resultado de un cálculo que involucra la especificación de rendimiento es una eficiencia calculada. La eficiencia de una caldera se presenta como un porcentaje entre el calor suministrado al caldero (calor total) y el calor absorbido por el agua de la caldera (calor útil).

Se conocen dos métodos fundamentales para el cálculo de la eficiencia. Estos son generalmente referidos como el método de salida/entrada o método directo y el método de pérdida de cabeza o método indirecto. (Dukelow, mencionado por Rodríguez, 2006)

$$\text{Eficiencia del caldero} = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \quad (1)$$

Este método devuelve un número decimal, el cual se expresa luego como un porcentaje de eficiencia.

En el método de pérdida de cabeza, el porcentaje de cada una de las pérdidas mayores se considera. Este método no es muy utilizado ya que requiere de muchas mediciones.

#### **4. VAPOR DE AGUA**

El agua, en condiciones atmosféricas normales, se encuentra en estado líquido (Crane, 1998). Es usado ampliamente como un medio de transporte de energía. En muchas ocasiones, coexisten en equilibrio 2 fases del agua como líquido y vapor de agua en un caldero. (Cengel, 2009)

Existen tres etapas diferentes durante el proceso de conversión del agua a vapor. El agua debe de estar hirviendo antes de que pueda formar el vapor, y el vapor sobrecalentado no puede formarse hasta que el vapor esté completamente seco. En la primera etapa, el calor se aplica para incrementar la temperatura del agua hasta el punto de ebullición correspondiente a las condiciones de presión bajo las cuales se proporcionar calor. El punto de ebullición se conoce normalmente como la temperatura de generación o saturación. La cantidad de calor requerido para subir la temperatura del agua desde 0 °C hasta la temperatura de saturación

se conoce como entalpía del agua o calor sensible. En la segunda etapa se proporciona calor al agua hirviendo y, bajo condiciones de presión constante, el agua se convierte en vapor sin aumentar la temperatura. Esta es la fase de evaporación o de calor latente; en esta fase, con el vapor en contacto con el agua líquida, el vapor se encuentra en la condición conocida como saturado. Puede estar “seco o húmedo” dependiendo de las condiciones de generación. El vapor saturado “seco” es vapor libre de partículas de agua. Vapor saturado “húmedo” es el que contiene partículas de agua en suspensión. El vapor saturado a cualquier presión tiene una temperatura definida (Crane, 1998).

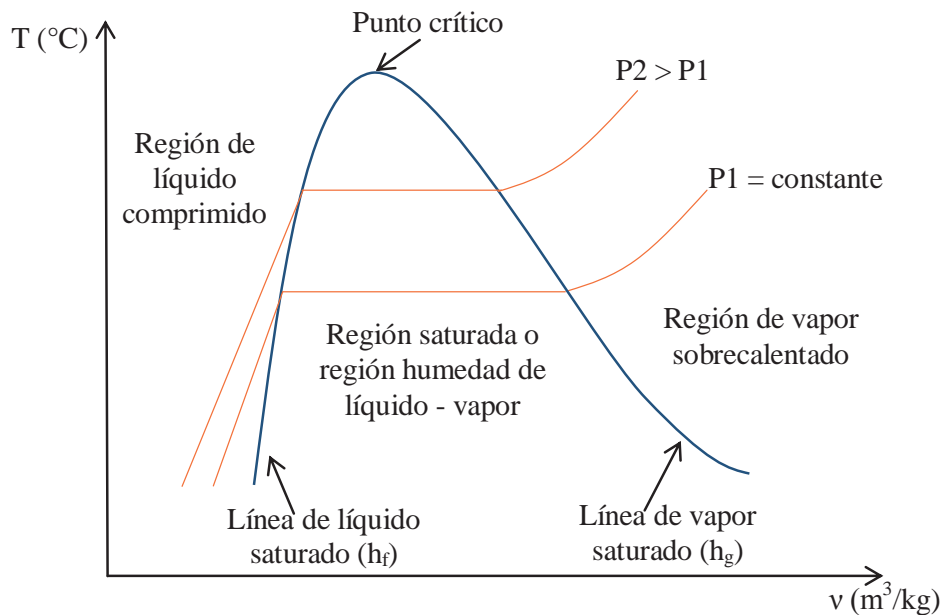
En razón de que los cambios de transferencia de calor vapor-líquido usualmente ocurren a presión constante o casi constante en la industria, la vaporización o condensación de un compuesto simple normalmente se efectúa isotérmicamente (Kern, 1999).

Si el agua se calienta en un recipiente cerrado que no esté completamente lleno, la presión aumenta después de que se empieza a formar vapor y éste aumento provoca un incremento de temperatura. La tercera etapa comienza cuando el vapor a una determinada presión se calienta por encima de la temperatura del vapor saturado a esa presión. El vapor se llama sobrecalentado (Crane, 1998).

Si todo el proceso anterior se invierte, enfriando el agua mientras se mantiene la presión en el mismo valor, el agua regresará al estado inicial, líquido comprimido, trazando de nuevo la misma trayectoria, y de esa manera la cantidad de calor liberado corresponderá a la cantidad de calor agregada durante el proceso de calentamiento (Cengel, 2009).

Los diagramas de propiedades de T (temperatura) vs V (volumen); P (presión) vs V ayudan a comprender los procesos de cambio de fase. En el diagrama T vs V (figura 21) se pueden graficar las diferentes curvas que demuestran la trayectoria de los diferentes procesos de cambio de fase a distintas presiones. Esto es, a una mayor presión, la temperatura de ebullición aumentará al igual que el volumen específico del líquido saturado, y el valor del vapor saturado de este será menor. Es decir, la línea horizontal que conecta los estados de líquido y vapor saturados es más corta. Cuando la presión alcanza el valor de 22,06 MPa, los estados del líquido saturado y de vapor saturado son idénticos. A este punto se le denomina, punto crítico. La temperatura y volumen específico en este punto son de 373,95 °C y  $3,106 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  respectivamente. Los estados de líquido saturado, que se presentan en la figura 21, pueden conectarse mediante una línea llamada línea de líquido saturado, y los de vapor

saturado mediante la línea de vapor saturado. Estas dos líneas se unen en el punto crítico formando un domo, mientras todos los estados de líquido comprimido se localizan en la región de líquido comprimido, y las de vapor sobrecalentado se encuentran a la derecha de la línea de vapor saturado, en la región de vapor sobrecalentado. En estas dos regiones la sustancia existe en una sola fase, líquida o vapor. Todos los estados que abarcan ambas fases en equilibrio se localizan bajo el domo, en la llamada región de vapor húmedo o región de saturación (Cengel, 2009).



**Figura 21 Relación temperatura con el volumen específico a presión constante**

*FUENTE: Cengel, 2009.*

El vapor ha sido utilizado como vehículo de energía desde la Revolución Industrial por diversas razones (Martínez mencionando a Yunchao, 2009):

- El vapor posee un elevado poder calorífico por unidad de masa, lo que permite transportar una buena cantidad de energía por unidad de masa.
- El vapor tiene un excelente coeficiente de transferencia térmica ( $2,3 - 2,9 \text{ kW/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ), por lo que resulta relativamente fácil que el vapor transfiera su calor a otros puntos del sistema que encuentren a menor temperatura. Cumple con lo indicado en la ley cero de la termodinámica.

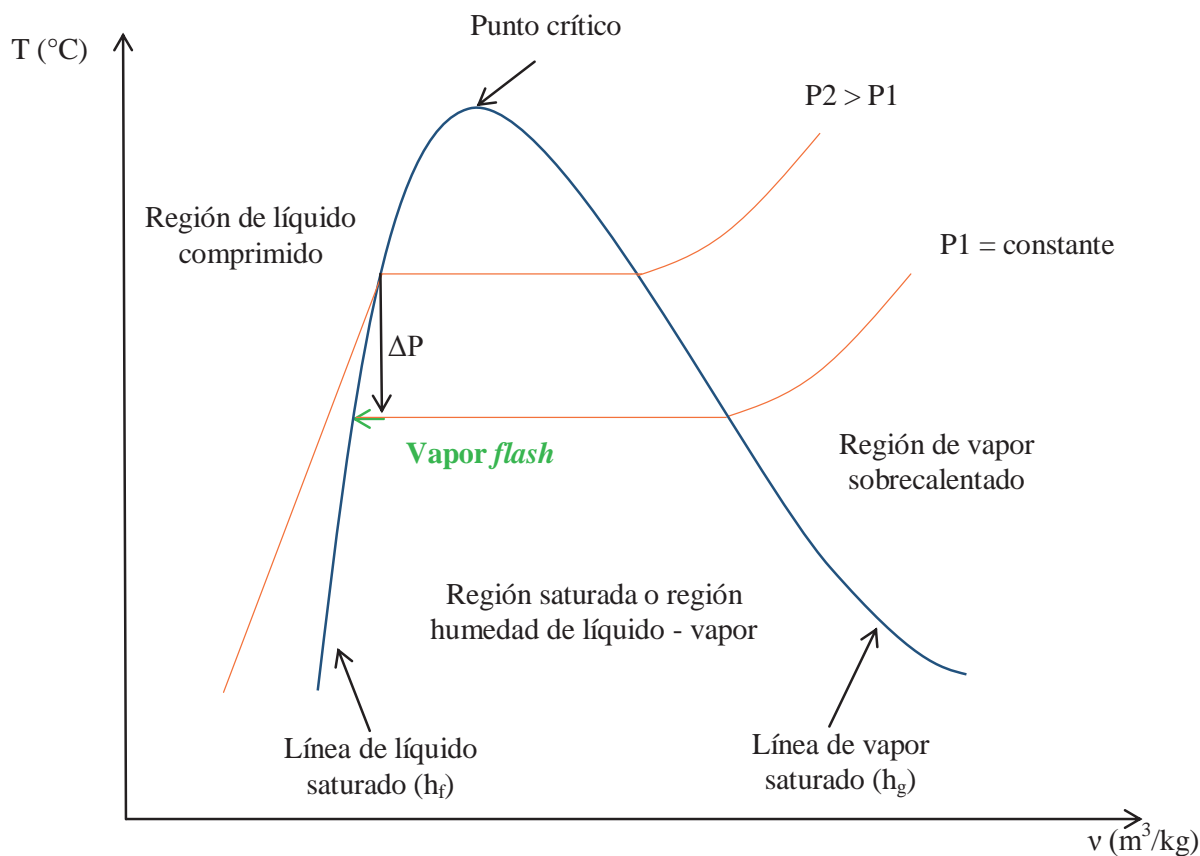
- No necesita energía adicional para su transporte, ya que se distribuye desde el propio caldero de generación.
- No presenta riesgo de incendio.
- Con un sistema de válvulas resulta sencillo el control de la presión y la temperatura del sistema de vapor.
- La obtención del vapor es sencilla, basta con calentar agua en el interior de un caldero hasta alcanzar la temperatura y presión adecuadas.

## **5. VAPOR *FLASH* Y RECUPERACIÓN DE VAPOR CONDENSADO**

Tan pronto como el vapor deja el caldero, empieza a ceder parte de su energía a cualquier superficie con menor temperatura. Al hacer esto, parte del vapor se condensa convirtiéndose en agua, prácticamente a la misma temperatura. Este proceso es el inverso del que tiene lugar en el interior del caldero, cuando el agua en estado líquido se convierte en gaseoso por adición de calor (Martínez, 2009).

Durante los procesos de transferencia de calor a partir de vapor saturado, éste entrega su calor latente (entalpía de evaporación) que representa la mayor proporción de calor total que el vapor contiene. El resto del calor en el vapor, es retenido en el condensado como calor sensible (entalpía del agua) (Metrogas, 2009).

Cuando se tiene vapor condensado o agua hirviendo, presurizados, y se libera a una presión más baja, parte de esos líquidos se vuelven a evaporar, y a esto es a lo que se llama vapor *flash* o vapor secundario (Armstrong, 1998); tal como se muestra en la figura 22.



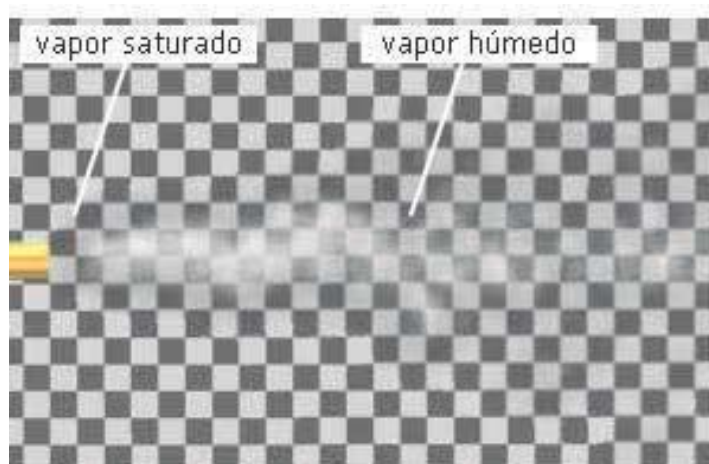
**Figura 22 Formación de vapor *flash* a partir de la caída de presión del vapor condensado**

FUENTE: Cengel, 2009.

El vapor *flash* no es tan diferente del vapor normal, simplemente es un nombre conveniente que es utilizado para explicar cómo se forma el vapor. El vapor normal o “vivo” se genera en el caldero, o en un generador de vapor por recuperación de calor, mientras que el vapor *flash* se genera cuando un condensado de alta presión y temperatura se expone a una gran caída de presión tal como la descarga de una trampa de vapor (Sosa, 2013).

El condensado de alta temperatura contiene una gran energía que no puede permanecer en forma líquida a presiones menores debido a que existe mayor energía que la requerida para obtener agua saturada a una menor presión. El resultado es que algo de este exceso de energía genera en el condensado un porcentaje de vapor *flash*. (Sosa, 2013).

El vapor liberado por las trampas de vapor es generalmente confundido con vapor saturado (vapor vivo) y que en realidad es vapor *flash*. La diferencia entre los dos es que el vapor saturado es invisible en la salida inmediata de la tubería, mientras que el vapor *flash* contiene pequeñas gotas de agua que se forma una vez expuesto al ambiente (figura 23). Así mismo, identifica al vapor *flash* por la reflexión difusa de la luz sobre pequeñas gotas de vapor en el aire que se muestra como una nube blanca. En otras palabras, el vapor *flash* es agua en un estado líquido que flota en aire y se forma cuando tiene agua caliente a una presión determinada y se libera a una presión más baja (Cabrera *et al*, 2012).



**Figura 23 El vapor saturado a la salida de una tubería al ser venteado a la atmósfera**

*FUENTE: Cabrera et al, 2012.*

El calor contenido en el vapor *flash* debe ser motivo de atención para pensar en recuperar el máximo posible. Sin embargo, la mayor dificultad radica en la intermitencia de las descargas, que obliga a disponer de un equipo sobredimensionado de intercambio de calor, o de grandes acumuladores de vapor (Campos, 2008).

El vapor *flash* es importante porque guarda unidades de calor o energía que pueden ser aprovechados para una operación más económica en la fábrica. El vapor *flash* puede ser utilizado para determinado procesos donde no ameriten mucha temperatura. De lo contrario, ésta energía es desperdiciada (Cabrera *et al*, 2012).

La recuperación del condensado puede suponer un ahorro entre el 35 y 50 por ciento de la energía necesaria para la producción de vapor, por lo que resulta imprescindible en cualquier industria su optimización y reutilización (Martínez, 2009).

El consumo de agua para calderos se ve aumentado debido a la disminución de condensado recuperado con lo que se generan mayores costos de producción de vapor (Sánchez *et al*, 2005).

El porcentaje del condensado que se convertirá en vapor *flash* se puede calcular usando la siguiente fórmula (Armstrong, 1998):

$$\% \text{ Vapor Flash} = \frac{(\text{Calor sensible de alta presión} - \text{Calor sensible de baja presión})}{\text{Calor latente de baja presión}} \times 100 \% \quad (2)$$

$$\% \text{ Vapor Flash} = \frac{(h_{f1} - h_{f2})}{(h_{g2} - h_{f2})} \times 100 \% \quad (3)$$

Donde:

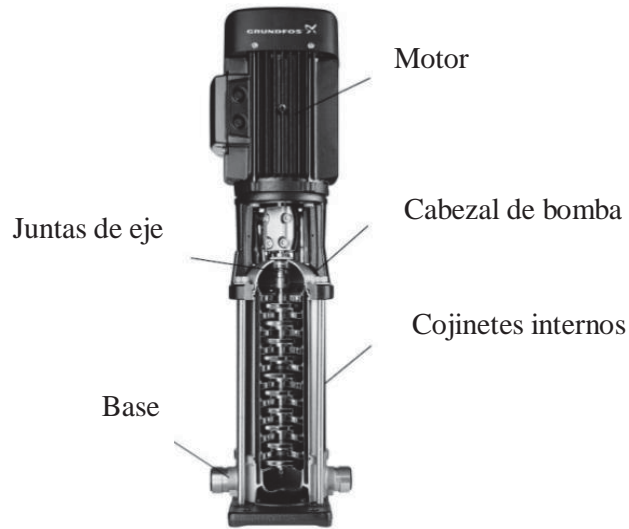
- $h_{f1}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión antes de ser descargado, en kJ/kg.
- $h_{f2}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión a la cual se descarga, en kJ/kg.
- $h_{g2}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión a la cual se descarga, en kJ/kg.

El vapor condensado es agua tratada químicamente (agua blanda) que ha sido filtrada, desmineralizada, desionizada y desaireada, por consiguiente su recirculación al tanque de alimentación significa económicamente un desperdicio de dinero y técnicamente un desperdicio de energía (Barrientos, 2009).

Los recuperadores de energía, son aquellos dispositivos que permite la reutilización del calor residual de un sistema y cuyo objetivo final es alcanzar la eficiencia máxima de la instalación. (Álvarez – Guerra *et al*, 2001).

La instalación de estos equipos de recuperación, permiten el retorno del condensado a una mayor temperatura y presión al caldero. La consecuencia de ésta instalación será la reducción de la energía necesaria para generar vapor en el caldero (KC – A, 2013).

Actualmente, uno de estos tipos de recuperadores, figura 24, provienen de una bomba que llega a operar en condiciones extremas de trabajo de hasta 50 bar de presión y con rango de temperaturas desde – 40 hasta 180 °C (Grundfos, 2012).



**Figura 24 Bomba centrífuga vertical multietápica Grundfos**

*FUENTE: Grundfos, 2012.*

## 6. ENTALPÍA

Mollier se refiere a la entalpía como el contenido de calor y calor total a presión constante (Cengel, 2009).

La entalpía es una propiedad extensiva de gran importancia debido a su utilidad y aplicaciones prácticas en la simulación de procesos; entre ellas la solución de los balances de energía (Molina, 2007).

La entalpía es una función de estado y se obtiene al sumar la energía interna (U) con el trabajo (PV) de expansión; por definición la entalpía total (H) es (Maldonado, 2010):

$$H = U + PV \quad (4)$$

Y la entalpía molar o específica es:

$$h = u + pv \quad (5)$$



Donde:

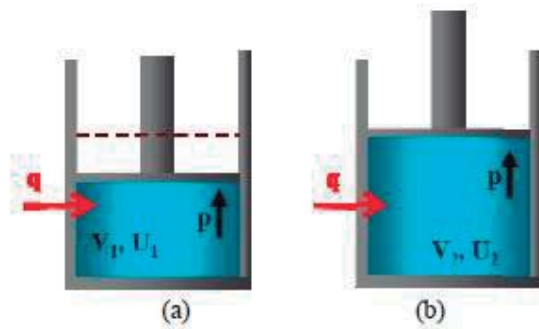
$h$  = Entalpía específica. (J/kg)

$u$  = Energía interna específica. (J/kg)

$pv$  = Trabajo específico (J/kg)

La entalpía total de un sistema no puede ser medida directamente, al igual que la energía interna. En cambio, la variación de entalpía de un sistema sí puede ser medida experimentalmente (Blejec *et al*, 2010).

La variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno. En el caso de un proceso a presión constante, el cambio de entalpía se define como el calor liberado o absorbido por el sistema. Esto se puede demostrar considerando un proceso cuasi estático a presión constante, como el mostrado en la figura 25. Asumiendo que no hay cambios en la energía potencial y energía cinética y aplicando la primera ley de la termodinámica se obtiene lo siguiente (Hernández, 2009):



**Figura 25 Proceso cuasi estático a presión constante (a) estado 1 (b) estado 2**

*FUENTE: Hernández, 2009*

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (6)$$

$$\Delta Q - p\Delta(V) = \Delta E_c + \Delta E_p + U_2 - U_1 \quad (7)$$

$$\Delta Q - p(V_2 - V_1) = \Delta E_c + \Delta E_p + U_2 - U_1 \quad (8)$$

$$\Delta Q = U_2 + pV_2 - (U_1 + pV_1) \quad (9)$$

$$\Delta Q = H_2 - H_1 \quad (10)$$

$$\Delta Q = \Delta H \quad (11)$$

Donde:

$\Delta Q$  = transferencia de calor durante el ciclo.

$\Delta W$  = trabajo realizado durante el ciclo.

$\Delta E_c$  = cambio de la energía cinética durante el ciclo.

$\Delta E_p$  = cambio de la energía potencial durante el ciclo.

$\Delta U$  = cambio de la energía interna del sistema durante el ciclo.

$\Delta H$  = cambio de entalpía durante el ciclo.

$p$  = presión del sistema durante el ciclo.

$V_2$  = volumen en el estado 2.

$V_1$  = volumen en el estado 1.

$U_2$  = energía interna en el estado 2.

$U_1$  = energía interna en el estado 1.

$H_1$  = entalpía en el estado 1.

$H_2$  = entalpía en el estado 2.

## 7. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

### 7.1. BALANCE DE MASA

Muchos sistemas se analizan más adecuadamente como un sistema fijo en el espacio que permite que la masa atraviese las fronteras. A ese sistema se le llama volumen de control. La mayor parte de los sistemas de flujo se analizan con los volúmenes de control. Se debe tener en cuenta los cambios de las propiedades resultantes de los flujos en las entradas y salidas (Howell *et al*, 1990).

Durante un proceso de flujo estacionario (constante), la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control (sistema abierto) no cambia con el tiempo. Entonces el principio de conservación de la masa requiere que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control sea igual a la cantidad total de masa que sale del mismo. Cuando se trata de procesos de flujo estacionario, el interés no se centra en la cantidad de masa que entra o sale de un dispositivo con el tiempo, pero sí se está interesado de la cantidad de masa que fluye por unidad de tiempo, es decir, el flujo másico  $\dot{m}$ . El principio de conservación de la masa para un sistema general de flujo estacionario con entradas y salidas múltiples se puede expresar en forma de tasa como (Cengel, 2009):

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m} \quad (12)$$

La que expresa que la tasa total de masa que entra a un volumen de control es igual a la tasa total de masa que sale del mismo.

### 7.2. BALANCE DE ENERGÍA

El principio de conservación de la energía puede cumplirse en cualquier situación, simplemente mediante el cambio o nueva definición de lo que se entiende por energía, en tal forma que ésta se conserve en cualquier circunstancia. El principio de conservación parte de dos suposiciones importantes. La primera se refiere a que la energía es algo que está “contenido” Cierta sistema definido “tiene” energía. La segunda suposición es que debe existir un sistema bien especificado que contiene esa energía. Para aplicar el principio de

conservación de la energía, el usuario debe definir el espacio o el material de interés que “contiene” esa energía (Howell *et al*, 1990).

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso (Cengel, 2009).

El principio de conservación de la energía se expresa: el cambio neto (incremento/disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso, es decir (Cengel, 2009):

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad (13)$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere.

Así mismo, para determinar el cambio de energía en un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al principio y al final y encontrar su diferencia. Es decir (Cengel, 2009):

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} \quad (14)$$

### **7.3. ENERGÍA TRANSPORTADA POR LA MASA**

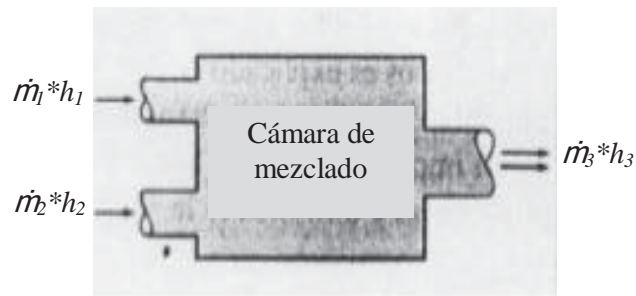
La transferencia de masa puede suceder simultáneamente con la transferencia de calor, ya sea como resultado de una diferencia de temperatura impuesta desde fuera o debido a la absorción o evolución de calor, lo cual generalmente sucede cuando una sustancia se transfiere de una fase a otra. En tales casos, dentro de una fase, el calor transferido es resultado, no sólo de la conducción (convección) debida a la diferencia de temperatura que

ocurriría en ausencia de transferencia de masa, sino que también incluye el calor sensible acarreado por latería en difusión (Treybal, 1988).

Como “h” es la energía total por unidad de masa, la energía total de un fluido en movimiento de masa “m” es simplemente “m\*h”, siempre y cuando las propiedades de la masa “m” sean uniformes:

$$E_{masa} = m * h \text{ (kJ)} \quad (15)$$

En las aplicaciones de ingeniería, mezclar dos corrientes de fluido no es raro. La sección donde el proceso de mezclado tiene lugar se conoce como “cámara de mezclado”, la cual no tiene que exactamente una “cámara” (figura 26). Una tubería ordinaria en forma de “T” o en “Y” de una regadera, o tubería, por ejemplo, sirven como cámara de mezclado para las corrientes de agua fría y caliente (Cengel, 2009).



**Figura 26 Diagrama de una cámara de mezclado**

*FUENTE: Cengel, 2009.*

El principio de conservación de energía requiere que en la ecuación de balance, las energías totales de las corrientes entrantes y la mezcla que sale sean iguales entre sí.

$$E_{entrada} = E_{salida}$$

$$\dot{m}_1 * h_1 + \dot{m}_2 * h_2 = \dot{m}_3 * h_3 \quad (16)$$

## **8. AHORROS DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA PAPELERA**

La industria papelera consume energía en una doble vertiente: electricidad para mover la maquinaria y vapor para secar el papel. El impacto del uso, cada vez mayor, de materiales reciclado puede variar grandemente, dependiendo del grado del papel y de la localización de la fábrica. El pulpeado de papel de desperdicio usa mucha menos electricidad por tonelada de pulpa que el originado por pulpeado mecánico y termodinámico, pero generalmente al más que el originado con pulpeado químico. Sin embargo, el uso de fibras recicladas elimina los requerimientos de electricidad en preparación de madera virgen. El mayor uso en materiales reciclado reduce el requerimiento de electricidad por tonelada de producto. Sin embargo, y debido a que resulta en menos desperdicio de madera para uso en la cogeneración, el uso de materiales reciclado puede, en algunos casos, conducir a una mayor demanda por electricidad comprada. (Campos, 2008).

Manríquez, 1999, presenta resultados en medidas de ahorro de energía ejecutadas en una empresa papelera. Se redujo la facturación de gastos de demanda eléctrica así como también una mejoría en la eficiencia de su caldero. Los cuales presentaron, durante los meses de noviembre de 1998 a octubre de 1999, un ahorro de \$ 36 333, proyectándose para los próximos años a \$ 56 725/año.

Valdivia, 2002, menciona que efectuadas las medidas de ahorro energético en la “Industrial Papelera Atlas S.A.” los montos obtenidos llegaron a \$ 13 736/año menos en el consumo anual facturado por mejoras en energía eléctrica, y \$ 27 746/año en energía térmica por la reducción de fugas de vapor, pérdidas de calor y recuperación de condensados. Así mismo, se presentan recomendaciones de mejoras potenciales con los cuales tendrían un ahorro global de hasta \$ 1 104 608/año.

Rodríguez, 2008, indica que del total de energía consumida por una fábrica de papel, el 25 por ciento corresponde a electricidad y el 75 por ciento a energía térmica. Estos equivalen al 42 y 58 por ciento en facturación de energía, respectivamente. En ésta fábrica se realizaron medidas de ahorros de energía, alcanzando disminuir su facturación en 19,8 por ciento correspondiente a la energía eléctrica que equivale a  $2,6 \times 10^3$  MW.h/año y 5.4 por ciento en energía térmica que equivale a  $5,8 \times 10^4$  galones de petróleo residual/año. Existiendo ahorros potenciales en el consumo de electricidad que en conjunto puede alcanzar el 28 por

ciento, que en el caso de ésta planta consume 311 MW.h/mes, representaría  $4,2 \times 10^4$  S./mes. Del mismo modo, existen ahorros potenciales en el consumo de combustible que en conjunto puede alcanzar el 45 por ciento, y que en el mencionado caso consume  $8,99 \times 10^4$  galones de petróleo por mes representaría  $9,33 \times 10^4$  S./mes.

Para ésta misma fábrica se realizó un análisis económico del cambio de uso de PR 500 (petróleo residual 500), el cual facturaba  $3,88 \times 10^5$  soles/mes, a gas natural como combustible usado para generación de energía térmica. El resultado del análisis presenta un ahorro equivalente al 54 por ciento del monto facturado, además de la reducción de gases contaminantes.

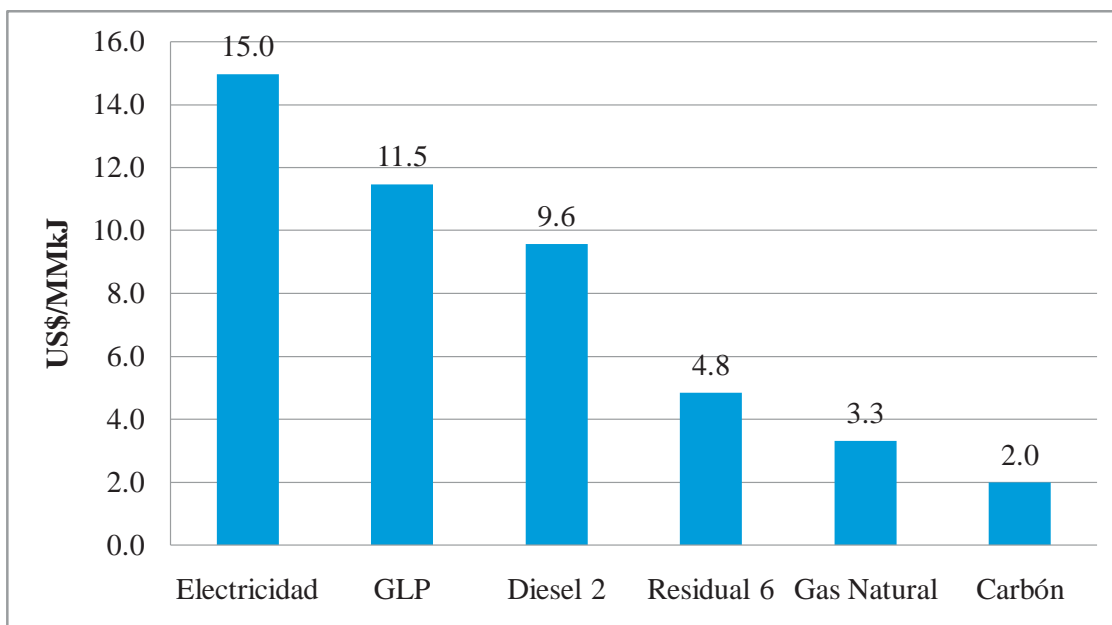
El uso de gas natural en el sector industrial permite obtener ahorros significativos de, 50 a 70 por ciento, con respecto al uso de otros combustibles, para lo cual se deberán hacer inversiones en la adecuación de las instalaciones industriales a gas natural (Rodríguez, 2008).

Hoy en día el gas natural es la mejor elección de energía ambiental limpia. El uso progresivo del gas natural puede evitar muchas preocupaciones a nivel mundial, tales como el efecto invernadero que está produciendo el calentamiento global y cambio climático en el planeta tierra, la lluvia ácida y las diversas emisiones. La composición química simple y natural hace que el gas natural sea un combustible inherentemente limpio, eficiente y barato, tiene menos emisiones que el carbón o el petróleo, que no se queman del todo y sus contaminantes son llevadas a la atmósfera. Por el contrario, la combustión del gas natural prácticamente no tiene emisiones atmosféricas de dióxido, y muchas menos emisiones de monóxido de carbón, hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono, comparado con la combustión de otros combustibles fósiles. Además, el gas natural tiene un precio de mercado menos al de cualquier otro combustible fósil, es seguro, reduce los costos de mantenimiento, por ejemplo en el parque automotor se reduce entre el 20 y 30 por ciento, aumenta la eficiencia en el proceso de generación de energía, reduce los costos de operación, es de fácil conexión a través de tuberías, no requiere de almacenamientos costosos, tiene aplicación universal en todo tipo de maquinarias y vehículos donde es necesaria la energía. (Andrés *et al*, 2007).

En el Perú, la demanda de gas natural de Camisea proviene principalmente de su uso en la generación de electricidad (a través de centrales o ciclo simple combinado), el consumo ha

sido aproximadamente el 60 por ciento del gas natural; en el sector industrial casi el 40 por ciento. Sin embargo, también existe una importante demanda potencial de gas natural a nivel urbano, representado por el consumo en los segmentos comercial y residencial de sólo el uno por ciento. En cuanto al consumo de gas natural vehicular (GNV) para uso de transporte automotriz irá incrementándose conforme se desarrolle la red de distribución (Andrés *et al*, 2007).

García *et al*, 2004, realizó un análisis de la competitividad del gas natural con otros combustibles utilizados por la gran industria, en el Perú (figura 27). Como se puede apreciar, el gas es más económico que todos los demás combustibles, a excepción del carbón, cuyo costo es bastante menor.



**Figura 27 Comparación de costos de combustibles para usuarios gran industria**

*Fuente: García et al, 2004.*



### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1. LUGAR DE ESTUDIO**

La presente investigación se realizó en las instalaciones de una empresa<sup>1</sup> dedicada a la fabricación de papel *tissue*, ubicada en la provincia Constitucional del Callao, Perú.

#### **2. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA EMPRESA**

La fábrica papel es una empresa dedicada la fabricación de papel *tissue* desde 1966. La materia prima utilizada para la elaboración de sus diferentes productos (papel higiénico, papel toalla, servilletas, bobinas) es 100 por ciento material reciclado.

Actualmente viene operando con dos máquinas papeleras, además de una completa planta de conversión, con las cuales obtienen a una producción promedio de 25 – 30 toneladas diariamente.

---

<sup>1</sup> “Papelera Reyes S.A.C.”

### **3. MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **3.1. MATERIALES**

- Tablero de apuntes.
- Material de escritorio.
- Chemalogic Steamtab Companion (2003).
- Datos sobre el Sistema de Vapor.

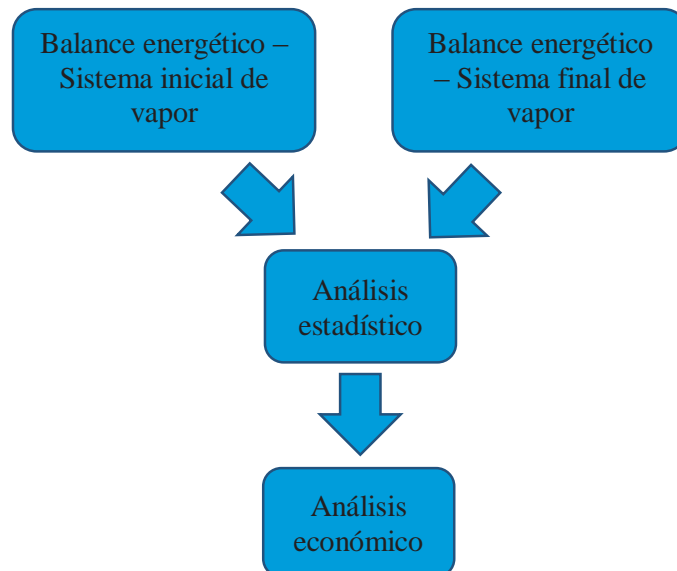
#### **3.2. EQUIPOS**

- Computador portátil para el cálculo de los diferentes análisis.
- Caldero pirotubular.
- Cilindro secador *Yankee*.
- Tanque de recuperación de condensados.
- Tanque de alimentación de agua al caldero.
- Bomba centrífuga vertical multi-etápica.

## 4. METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó en diferentes fases, las cuales consistieron en:

- 1) Recopilación en planta de toda la data necesaria que determinaron los parámetros (presión de caldero, flujo de vapor, temperatura del tanque de alimentación, etc.) con los cuales los diferentes equipos y maquinarias estuvieron operando durante el tiempo analizado.
- 2) Desarrollo del procedimiento para determinar el ahorro de energía, tal como se explica en el diagrama de flujo en la figura 28, considerando:
  - El balance de energía en función del sistema inicial y final del vapor.
  - Análisis estadístico con la información generada para determinar la existencia de una diferencia significativa entre ambos sistemas.
  - De acuerdo a los resultados obtenidos, se determinó el ahorro económico comparando el procedimiento evaluado frente al uso de una bomba centrífuga vertical multi-etápica (equipo que actualmente opera en la planta).



**Figura 28 Diagrama de la metodología aplicada para la determinación del ahorro energético**

#### **4.1. ANÁLISIS ENERGÉTICO**

El procedimiento del análisis se realizó según lo hecho por Villacrés (2008) en el cual, para el presente estudio, se debió recopilar los datos históricos de los siguientes parámetros de los equipos y sistema de vapor:

- Capacidad instalada de generación de vapor, en BHP.
- Presión de operación del caldero, en bar.
- Presión de operación del cilindro secador *Yankee*, en bar.
- Presión de tanque de recuperación de condensados, en bar.
- Presión de descarga de condensado, en bar.
- Eficiencia del caldero.
- Flujo de vapor, en kg/h.
- Porcentaje de retorno de condensado.
- Temperatura del agua en el tanque de alimentación.

##### **4.1.1. ANÁLISIS ENERGÉTICO – SISTEMA INICIAL DE VAPOR**

Previo a la realización del análisis energético del sistema inicial de vapor se tuvo en cuenta que todo el vapor condensado retorna al tanque de alimentación, cuya presión es de 1,01 bar, para luego retornar al caldero tal como se muestra en la figura 29.

El calor total inicial producido por el caldero está dado por la siguiente ecuación (Rodríguez, 2006):

$$\text{Eficiencia del caldero} = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Caldero}} = \frac{Q_{U1}}{Q_{T1}} \quad (17)$$

$$Q_{T1} = \frac{Q_{U1}}{\eta_{\text{Caldero}}} \text{ (kJ/h)} \quad (18)$$

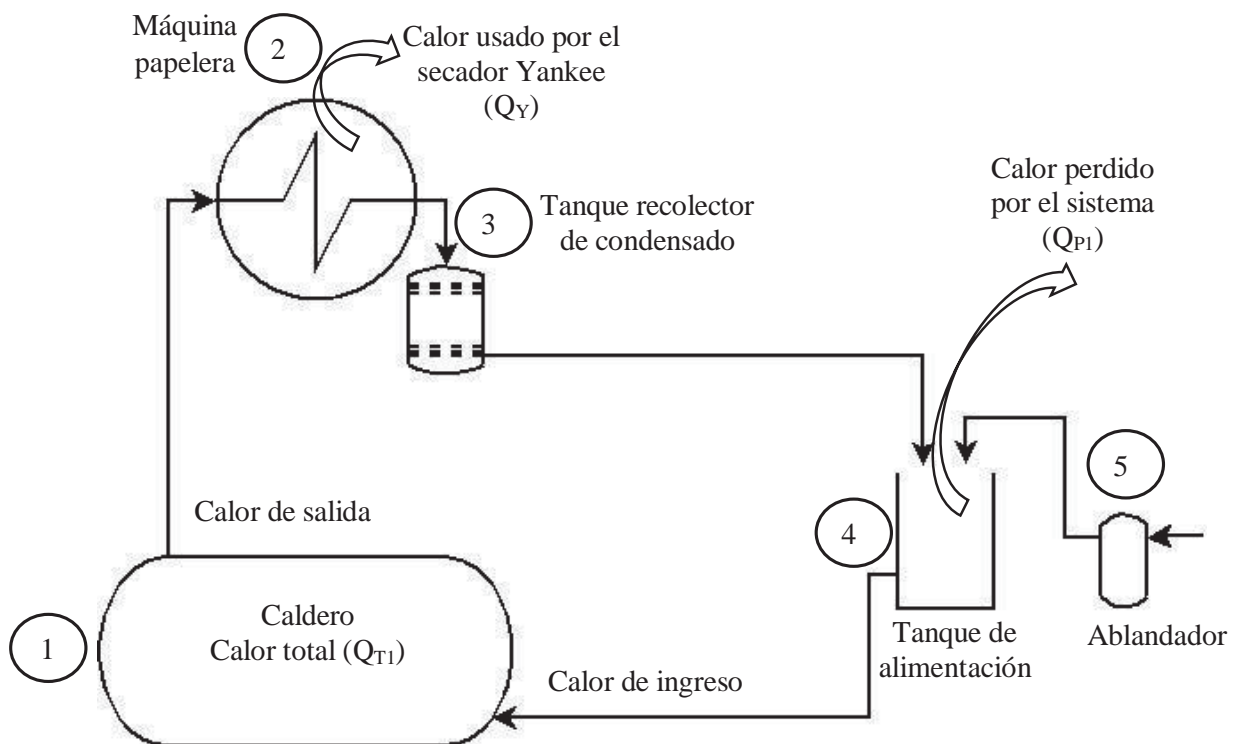
Donde:

$Q_{T1}$  = Calor total inicial, en kJ/h.

$Q_{U1}$  = Calor útil inicial, en kJ/h.

$\eta_{\text{Caldero}}$  = Eficiencia del caldero (80 por ciento según Cleaver-brooks, 2005).

Las condiciones del sistema inicial del vapor se presentan en el siguiente diagrama:



**Figura 29 Diagrama del sistema inicial del vapor**

Se procedió a calcular el calor útil inicial ( $Q_{UI}$ ) sabiendo que (Cengel, 2009):

$$Q_{UI} = (\text{Calor de salida} - \text{calor de ingreso}) \text{ (kJ/h)} \quad (19)$$

$$Q_{UI} = [(\dot{m}^* (h_{g1}) - \dot{m}^* (h_{f4}))] \text{ (kJ/h)} \quad (20)$$

$$Q_{UI} = [\dot{m}^* (h_{g1} - h_{f4})] \text{ (kJ/h)} \quad (21)$$

Donde:

$Q_{UI}$  = Calor útil inicial, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a presión del caldero, en kJ/kg.

$h_{f4}$  = Entalpía del líquido saturado a temperatura del tanque de alimentación, en kJ/kg.

El calor total inicial producido por el caldero se determina por:

$$Q_{TI} = \frac{Q_{UI}}{\text{caldero}} \text{ (kJ/h)} \quad (18)$$

$$Q_{TI} = \frac{Q_{UI}}{80\%} \text{ (kJ/h)} \quad (22)$$

Para determinar el calor perdido por el sistema inicial de vapor ( $Q_{PI}$ ), primeramente se debe calcular la cantidad de vapor *flash* perdido por el sistema inicial de vapor.

El porcentaje de vapor *flash* perdido por el sistema inicial de vapor, se determinó mediante la siguiente fórmula (Armstrong, 1998):

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = \frac{(\text{Calor sensible de alta presión} - \text{Calor sensible de baja presión})}{\text{Calor latente de baja presión}} \times 100 \% \quad (23)$$

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = \frac{(h_{f3} - h_{f4})}{(h_{g4} - h_{f4})} \times 100 \% \quad (24)$$

Donde:

$\% \text{ Vapor flash}_1$  = Porcentaje de vapor *flash* perdido por el sistema inicial de vapor.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

$h_{f4}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$h_{g4}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación, en kJ/kg.

Para calcular la cantidad de condensado perdido a la atmósfera como vapor *flash* ( $\dot{m}_{flash1}$ ), se utilizó la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_{flash1} = (\text{cantidad de retorno de condensado} * \% \text{ Vapor Flash}_1) \text{ (kg/h)} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{flash1} = (\text{Flujo de vapor} * \text{porcentaje de retorno de condensado} * \% \text{ Vapor Flash}_1) \text{ (kg/h)} \quad (26)$$

El valor del calor perdido por el sistema inicial de vapor ( $Q_{P1}$ ) se determina por (Cengel, 2009):

$$Q_{P1} = (\dot{m}_{flash1} * h_{g4}) \text{ (kJ/h)} \quad (27)$$

Donde:

$Q_{PI}$  = Calor perdido por el sistema inicial de vapor, en kJ/h.

$\dot{m}_{lashI}$  = Cantidad de condensado perdido en el sistema inicial de vapor, en kg/h.

$h_{g4}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación en kJ/kg.

Así mismo, el calor usado por el *Yankee* ( $Q_Y$ ) está determinado por (Cengel, 2009):

$$Q_Y = [\dot{m}^* (h_{g2} - h_{\beta})] \text{ (kJ/h)} \quad (28)$$

Donde:

$Q_Y$  = Calor usado por el *Yankee*, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g2}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del *Yankee*, en kJ/kg.

$h_{\beta}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

#### 4.1.2. ANÁLISIS ENERGÉTICO – SISTEMA FINAL DE VAPOR

Para el análisis energético del sistema final de vapor se debe considerar que el vapor condensado proveniente del secador *Yankee* retorna directamente al caldero debido a la función realizada por la bomba centrífuga vertical multi-etápica, tal como se muestra en la figura 30.

El calor total producido por el sistema final de vapor está dado por la siguiente ecuación (Rodríguez, 2006):



$$\text{Eficiencia del caldero} = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Caldero}} = \frac{Q_{U2}}{Q_{T2}} \quad (29)$$

$$Q_{T2} = \frac{Q_{U2}}{\eta_{\text{Caldero}}} \quad (\text{kJ/h}) \quad (30)$$

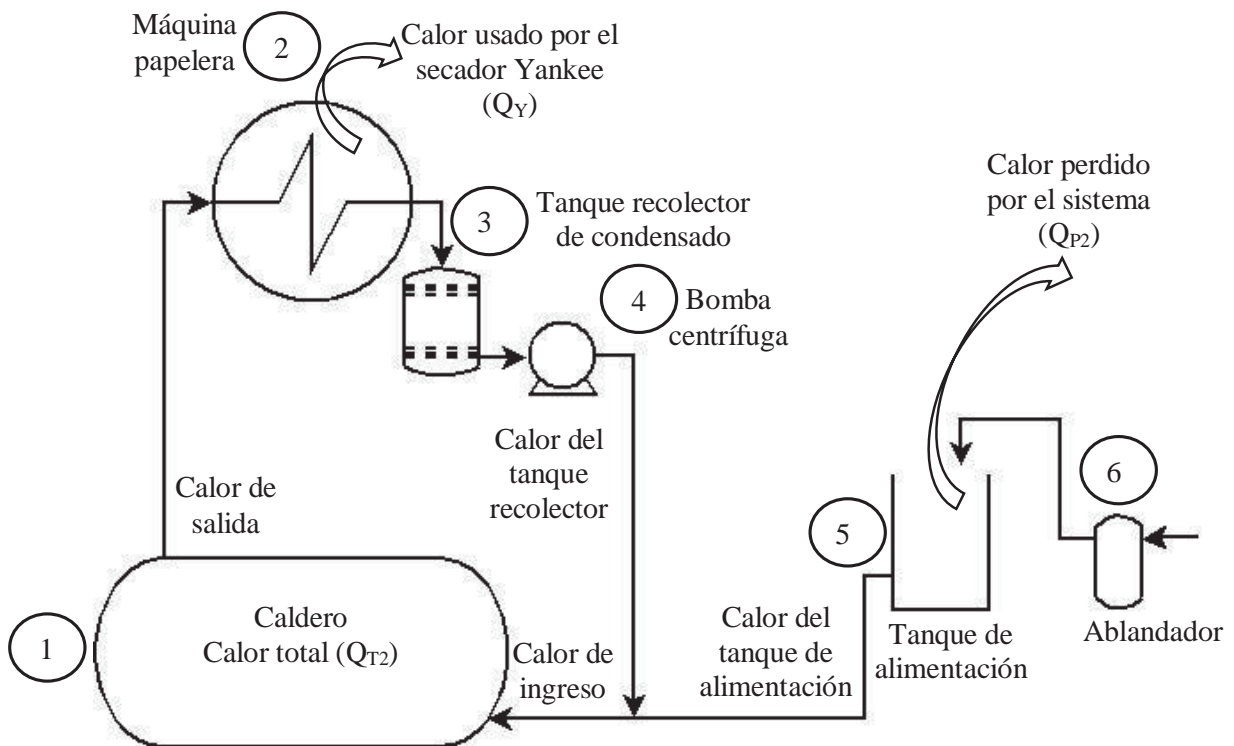
Donde:

$Q_{T2}$  = Calor total final en kJ/h.

$Q_{U2}$  = Calor útil final en kJ/h.

$\eta_{\text{Caldero}}$  = Eficiencia del caldero (80 por ciento según Cleaver-brooks, 2005).

Las condiciones del sistema inicial vapor se presentan en el siguiente diagrama:



**Figura 30 Diagrama del sistema final del vapor**

La determinación del calor perdido por el sistema final de vapor ( $Q_{p2}$ ) se realiza del mismo modo que en el sistema inicial, pero considerando la función realizada por la bomba centrífuga vertical multi-etápica.

$$\% \text{ Vapor Flash}_2 = \frac{(\text{Calor sensible de alta presión} - \text{Calor sensible de baja presión})}{\text{Calor latente de baja presión}} \times 100 \% \quad (31)$$

$$\% \text{ Vapor Flash}_2 = \frac{(h_{f3} - h_{f1})}{(h_{g5} - h_{f1})} \times 100 \% \quad (32)$$

Donde:

$\% \text{ Vapor flash}_2$  = Porcentaje de vapor *flash* perdido por el sistema final de vapor.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

$h_{f1}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del caldero, en kJ/kg.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero, en kJ/kg.

Para calcular la cantidad de condensado perdido a la atmósfera como vapor *flash*, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_{flash2} = (\text{cantidad de retorno de condensado} * \% \text{ Vapor Flash}_2) \text{ (kg/h)} \quad (33)$$

$$\dot{m}_{flash2} = (\text{Flujo de vapor} * \text{porcentaje de retorno de condensado} * \% \text{ Vapor Flash}_2) \text{ (kg/h)} \quad (34)$$

El valor del calor perdido por el sistema final de vapor ( $Q_{P2}$ ) se determina por (Cengel, 2009):

$$Q_{P2} = (\dot{m}_{flash2} * h_{g5}) \text{ (kJ/h)} \quad (35)$$

Donde:

$Q_{P2}$  = Calor perdido por el sistema final de vapor.

$\dot{m}_{flash2}$  = Cantidad de condensado perdido en el sistema final de vapor, en kg/h.

$h_{g5}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación en kJ/kg.

Se procedió a calcular el calor útil final ( $Q_{U2}$ ) sabiendo que (Cengel, 2009):

$$Q_{U2} = (\text{Calor de salida} - \text{calor de ingreso}) \text{ (kJ/h)} \quad (36)$$

$$Q_{U2} = [\dot{m} * (h_{g1}) - \dot{m} * (h_i)] \text{ (kJ/h)} \quad (37)$$

$$Q_{U2} = [\dot{m} * (h_{g1} - h_i)] \text{ (kJ/h)} \quad (38)$$

Donde:

$Q_{U2}$  = Calor útil final, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a presión del caldero, en kJ/kg.

$h_i$  = Entalpía de equilibrio al ingreso del caldero, en kJ/kg.

El valor de la entalpía de equilibrio ( $h_i$ ) es el resultado de la interacción entre el valor energético entregado por el vapor condensado proveniente del tanque recolector y el entregado por el tanque de alimentación, obteniéndose a partir de la siguiente ecuación (Cengel, 2009):

Calor de ingreso = calor del tanque recolector + calor del tanque de alimentación (kJ/h)

$$\dot{m} * h_i = (\dot{m}_r * h_{f3} + \dot{m}_t * h_{f5}) \text{ (kJ/h)} \quad (39)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_i$  = Entalpía de equilibrio al ingreso del caldero, en kJ/kg.

$\dot{m}_r$  = Cantidad de retorno de condensado, en kg/h.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a presión del tanque recolector, en kJ/kg.

$\dot{m}_t$  = Cantidad de agua de alimentación, en kg/h.

$h_{f5}$  = Entalpía del líquido saturado a la temperatura del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$$h_i = \frac{(r * h_{f3} + t * h_{f5})}{100} \text{ x } 100 \% \text{ (kJ/kg)} \quad (40)$$

El calor total final producido por el caldero se determina por:

$$Q_{T2} = \frac{QU2}{\text{caldero}} \text{ (kJ/h)} \quad (30)$$

$$Q_{T2} = \frac{QU2}{80 \%} \text{ (kJ/h)} \quad (41)$$

## 4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 4.2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el presente estudio se desarrolló un diseño experimental simple con una comparación de medias relacionadas, y en las que las unidades de observación fueron asignadas de manera no aleatoria. Se consideró al calor total inicial ( $Q_{T1}$ ) como el pre-test y calor total final ( $Q_{T2}$ ) como el post-test.

### 4.2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la comparación de los calores totales generados por el caldero se aplicó la prueba estadística  $t$  – Student para medias relacionadas, con apoyo del *software* SPSS, con un nivel de confianza de 95 por ciento de probabilidad ( $\alpha = 0,05$ ).

La hipótesis nula ( $H_0$ ) es si los calores totales generados por el caldero son iguales:

$$H_0: Q_{T1} = Q_{T2}$$

La hipótesis alterna ( $H_1$ ) es si los calores totales generados por el caldero son diferentes:

$$H_1: Q_{T1} \neq Q_{T2}$$

Donde:

$Q_{T1}$  = Calor Total generado por el sistema inicial del vapor.

$Q_{T2}$  = Calor Total generado por el sistema final del vapor.

### 4.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Mediante los análisis energéticos previamente determinados en los dos sistemas de vapor, se determina el ahorro neto mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ahorro Neto} = (Q_{T1} - Q_{T2}) \text{ (kJ/h)} \quad (42)$$

En el presente estudio, la papelera utiliza gas natural como fuente de energía para la producción de vapor. La eficiencia del contenido energético del presente combustible usado en el caldero es de:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de Gas Natural} = 3,73 \times 10^4 \text{ kJ}$$

Por lo tanto:

$$\text{Ahorro Neto} = \frac{(Q_{T1} - Q_{T2}) \text{ (kJ/h)}}{3,73 \times 10^4 \text{ (kJ/m}^3\text{)}} \quad (43)$$

$$\text{Ahorro Neto} = \text{m}^3/\text{h}$$

Así mismo, el costo del Gas Natural por  $\text{m}^3$  consumido es:

$$\text{Costo del Gas Natural} = 0,56 \text{ \$/m}^3 \text{ (fuente, Cálidda)}$$

$$\text{Ahorro Neto} = \text{m}^3/\text{h} * 0,56 \text{ \$/m}^3 \quad (44)$$

$$\text{Ahorro Neto} = \text{\$/h}$$

Así mismo, considerando que el tiempo de operación del caldero es de 24 horas al día, 30 días al mes y 12 meses al año, se obtiene el siguiente Ahorro Neto:

$$\text{Ahorro Neto} = \$/h * 24 \text{ h/d} * 30 \text{ d/mes} * 12 \text{ meses/año} \quad (45)$$

$$\text{Ahorro Neto} = \$/\text{año}$$





## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE VAPOR

#### 1.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA INICIAL DE VAPOR

En la figura 31 se presenta el diagrama del sistema inicial de vapor con el que la papelera estuvo fabricando papel *tissue* hasta mediados del 2012. El vapor condensado proveniente del *Yankee* era almacenado en el tanque de alimentación. Debido a que el vapor condensado recuperado contiene un punto de líquido saturado mayor al momento de ser descargado en el tanque de alimentación, éste debe liberar el exceso de energía contenido para igualar las condiciones finales de descarga, tal como lo indica Sosa, 2013.

Una importante cantidad de vapor condensado era liberado a la atmósfera: aproximadamente el 10,1 por ciento del retorno de condensado equivalente a  $2,36 \times 10^2$  kg de vapor, los cuales eran venteados a la atmósfera durante cada hora de producción de papel. Este valor en energía es igual a  $6,32 \times 10^5$  kJ de vapor *flash* liberado cada hora ( $Q_{P1}$ ). Cabrera *et al*, 2012, indica que el vapor *flash* es importante porque guarda unidades de calor o energía que pueden ser aprovechados para una operación más económica en la fábrica; de lo contrario ésta energía es desperdiciada.

El cilindro secador *Yankee* ( $Q_Y$ ) utiliza la mayor cantidad de calor en el proceso con valores promedios de  $7 \times 10^6$  kJ/h de calor a partir de los  $3,32 \times 10^3$  kg de vapor saturado, suministrado por el caldero, por cada hora de producción; siendo el punto de mayor consumo de energía en la fábrica de papel, como lo indica Hill, 2006.

Previamente el caldero debe suministrar  $9,2 \times 10^6$  kJ/h. Para ello, el caldero debe generar un calor útil ( $Q_{UI}$ ) de  $7,82 \times 10^6$  kJ/h a partir de los  $9,78 \times 10^6$  kJ/h de calor total producido ( $Q_{TI}$ ), ya que el agua de alimentación llega a suministra  $1,38 \times 10^6$  kJ/h. La relación entre la energía del vapor flash liberado, en comparación con el calor total generado es 6, 97 por ciento.

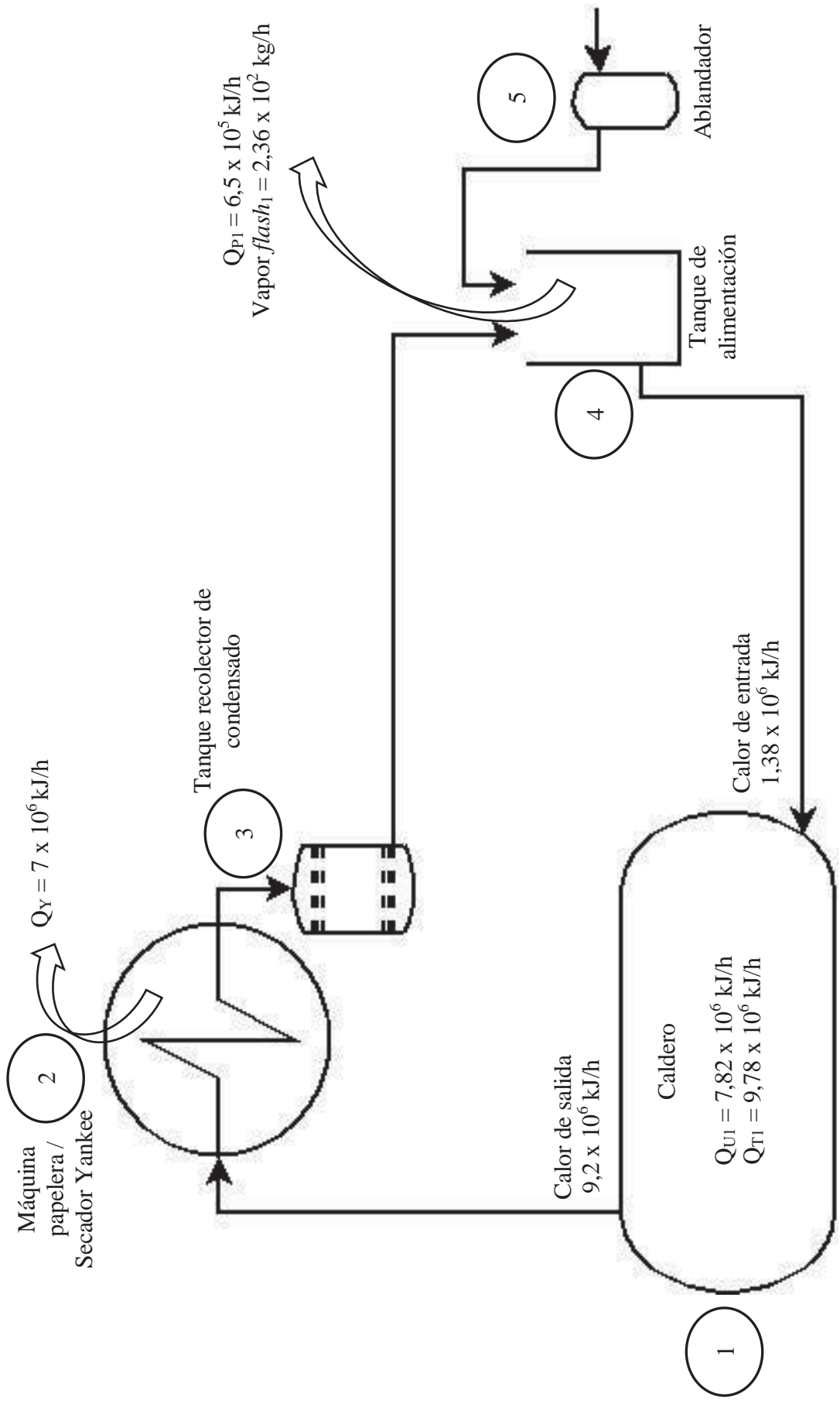


Figura 31 Sistema inicial de Generación de vapor del presente estudio.

## 1.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FINAL DE VAPOR

Actualmente, el sistema de vapor presenta muchas modificaciones; una de las principales es la que se muestra en la figura 32, la cual se caracteriza por la instalación de la bomba centrífuga vertical multi-etápica a la salida del tanque de recolector de condensados. El uso de éste equipo permite la reutilización del calor residual del sistema (Álvarez - Guerra *et al*, 2001) reingresando el vapor condensado, proveniente del cilindro secador *Yankee*, directamente al caldero. De ésta manera se evitan las pérdidas de calor producto de la caída de presión en el momento de la descarga del vapor condensado en el tanque de alimentación.

Dado que se presenta un sistema de vapor cerrado, evitándose la liberación de condensado presurizado a una presión más baja y que no hay líquidos que se vuelvan a evaporar, tal como lo indica Armstrong (1998), los valores del calor ( $Q_{P2}$ ) y vapor *flash* perdidos en el sistema son cero.

El calor recuperado se refleja en el aumento del calor de entrada del caldero. Esto a partir de un mayor valor de la entalpía del fluido, provenientes del calor recuperado del tanque recolector y tanque de alimentación, al momento de ingresar al caldero. Es así que los  $1,93 \times 10^6$  kJ/h de calor de ingreso permiten una menor producción de calor útil,  $Q_{U2} = 7,28 \times 10^6$  kJ/h, y por lo tanto de calor total,  $Q_{T2} = 9,09 \times 10^6$  kJ/h. Este valor es menor al calor total inicial generado por el caldero, tal como lo ocurrido en una fábrica de papel el cual recupera el vapor condensado (KC - A, 2013).

La distribución de los calores totales generados por ambos sistemas se muestran gráficamente en la figura 33. En el se confirma lo dicho por Sánchez *et al* (2005) quién menciona que el consumo de agua, y energía, para calderos se ve aumentado debido a la disminución del condensado recuperado con lo que se generan mayores costos de producción de vapor. Además, se refleja la mejora de la eficiencia energética como lo mencionado por Hill, 2006.

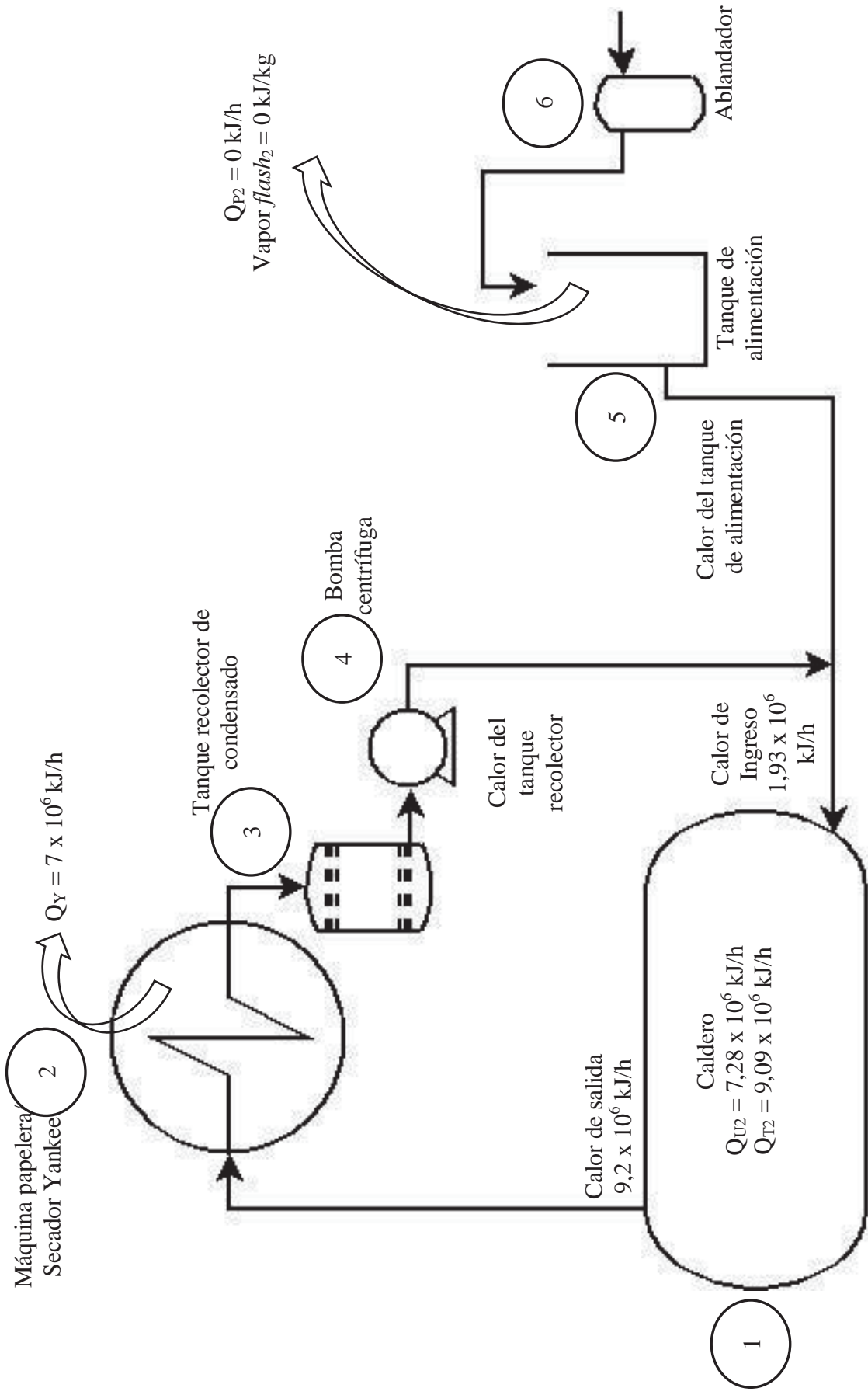


Figura 32 Sistema final de Generación de vapor del presente estudio

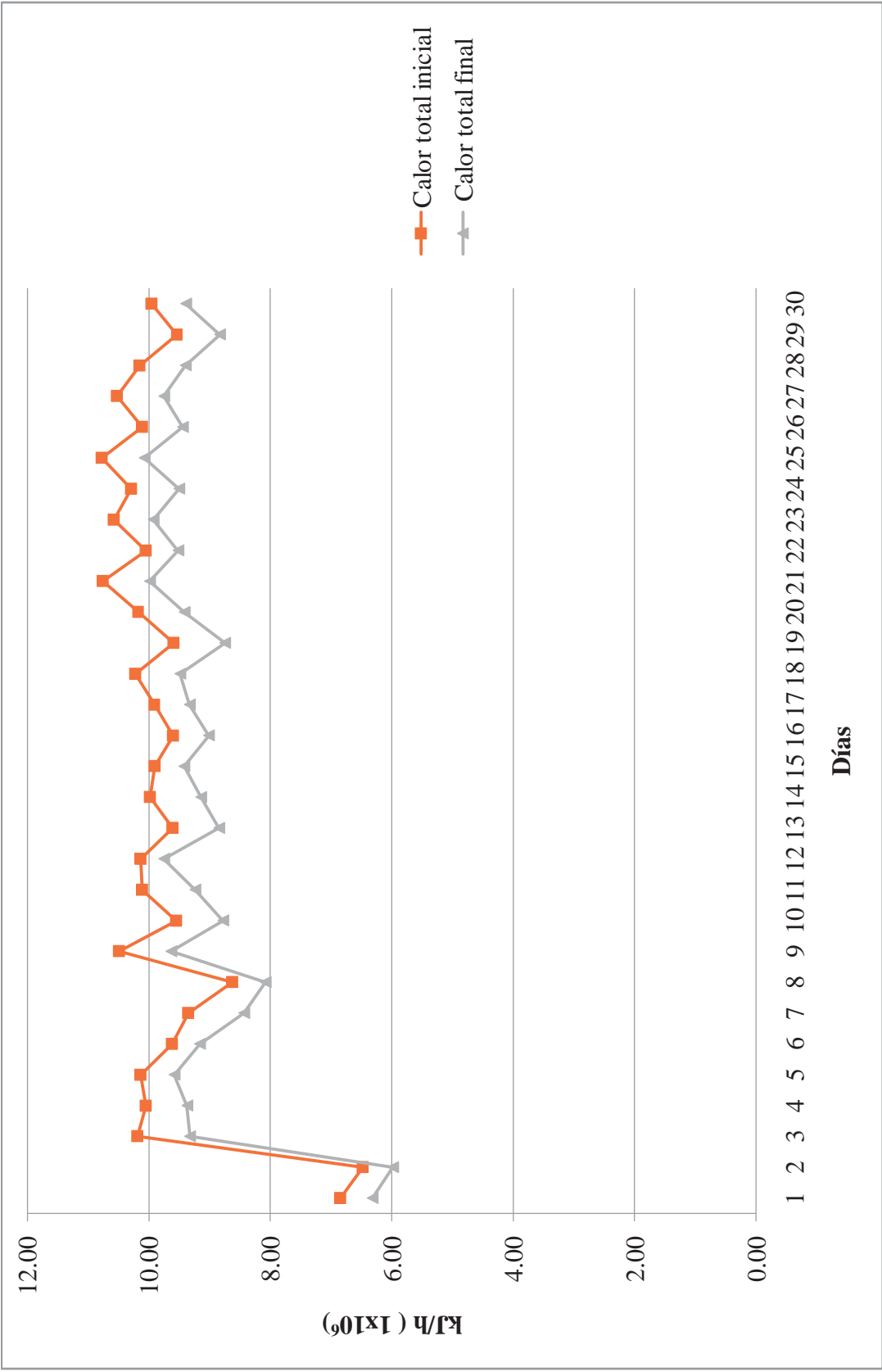


Figura 33 Calor total generado por el caldero

## 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En la tabla 1 se presentan los valores de la prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov. En el análisis estadístico, se utilizaron para comparación, los calores totales generados por cada sistema. Con estos datos se determinó la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre ambos promedios.

Primero, se utilizó la prueba de Kolmogorov – Smirnov para determinar si los calores totales generados tienen una distribución Normal, obteniendo:

**Tabla 1 Pruebas de normalidad Kolmogorov - Smirnov**

	<i>Estadístico</i>	<i>GL</i>	<i>Sig.</i>
Q <sub>T1</sub>	0,268	30	$7,78 \times 10^{-6}$
Q <sub>T2</sub>	0,220	30	$7,02 \times 10^{-4}$

Donde:

Q<sub>T1</sub>: Calor total generado por el sistema inicial de vapor.

Q<sub>T2</sub>: Calor total generado por el sistema final de vapor.

GL: Grados de libertad.

Sig: Valores de probabilidad.

Los valores de probabilidad (p – value) para ambos sistemas ( $7,78 \times 10^{-6}$  y  $7,02 \times 10^{-4}$  respectivamente) son menores al valor alfa de significancia (0,05) lo que explica que los calores totales generados por ambos sistemas no presentan una distribución Normal (Anexo 5).

Dado que la suposición de normalidad no se puede justificar, según la prueba de Kolmogorov – Smirnov, se procedió a realizar la prueba de Wilcoxon que permite establecer la existencia de una igualdad entre medias relacionadas con distribuciones no normales, obteniéndose valores respectivos que son presentados en la tabla 2:

**Tabla 2 Estadísticos de prueba Wilcoxon**

	<i>QT1 - QT2</i>
Z	-4,782
Sig. asintótica (bilateral)	$1,73 \times 10^{-6}$

Donde:

$Q_{T1}$ : Calor total generado por el sistema inicial de vapor.

$Q_{T2}$ : Calor total generado por el sistema final de vapor.

Z: Valor calculado.

Sig. asintótica (bilateral): Valor de probabilidad.

Para el análisis estadístico realizado, se propuso la comparación de los valores de calor total, conforme a lo establecido en las hipótesis en estudio:

Los Calores Totales generados por el caldero son iguales:

$$H_0: Q_{T1} = Q_{T2}$$



Existe diferencia entre los Calores Totales generados por el caldero:

$$H_1: Q_{T1} \neq Q_{T2}$$

Donde:

$Q_{T1}$  = Calor Total generado por el sistema inicial de vapor.

$Q_{T2}$  = Calor Total generado por el sistema final de vapor.

Dado que el valor de probabilidad (p – value),  $1,73 \times 10^{-6}$ , para la prueba de Wilcoxon es menor al valor alfa de significancia (0,05) se rechaza la hipótesis nula. En consecuencia, según éste análisis, los valores de calor total generado entre ambos sistemas de vapor son diferentes.

La evaluación estadística aplicada a pruebas con distribuciones no normales, podría interpretarse como una evaluación de los sistemas en estudio. La distribución no normal podría servir para interpretar la regularidad de producción en la fábrica, debido a que los valores de los parámetros corresponden a datos de máquinas operaciones y/o procesos. Es probable que la evaluación estadística identifique irregularidad en el ciclo productivo por variación en el abastecimiento de combustible, la producción de vapor, características de operación, criterios del operador, etc.

Los valores  $Q_{T1}$  y  $Q_{T2}$  al ser diferentes quieren decir que, en el caso del valor  $Q_{T2}$  al ser menor, se interpreta como un menor requerimiento de energía para producir la misma cantidad de vapor entre los sistemas estudiados. La mejora en el sistema va en beneficio del sistema productivo y con el consiguiente ahorro económico.

### 3. ANÁLISIS ECONÓMICO

En la tabla 3 se presentan los resultados del análisis económico desarrollado para evaluar el ahorro por la recuperación del vapor condensado.

**Tabla 3 Análisis económico**

	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>
Ahorro neto promedio	kJ/h	$6,82 \times 10^5$
Ahorro de gas natural	m <sup>3</sup> /h	18,3
Ahorro económico	\$/h	10,2
Ahorro económico	\$/año	$8,8 \times 10^4$

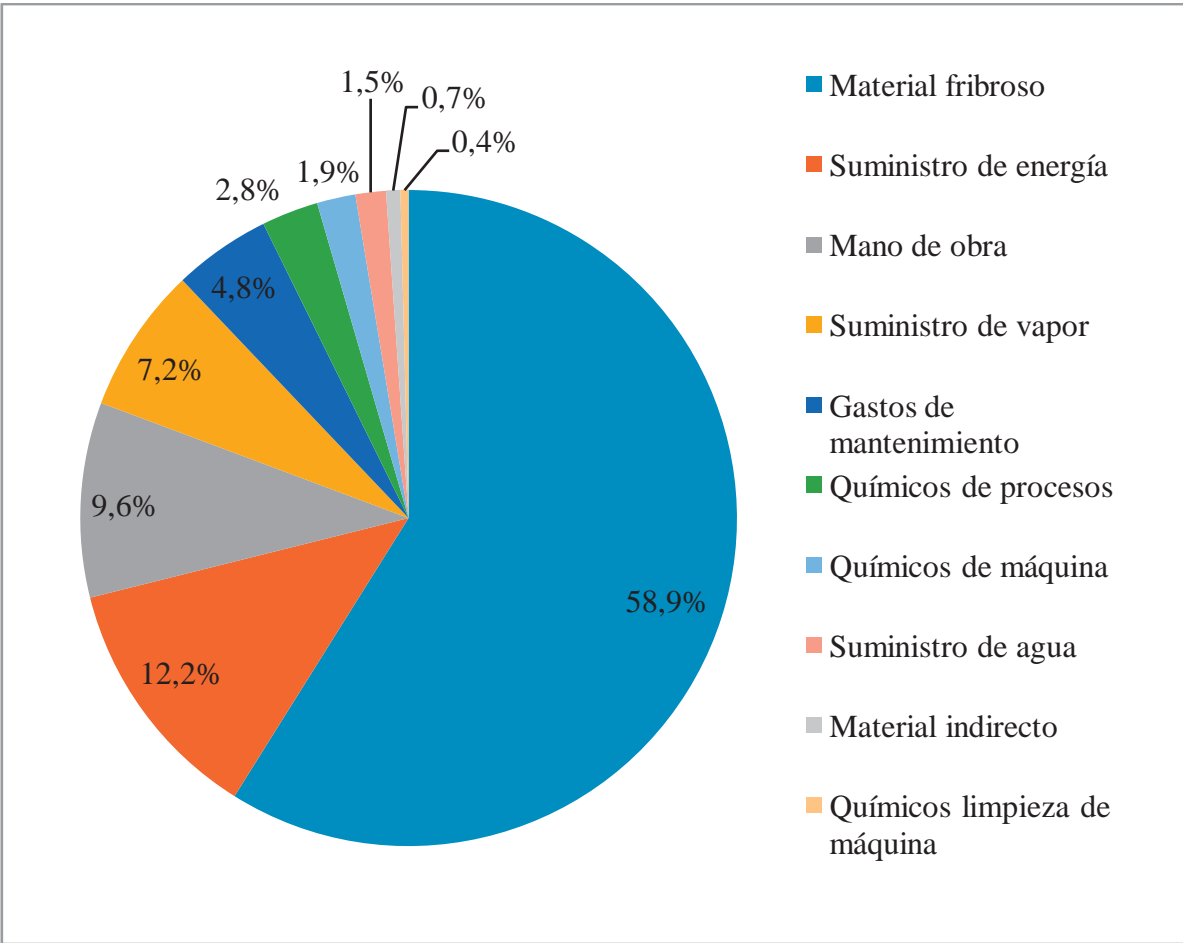
En la tabla 3 se observa que el valor de  $6,82 \times 10^5$  de kJ, (obtenido según la Ec. 42) indica la cantidad de energía que en promedio el caldero hubiera dejado de generar por hora, representa un ahorro económico promedio de  $8,8 \times 10^4$  dólares al año con la recuperación del vapor condensado. Al respecto la recuperación del vapor *flash* perdido en el tanque de alimentación representa un ahorro promedio del 6,97 por ciento, párrafo 6.1.1, de la energía necesaria para la producción de vapor, aunque es un valor muy por debajo del rango indicando por Martínez, 2009, entre 35 a 50 por ciento. En este caso, diversos factores contribuirían a que el valor de esta relación sea bajo, como son las condiciones de operación, los equipos, tipo de producto, etc.

Durante el 2012, la papelera produjo  $6,7 \times 10^3$  toneladas de papel *tissue*; los  $8,8 \times 10^4$  dólares debieron representar un ahorro de 13,11 \$ por tonelada de papel producido; debido a la recuperación de la energía desperdiciada.

En la figura 34 se presenta la distribución de los diferentes costos que realizó la empresa para producir una tonelada de papel; el mayor costo que se realizó fue en el uso de material fibroso, 100 por ciento fibra secundaria, que llegó a alcanzar el 58,9 por ciento del costo total. El suministro de vapor representa el 7,2 por ciento. El principal consumo para la producción

de vapor es el gas natural cuyo valor representa el 97,5 por ciento del costo de suministro. Los demás costos están representados por los químicos usados para el tratamiento de aguas, protección de equipos, etc.

En la tabla 4 se presentan los diferentes costos que la empresa realizó para producir una tonelada de papel. Para determinar los gastos que se hubieran realizado en el sistema final de vapor, se mantuvieron los costos iniciales, variando el suministro de vapor considerando el ahorro que se hubiera obtenido por tonelada producida. De esta forma el ahorro porcentual de 13,11 \$/t representaría el 19,87 por ciento con respecto al costo de suministro de gas natural para la producción de vapor en el sistema inicial y un ahorro porcentual del 1,39 por ciento del costo total, en el mismo sistema.



**Figura 34 Distribución de los costos de producción**

**Tabla 4 Costos de producción del sistema inicial y final de vapor**

	Sistema inicial de vapor			Sistema final de vapor		
	%	%	\$/t	\$/t	%	%
Material fibroso	58,9		554,69			59,7
Mano de obra	9,6		90,41			9,74
Suministro de energía	12,2		114,89			12,4
Suministro de vapor	7,2	97,5	66,11 (a)	53 (b)	96,9	5,89
		2,5	1,70	1,7	3,1	
Gastos de mantenimiento	4,8		45,20			4,87
Químicos de procesos	2,8		26,37			2,84
Químicos de máquina	1,9		17,89			1,93
Suministro de agua	1,5		14,13			1,52
Material indirecto	0,7		6,59			0,71
Químicos para limpieza de máquina	0,4		3,77			0,41
Total	100%		941,75 (c)			100%
Ahorro absoluto (a-b)			13,11 (d)			
Ahorro relativo de gas (d/a)*100	19,87					
Ahorro relativo de costo total (d/c)*100	1,39					



## V. CONCLUSIONES

- 1) El sistema final de vapor determina que la recuperación del vapor condensado beneficia al ahorro energético del vapor usado en el proceso de secado de papel tissue.
- 2) La instalación de la bomba centrífuga vertical multi-etápica permite la recuperación de calor que anteriormente era liberado a la atmósfera como vapor flash.
- 3) La diferencia encontrada entre los calores totales generados por el sistema inicial y final, del presente estudio, es altamente significativa.
- 4) La recuperación del vapor condensado permite un ahorro económico en el consumo de combustible, lo que repercute en la disminución del costo total de producción de papel tissue.





## **VI. RECOMENDACIONES**

- Instalar un economizador en el circuito de agua de alimentación que atraviese la salida de los gases de combustión del caldero. Esto reduce el consumo de combustible pues se transfiere calor de los gases de combustión al agua.
- Aumentar la frecuencia del análisis de aguas del caldero y así tomar en cuenta las medidas correctivas y preventivas correspondientes.
- Continuar con las mejoras con respecto al tratamiento de agua y que es fundamental para el cuidado y trabajo de los diferentes equipos y líneas durante la producción de vapor.
- Concluir la instalación de material aislante en las líneas de vapor que contribuyen a la disminución de la disipación del calor por radiación.
- Realizar un estudio para determinar cuánto ahorro económico se puede obtener, con respecto a los químicos usados, con la recuperación del vapor condensado.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez–Guerra, M; Pérez, J; Montelier, S; Molina, M; Rey, F; San José, J; Velasco, E. 2001. Caracterización energética de un sistema mixto de recuperación de energía en instalaciones de climatización. *Ingeniería Mecánica* 4 (3):41-48.
- Andrés, A; Guadalupe, E; Carrillo, N. 2007. El gas de Camisea: geología, economía y usos. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG* 10 (19):113-119.
- Andritz Pilao Equipamentos Ltda., BR. 2009. Manual de instrucciones, instalación, operación y mantenimiento: Refinador RTC2000. Sao Pablo, BR, s.e. 182 p.
- Armstrong International Inc., US. 1998. Guía para la conservación de vapor en el drenado de condensados: Evaluación y selección de trampa de vapor. Michigan, US, s.e. 54 p.
- Barrientos, I. 2009. Ahorro de Energía en Sistema de Vapor y Condensado en la Industria Papelera. Tesis Ing. Mecánico Electricista. Veracruz, MX, Universidad Veracruzana. 101 p.

- Blejec, M; Houben, J; Kern, H; Iancu, M; Pugliese, G; Raupenstrauch, H; Zehra, F. 2010. Guía para profesores: Intelligent use of Energy at school (IUSES) (en línea). Consultado 15 abr. 2015. Disponible en [http://www.iuses.eu/materiali/e/MATERIALES\\_PARA\\_PROFESORES/Manual\\_profesores.pdf](http://www.iuses.eu/materiali/e/MATERIALES_PARA_PROFESORES/Manual_profesores.pdf)
- Boudreau, J. 2013. New methods for evaluation of tissue creping and the importance of coating, paper and adhesion. Ph.D. Thesis. Karlstad, SE, Karlstad University. 59 p.
- Burgos, M. 2007. Determinación de un método de ruta crítica para el montaje de calderas industriales. Tesis Ing. Civil. Concepción, CL, Universidad del Bio-Bio. 174 p.
- Cabrera, S; Troya, D. 2012. Diseño de las líneas de Vapor para el Calentamiento de los Tanques de Almacenamiento de Combustible de la Central Térmica Miraflores. Tesis Ing. Mecánico. Quito, EC, Universidad Politécnica Salesiana. 229 p.
- Campos, J. 2008. Ahorro de energía en la industria del papel (en línea). Bogotá, CO. Consultado 18 set. 2014. Disponible en <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/papel.pdf>
- Carré, B; Galland, G. 2007. Overview of deinking technology: 8th CTP/PTS Deinking Training Course. Grenoble, FR, s.e. 24 p.
- Cengel, Y; Boles, M. 2009. Termodinámica. Trads. V González, SM Sarmiento. 6 ed. México DF, MX, McGraw Hill. 1008 p.

CAR/PL (Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia, ES). 2005. Prevención de la contaminación en el Sector Papelero (en línea). Barcelona, ES. Consultado 3 may. 2015. Disponible en [http://www.omaaragon.org/riesgos/ficheros/\\_3482.pdf](http://www.omaaragon.org/riesgos/ficheros/_3482.pdf)

Cleaver Brooks, US. 2005. The boiler book (en línea). Thomasville, US. Consultado 6 jul. 2014. Disponible en <http://www.cleaver-brooks.com/Reference-Center/Resource-Library/Boiler-Book/Boiler-Book-2005.aspx>

Comisión Nacional para el ahorro de Energía (CONAE, MX). 2002. Guía de vapor para la industria (en línea). México DF, MX. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en [http://ucatee.cnpml.org.sv/UCATEE/ee/docs/GUIA\\_VAPOR\\_FINAL.pdf](http://ucatee.cnpml.org.sv/UCATEE/ee/docs/GUIA_VAPOR_FINAL.pdf)

Crane, C. 1992. Flujos de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Trad. SA Valfisa. 2 ed. México DF, MX, McGraw-Hill. 215 p.

FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, ES). 2013. Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. Madrid, ES, s.e. 162 p.

García, R; Vásquez, A. 2004. La Industria del Gas Natural en el Perú: Documento de Trabajo N° 1. Lima, PE, s.e. 101 p.

GTZ (Agencia Alemana de Cooperación Técnica, DE)/MITINCI (Ministerio de Industria, PE). 2002. Estudio de Factibilidad para un proyecto MDL: Mejora de la Eficiencia Energética en Calderas Industriales en el Perú (en línea). Consultado 17 mar. 2014. Disponible en <http://www.fonamperu.org/general/mdl/documentos/boilersperu.pdf>

- Hernández, L. 2009. Desarrollo de un calorímetro de estrangulamiento para medir la entalpía del flujo de Vapor de una planta Geotermoeléctrica de la Comisión Federal de la Electricidad. Tesis Ing. Mecatrónico. México DF, MX, Universidad Nacional Autónoma de México. 95 p.
- Hernández, I; Hernández, J. 2010. Control automático de flujos químicos para el acondicionamiento del secador Yankee. Tesis Ing. en Control y Automatización. México DF, MX, Instituto Politécnico Nacional. 115 p.
- Hill, K. 2006. Optimización del uso de vapor en la sección de secado: Conferencia de fabricantes de papel TAPPI 2006 (en línea). Celulosa y Papel 24(2):18-28. Consultado 12 may. 2015. Disponible en [http://www.atcp.cl/privado/docs/revistas/1/Rev\\_159163323931.pdf](http://www.atcp.cl/privado/docs/revistas/1/Rev_159163323931.pdf)
- Holik, H. 2006. Handbook of Paper and Board. Weinheim, DE, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 504 p.
- Howell, J; Buckius, R. 1990. Principios de Termodinámica para ingenieros. Trad. I Velasco. México DF, MX, McGraw-Hill. 713 p.
- How stuff works, US. 2008. How steams engines work (en línea). Atlanta, US. Consultado 5 set. 2014. Disponible en <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/steam2.htm>
- Kadant Lamort, FR. 2000. Ultra-V Vertical pressure screen - Guide. Cedex, FR, s.e. 4 p.

- Kern, D. 1999. Procesos de transferencia de calor. Trad. N Marino. México DF, MX, McGraw Hill. 980 p.
- KC–A (Kimberly Clark, AR). 2013. Reporte de Sustentabilidad 2012 (en línea). Buenos Aires, AR. Consultado 13 may. 2015. Disponible en [http://www.cms.kimberly-clark.com/UmbracoImages/UmbracoFileMedia/Reporte\\_de\\_sustentabilidad\\_2012\\_Argentina\\_umbracoFile.pdf](http://www.cms.kimberly-clark.com/UmbracoImages/UmbracoFileMedia/Reporte_de_sustentabilidad_2012_Argentina_umbracoFile.pdf)
- KC–P (Kimberly Clark, PE). 2014. Procesos de fabricación de nuestro papel (en línea). Lima, PE. Consultado 17 may. 2015. Disponible en <http://fabricaideas.pe/wp-content/uploads/2014/04/KCC-Proceso-de-papel.pdf>
- Kullander, J. 2012. Evaluation of Furnishes for Tissue Manufacturing. Thesis Chemical Eng. Karlstad, SE, Karlstad University. 51 p.
- León, C; Fuentes, M. 2012. Diseño de un proceso para la fabricación de papel reciclado ecológico a escala laboratorio usando peróxido de hidrógeno. Tesis Ing. Químico. Cartagena de Indias, CO, Universidad de Cartagena. 115 p.
- Maldonado, D. 2010. Modelación del Proceso de Separación de Gas – Crudo en la Industria Petrolera. Tesis Ing. de Petróleos. Santo Domingo Tehuantepec, MX, Universidad del ISTMO. 104 p.
- Manríquez, V. 1999. Resultado de las medidas de ahorro de energía ejecutadas en una empresa papelera del Perú (en línea). Lima, PE. Consultado 10 may. 2015. Disponible en <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/03/01/V.3%20Papelera.htm>

- Martínez, M. 2009. Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente. Tesis Mag. Sc. Seguridad Industrial y Medio Ambiente. Valencia, ES, Universidad Politécnica de Valencia. 63p.
- Martins, D; Sevrini, G; Martin, L; Silvestre, M; Reguera, M; Yuri, S. 2006. Tratamiento mecánico de fibra curta de eucalipto com utilização de discos de refino com maior comprimento efetivo de corte (en línea). Consultado 28 may. 2015. Disponible en [http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1311778942\\_a0f66c63bb14c750c5b68a18d16c357e\\_71197749.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1311778942_a0f66c63bb14c750c5b68a18d16c357e_71197749.pdf)
- MetroGas, CL. 2009. Retorno de condensado (en línea). Santiago de Chile, CL. Consultado 6 jun. 2014. Disponible en <http://www.metrogas.cl/industria/userfiles/file/EF%20ENERG%20CONDENSADO STRA.pdf>
- Metso, FI. 2012. ViscoNip<sup>TM</sup> Press. Helsinki, FI, s.e. 24 p.
- Molina, R. 2007. Determinación de las propiedades termodinámicas de la mezcla de gases de combustión considerando doce especies. Tesis Ing. Mecánico. Pamplona, CO, Universidad de Pamplona. 131 p.
- Morales, J; Oshiro, J; Mas J; Porles, F. 2012. República del Perú: Balance Nacional de Energía 2012. Lima, PE, s.e. 145 p.



- Moreno, P. 2006. Disminución de los costos de producción en la fabricación de papel kraft en Cartorama C.A. Tesis Ing. Industria. Guayaquil, EC, Universidad de Guayaquil. 86 p.
- Rodríguez, J. 2006. Desarrollo de un Sistema de Control Avanzado de la Presión del Vapor en una Caldera de Tubos de Fuego. Tesis Mag. Sc. Ing. de Control y Automatización. Lima, PE, Pontificia Universidad Católica del Perú. 188 p.
- Rodríguez, J. 2008. Elaboración de Proyectos de Guías de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético: Sector Papelero. Lima, PE, s.e. 62 p.
- Sánchez, J; Mejía, A. 2005. Análisis del sistema de recuperación de condensado en las áreas de vapor y energía del complejo industria de Barrancabermeja. Tesis Ing. Químico. Bucaramanga, CO, Universidad Industrial de Santander. 106 p.
- Smook, G. 1990. Manual para técnicos de pulpa y papel: TAPPI. Atlanta, US, s.e. 397 p.
- Sosa, J. 2013. Recuperación de condensados generados en el sistema de drenaje de cabezales de vapor y venas de calentamiento en el área de setil (servicios auxiliares) de la refinería estatal de esmeralda. Tesis Ing. Químico. Guayaquil, EC, Universidad de Guayaquil. 123 p.
- Torraspapel S.A., ES. 2008. Formación. Fabricación de Papel (en línea). Barcelona, ES. Consultado 6 jun. 2015. Disponible en: <http://www.torraspapel.com/Conocimiento%20Tcnico/FormacionFabricacionPapel.pdf>

- Treybal, R. 1988. Operaciones de Transferencia de masa. Trad. A García. 2 ed. México DF, MX, McGraw-Hill. 865 p.
- Valdivia, S. 2002. Administración de los Energéticos en la Industria: Proyecto piloto demostrativo ambiental. Lima, PE, s.e. 124 p.
- Velasco, C; Leite, F; Dammert, M; Paz, E. 2009. La batalla por el petróleo y el gas en América Latina. México DF, MX. Energía y Desarrollo, A.C. 238 p.
- Villacrés, J. 2008. Ahorro energético en el Sistema de Recuperador de Condensados de una Planta Industrial en Guayaquil utilizando un Surge Tank. Tesis Ing. Mecánico. Guayaquil, EC, Escuela Superior Politécnica del Litoral. 181 p.
- Weinstock, I. 1993. Use of the Term "Bleaching" in the Context of Virgin and Secondary Fibers: A Clarification. Progress in Paper Recycling 3(1): 89-91.
- Zanutinni, M. 2012. Red Iberoamericana para la Revalorización del Reciclado Celulósico: Reciclado celulósico. Santa Fe, CO, s.e. 308 p.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1

#### CÁLCULO DEL CALOR GENERADO POR EL SISTEMA INICIAL DE VAPOR

$$\text{Eficiencia del caldero} = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Caldero}} = \frac{QU1}{QT1} \quad (17)$$

$$Q_{T1} = \frac{QU1}{\text{caldero}} \quad (18)$$

Donde:

$Q_{T1}$  = Calor total inicial, en kJ/h.

$Q_{U1}$  = Calor útil inicial, en kJ/h.

$\eta_{\text{Caldero}}$  = Eficiencia del caldero (80 por ciento según Cleaver-brooks, 2005).

Cálculo del calor útil inicial ( $Q_{U1}$ ):

$$Q_{U1} = \text{Calor de salida} - \text{calor de ingreso} \quad (19)$$

$$Q_{U1} = [(\dot{m} * (h_{g1}) - \dot{m} * (h_{f4})] \text{ (kJ/h)} \quad (20)$$

$$Q_{U1} = [\dot{m} * (h_{g1} - h_{f4})] \text{ (kJ/h)} \quad (21)$$

Donde:

$Q_{U1}$  = Calor útil inicial, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a presión del caldero, en kJ/kg.

$h_{f4}$  = Entalpía del líquido saturado a temperatura del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$$Q_{U1} = 3,32 \times 10^3 * (2,77 \times 10^3 - 4,15 \times 10^2) \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{U1} = 7,82 \times 10^6 \text{ (kJ/h)}$$

Por lo tanto:

$$Q_{T1} = \frac{7,82 \times 10^6}{80 \%} \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{T1} = 9,78 \times 10^6 \text{ (kJ/h)}$$

Cálculo de la cantidad de vapor flash perdido por el sistema inicial de vapor:

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = \frac{\text{Calor sensible de alta presión} - \text{Calor sensible de baja presión}}{\text{Calor latente de baja presión}} \times 100 \% \quad (23)$$

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = \frac{hf_3 - hf_4}{hg_4 - hf_4} \times 100 \% \quad (24)$$

Donde:

$\% \text{ Vapor flash}_1$  = Porcentaje de vapor flash perdido por el sistema inicial de vapor.

$hf_3$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

$hf_4$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$hg_4$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = \frac{6,47 \times 10^2 - 4,19 \times 10^2}{2,68 \times 10^3 - 4,19 \times 10^2} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Vapor Flash}_1 = 10,1 \%$$

Cálculo de la cantidad de condensado perdido a la atmósfera como vapor flash:

$$\dot{m}_{\text{flash1}} = \text{cantidad de retorno de condensado} \times \% \text{ Vapor Flash}_1 \text{ (kg/h)} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{\text{flash1}} = \text{Flujo de vapor} * \text{porcentaje de retorno de condensado} * \% \text{ Vapor Flash}_1 \text{ (kg/h)} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{\text{flash1}} = 3,32 \times 10^3 * 70,95 \% * 10,1 \% \text{ (kg/h)}$$

$$\dot{m}_{\text{flash1}} = 2,36 \times 10^2 \text{ (kg/h)}$$

Cálculo del calor perdido por el sistema inicial de vapor ( $Q_{P1}$ ):

$$Q_{P1} = \dot{m}_{\text{flash1}} * h_{g4} \quad (\text{kJ/h}) \quad (27)$$

Donde:

$Q_{P1}$  = Calor perdido por el sistema inicial de vapor, en kJ/h.

$\dot{m}_{\text{flash1}}$  = Cantidad de condensado perdido en el sistema inicial de vapor, en kg/h.

$h_{g4}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación en kJ/kg.

$$Q_{P1} = 2,36 \times 10^2 * 2,68 \times 10^3 \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{P1} = 6,32 \times 10^5 \text{ (kJ/h)}$$

Cálculo del calor usado por el Yankee ( $Q_Y$ ):

$$Q_Y = \dot{m} * (h_{g2} - h_{f3}) \quad (\text{kJ/h}) \quad (28)$$

Donde:

$Q_Y$  = Calor usado por el Yankee, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g2}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del Yankee, en kJ/kg.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

$$Q_Y = 3,32 \times 10^3 * (2,75 \times 10^3 - 6,47 \times 10^2) \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_Y = 7 \times 10^6 \text{ (kJ/h)}$$

## ANEXO 2

### ANÁLISIS DEL SISTEMA INICIAL DE VAPOR

	Unidades	Día 1
		02/02/2012
Capacidad instalada de generación de vapor	BHP	500
Presión de operación del caldero	Bar	8.27
Presión de operación del <i>Yankee</i>	Bar	4.62
Presión del tanque de condensados	Bar	4.4
Eficiencia del caldero	%	80
Porcentaje retorno de condensado	%	81.5
Presión de descarga del condensado	Bar	1.01
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
Temperatura del tanque de alimentación	°C	95
<b>QY (Calor usado por el <i>Yankee</i>)</b>		
Entalpía del vapor saturado a la presión del <i>Yankee</i> (hg2)	kJ/kg	2.74E+03
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.20E+02
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
<b>QY</b>	kJ/h	4.91E+06
<b>% Vapor <i>flash</i> 1 (Condensado perdido)</b>		
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.20E+02
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf4)	kJ/kg	4.19E+02
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg4)	kJ/kg	2.68E+03
<b>% Vf1</b>	%	8.9
<b>mflash1 (Cantidad de condensado perdido)</b>		
cantidad de retorno de condensado	kg/h	1.88E+03
% Vapor <i>flash</i> 1	%	8.9
<b>mflash1</b>	kg/h	1.67E+02
<b>QP1 (Calor perdido por el sistema)</b>		
<i>mflash</i> 1	kg/h	1.67E+02
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg4)	kJ/kg	2.68E+03
<b>QP1</b>	kJ/h	4.48E+05
<b>QU1 (Calor útil producido por el caldero)</b>		
Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero (hg1)	kJ/kg	2.77E+03
Entalpía del líquido saturado a la temperatura del tanque de alimentación (hf4)	kJ/kg	3.98E+02



Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
<b>QU1</b>	kJ/h	5.48E+06
<b>QT1 (Calor total producido por el caldero)</b>	kJ/kg	6.85E+06

Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
03/02/2012	04/02/2012	05/02/2012	14/02/2012	16/02/2012	18/02/2012
500	500	500	500	500	500
8.62	8.27	7.93	8.27	8.27	7.93
4.83	4.48	4.83	6.27	6.55	6.26
4.5	4	4	5.7	6	5.7
80	80	80	80	80	80
89.3	86.1	85.7	52.9	45.0	87.5
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03
105	90	100	100	105	95
2.75E+03	2.74E+03	2.75E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.23E+02	6.05E+02	6.05E+02	6.62E+02	6.70E+02	6.62E+02
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03
4.68E+06	7.28E+06	7.33E+06	7.23E+06	6.85E+06	6.62E+06
6.23E+02	6.05E+02	6.05E+02	6.62E+02	6.70E+02	6.62E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
9.0	8.2	8.2	10.8	11.1	10.8
1.97E+03	2.93E+03	2.93E+03	1.83E+03	1.47E+03	2.76E+03
9.0	8.2	8.2	10.8	11.1	10.8
1.78E+02	2.41E+02	2.41E+02	1.96E+02	1.64E+02	2.97E+02
1.78E+02	2.41E+02	2.41E+02	1.96E+02	1.64E+02	2.97E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
4.76E+05	6.45E+05	6.46E+05	5.25E+05	4.39E+05	7.95E+05
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
4.20E+02	3.77E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.20E+02	3.98E+02
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03
5.18E+06	8.15E+06	8.04E+06	8.11E+06	7.69E+06	7.48E+06
6.48E+06	1.02E+07	1.00E+07	1.01E+07	9.62E+06	9.35E+06

Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13
20/02/2012	21/02/2012	23/02/2012	25/02/2012	01/03/2012	08/03/2012
500	500	500	500	500	500
7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93
5.86	6.07	6.20	6.10	6.20	6.20
5.3	5.5	5.7	5.7	5.6	5.8
80	80	80	80	80	80
65.4	81.6	78.9	83.3	37.5	76.7
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
2.94E+03	3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03
105	105	105	100	100	105
2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.50E+02	6.56E+02	6.62E+02	6.62E+02	6.59E+02	6.65E+02
2.94E+03	3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03
6.19E+06	7.51E+06	6.82E+06	7.21E+06	7.25E+06	6.85E+06
6.50E+02	6.56E+02	6.62E+02	6.62E+02	6.59E+02	6.65E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
10.2	10.5	10.8	10.8	10.6	10.9
1.92E+03	2.92E+03	2.57E+03	2.87E+03	1.29E+03	2.51E+03
10.2	10.5	10.8	10.8	10.6	10.9
1.96E+02	3.06E+02	2.76E+02	3.09E+02	1.38E+02	2.73E+02
1.96E+02	3.06E+02	2.76E+02	3.09E+02	1.38E+02	2.73E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
5.26E+05	8.18E+05	7.39E+05	8.25E+05	3.68E+05	7.31E+05
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
4.20E+02	4.20E+02	4.20E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.20E+02
2.94E+03	3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03
6.90E+06	8.39E+06	7.64E+06	8.09E+06	8.11E+06	7.69E+06
8.63E+06	1.05E+07	9.55E+06	1.01E+07	1.01E+07	9.61E+06

Día 14	Día 15	Día 16	Día 17	Día 18	Día 19
03/04/2012	03/05/2012	13/06/2012	28/06/2012	09/07/2012	22/08/2012
500	500	500	500	500	500
8.27	8.27	8.27	8.27	7.93	7.93
5.90	5.80	5.72	5.86	6.00	6.05
5.45	5.3	5.2	5.3	5.5	5.4
80	80	80	80	80	80
67.9	50.0	63.1	60.0	71.4	88.9
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.34E+03	3.37E+03	3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03
90	100	100	105	100	100
2.76E+03	2.75E+03	2.75E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.54E+02	6.50E+02	6.46E+02	6.50E+02	6.56E+02	6.53E+02
3.34E+03	3.37E+03	3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03
7.01E+06	7.10E+06	6.89E+06	7.10E+06	7.31E+06	6.88E+06
6.54E+02	6.50E+02	6.46E+02	6.50E+02	6.56E+02	6.53E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
10.4	10.2	10.1	10.2	10.5	10.4
2.27E+03	1.69E+03	2.06E+03	2.02E+03	2.49E+03	2.90E+03
10.4	10.2	10.1	10.2	10.5	10.4
2.36E+02	1.72E+02	2.08E+02	2.07E+02	2.61E+02	3.01E+02
2.36E+02	1.72E+02	2.08E+02	2.07E+02	2.61E+02	3.01E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
6.32E+05	4.61E+05	5.56E+05	5.53E+05	6.98E+05	8.05E+05
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
3.77E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.20E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.34E+03	3.37E+03	3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03
7.99E+06	7.92E+06	7.68E+06	7.93E+06	8.18E+06	7.68E+06
9.98E+06	9.90E+06	9.60E+06	9.91E+06	1.02E+07	9.59E+06

Día 20	Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25
12/09/2012	17/10/2012	03/11/2012	18/02/2013	24/03/2013	25/04/2013
500	500	500	500	500	500
8.27	8.27	8.27	8.27	8.27	8.27
5.80	5.17	4.30	6.07	6.30	5.10
5.2	4.6	3.7	5.6	5.8	4.5
80	80	80	80	80	80
76.2	75.0	72.0	60.0	73.3	75.0
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03	3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03
100	105	100	100	100	100
2.75E+03	2.75E+03	2.74E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.75E+03
6.50E+02	6.46E+02	5.93E+02	6.59E+02	6.65E+02	6.23E+02
3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03	3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03
7.29E+06	7.71E+06	7.35E+06	7.55E+06	7.33E+06	7.80E+06
6.50E+02	6.46E+02	5.93E+02	6.59E+02	6.65E+02	6.23E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
10.2	10.0	7.7	10.6	10.9	9.0
2.64E+03	2.75E+03	2.46E+03	2.16E+03	2.57E+03	2.75E+03
10.2	10.0	7.7	10.6	10.9	9.0
2.70E+02	2.76E+02	1.90E+02	2.29E+02	2.80E+02	2.49E+02
2.70E+02	2.76E+02	1.90E+02	2.29E+02	2.80E+02	2.49E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
7.21E+05	7.38E+05	5.07E+05	6.14E+05	7.48E+05	6.66E+05
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
4.19E+02	4.20E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03	3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03
8.14E+06	8.60E+06	8.04E+06	8.46E+06	8.23E+06	8.62E+06
1.02E+07	1.08E+07	1.00E+07	1.06E+07	1.03E+07	1.08E+07

Día 26	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30
11/06/2013	08/07/2013	19/11/2013	11/12/2013	26/12/2013
500	500	500	500	500
8.27	8.27	8.27	8.14	8.14
5.30	6.07	6.10	6.30	6.35
4.8	5.4	5.5	5.9	5.8
80	80	80	80	80
72.2	73.7	73.9	70.0	54.5
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.44E+03	3.58E+03	3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
100	100	100	100	100
2.75E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.33E+02	6.53E+02	6.56E+02	6.68E+02	6.65E+02
3.44E+03	3.58E+03	3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
7.29E+06	7.54E+06	7.26E+06	6.79E+06	7.10E+06
6.33E+02	6.53E+02	6.56E+02	6.68E+02	6.65E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
9.5	10.4	10.5	11.0	10.9
2.49E+03	2.64E+03	2.55E+03	2.27E+03	1.85E+03
9.5	10.4	10.5	11.0	10.9
2.36E+02	2.73E+02	2.68E+02	2.50E+02	2.01E+02
2.36E+02	2.73E+02	2.68E+02	2.50E+02	2.01E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
6.32E+05	7.31E+05	7.17E+05	6.70E+05	5.38E+05
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.44E+03	3.58E+03	3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
8.09E+06	8.42E+06	8.12E+06	7.63E+06	7.96E+06
1.01E+07	1.05E+07	1.02E+07	9.54E+06	9.95E+06

	Unidades	PROMEDIO	Desviación estándar
Capacidad instalada de generación de vapor	BHP	500	0
Presión de operación del caldero	Bar	8.16	0.18
Presión de operación del <i>Yankee</i>	Bar	5.76	0.62
Presión del tanque de condensados	Bar	5.23	0.62
Eficiencia del caldero	%	80	0
Porcentaje retorno de condensado	%	71.0	13.3
Presión de descarga del condensado	Bar	1.01	0
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
Temperatura del tanque de alimentación	°C	100.3	3.92
<b>QY (Calor usado por el <i>Yankee</i>)</b>			
Entalpía del vapor saturado a la presión del <i>Yankee</i> (hg2)	kJ/kg	2.75E+03	5.08E+00
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.47E+02	2.04E+01
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
<b>QY</b>	kJ/h	7.00E+06	6.85E+05
<b>%Vapor <i>flash</i>1 (Condensado perdido)</b>			
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.47E+02	2.04E+01
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf4)	kJ/kg	4.19E+02	0
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg4)	kJ/kg	2.68E+03	0
<b>%Vf1</b>	%	10.1	0.90
<b>mflash1 (Cantidad de condensado perdido)</b>			
cantidad de retorno de condensado	kg/h	2.35E+03	4.58E+02
<b>% Vapor <i>flash</i>1</b>	%	10.1	0.90
<b>mflash1</b>	kg/h	2.36E+02	4.71E+01
<b>QP1 (Calor perdido por el sistema)</b>			
<b>mflash1</b>	kg/h	2.36E+02	4.71E+01
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg4)	kJ/kg	2.68E+03	0
<b>QP1</b>	kJ/h	6.32E+05	1.26E+05
<b>QU1 (Calor útil producido por el caldero)</b>			
Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero (hg1)	kJ/kg	2.77E+03	7.30E-01
Entalpía del líquido saturado a la temperatura del tanque de alimentación (hf4)	kJ/kg	4.15E+02	1.17E+01
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
<b>QU1</b>	kJ/h	7.82E+06	7.64E+05
<b>QT1 (Calor total producido por el caldero)</b>	kJ/kg	9.78E+06	9.55E+05

### ANEXO 3

#### CÁLCULO DEL CALOR GENERADO POR EL SISTEMA FINAL DE VAPOR

$$\text{Eficiencia del caldero} = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Calor total}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Caldero}} = \frac{Q_{U2}}{Q_{T2}} \quad (29)$$

$$Q_{T2} = \frac{Q_{U2}}{\text{caldero}} \quad (30)$$

Donde:

$Q_{T2}$  = Calor total final en kJ/h.

$Q_{U2}$  = Calor útil final en kJ/h.

$\eta_{\text{Caldero}}$  = Eficiencia del caldero (80 por ciento según Cleaver-brooks, 2005).

Cálculo del calor perdido por el sistema final de vapor ( $Q_{p2}$ ) considerando la función realizada por la bomba centrífuga vertical multi-etápica:

$$\% \text{ Vapor Flash}_2 = \frac{(\text{Calor sensible de alta presión} - \text{Calor sensible de baja presión})}{\text{Calor latente de baja presión}} \times 100 \% \quad (31)$$

$$\% \text{ Vapor Flash}_2 = \frac{(hf3 - hf1)}{(hg5 - hf1)} \times 100 \% \quad (32)$$

Donde:

$\% Vapor flash_2$  = Porcentaje de vapor *flash* perdido por el sistema final de vapor.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector de condensado, en kJ/kg.

$h_{f1}$  = Entalpía del líquido saturado a la presión del caldero, en kJ/kg.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero, en kJ/kg.

$$\% Vapor Flash_2 = 0 \%$$

Cálculo de la cantidad de condensado perdido a la atmósfera como vapor *flash*:

$$\dot{m}_{flash2} = (\text{cantidad de retorno de condensado} * \%Vapor Flash_2) \text{ (kg/h)} \quad (33)$$

$$\dot{m}_{flash2} = (\text{Flujo de vapor} * \text{porcentaje de retorno de condensado} * \%Vapor Flash_2) \text{ (kg/h)} \quad (34)$$

$$\dot{m}_{flash2} = 3,32 \times 10^3 * 70,95 \% * 0 \% \text{ (kg/h)}$$

$$\dot{m}_{flash2} = 0 \text{ (kg/h)}$$

Cálculo del calor perdido por el sistema inicial de vapor ( $Q_{P2}$ ):

$$Q_{P2} = (\dot{m}_{flash2} * h_{g5}) \text{ (kJ/h)} \quad (35)$$



Donde:

$Q_{P2}$  = Calor perdido por el sistema final de vapor.

$\dot{m}_{flash2}$  = Cantidad de condensado perdido en el sistema final de vapor, en kg/h.

$h_{g5}$  = Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación en kJ/kg.

$$Q_{P2} = 0 * 2,68 \times 10^3 \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{P2} = 0 \text{ (kJ/h)}$$

Cálculo del calor útil final ( $Q_{U2}$ ):

$$Q_{U2} = \text{Calor de salida} - \text{calor de ingreso} \quad (36)$$

$$Q_{U2} = [\dot{m} * (h_{g1}) - \dot{m} * (h_i)] \text{ (kJ/h)} \quad (37)$$

$$Q_{U2} = [\dot{m} * (h_{g1} - h_i)] \text{ (kJ/h)} \quad (38)$$

Donde:

$Q_{U2}$  = Calor útil final, en kJ/h.

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_{g1}$  = Entalpía del vapor saturado a presión del caldero, en kJ/kg.

$h_i$  = Entalpía de equilibrio al ingreso del caldero, en kJ/kg.

Cálculo de la entalpía de equilibrio ( $h_i$ ):

Calor de ingreso = calor del tanque recolector + calor del tanque de alimentación (kJ/h)

$$\dot{m} * h_i = (\dot{m}_r * h_{f3} + \dot{m}_t * h_{f5}) \text{ (kJ/h)} \quad (39)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo de vapor, en kg/h.

$h_i$  = Entalpía de equilibrio al ingreso del caldero, en kJ/kg.

$\dot{m}_r$  = Cantidad de retorno de condensado, en kg/h.

$h_{f3}$  = Entalpía del líquido saturado a presión del tanque recolector, en kJ/kg.

$\dot{m}_t$  = Cantidad de agua de alimentación, en kg/h.

$h_{f5}$  = Entalpía del líquido saturado a la temperatura del tanque de alimentación, en kJ/kg.

$$h_i = \frac{(r * h_{f3} + t * h_{f5})}{3,32 \times 10^3} \times 100 \% \text{ (kJ/kg)} \quad (40)$$

$$h_i = \frac{2,35 \times 10^3 * 6,47 \times 10^2 + 9,76 \times 10^2 * 4,19 \times 10^2}{3,32 \times 10^3} \times 100 \% \text{ (kJ/h)}$$

$$h_i = 5,8 \times 10^2 \text{ (kJ/h)}$$

Calor útil final ( $Q_{U2}$ ) es:

$$Q_{U2} = 3,32 \times 10^3 * (2,77 \times 10^3 - 5,8 \times 10^2) \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{U2} = 7,28 \times 10^6 \text{ (kJ/h)}$$

Cálculo del calor total final generado por el caldero:

$$Q_{T2} = \frac{Q_{U2}}{\text{caldero}} \text{ (kJ/h)} \quad (30)$$

$$Q_{T2} = \frac{7,28 \times 10^6}{80 \%} \text{ (kJ/h)}$$

$$Q_{T2} = 9,09 \times 10^6 \text{ (kJ/h)}$$

## ANEXO 4

### ANÁLISIS DEL SISTEMA FINAL DE VAPOR

	Unidades	Día 1
		02/02/2012
Capacidad instalada de generación de vapor	BHP	500
Presión de operación del caldero	Bar	8.27
Presión de operación del <i>Yankee</i>	Bar	4.62
Presión del tanque de condensados	Bar	4.40
Eficiencia del caldero	%	80
Porcentaje retorno de condensado	%	81.5
Presión de descarga del condensado	Bar	1.01
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
Temperatura del tanque de alimentación	°C	95
<b>QY (Calor usado por el <i>Yankee</i>)</b>		
Entalpía del vapor saturado a la presión del <i>Yankee</i> (hg2)	kJ/kg	2.74E+03
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.20E+02
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
QY	kJ/h	4.91E+06
<b>% Vapor <i>flash2</i> (Condensado perdido)</b>		
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.20E+02
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf5)	kJ/kg	4.19E+02
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg5)	kJ/kg	2.68E+03
% Vf2	%	0
<b>mflash2 (Cantidad de condensado perdido)</b>		
cantidad de retorno de condensado	kg/h	1.88E+03
% Vapor <i>flash2</i>	%	0
mflash2	kg/h	0
<b>QP2 (Calor perdido por el sistema)</b>		
mflash2	kg/h	0
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg5)	kJ/kg	2.68E+03
QP2	kJ/h	0
<b>hi (Entalpía de equilibrio al ingreso al caldero)</b>		
cantidad de retorno de condensado	kg/h	1.88E+03

Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.20E+02
cantidad de agua de alimentación	kg/h	4.28E+02
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf5)	kJ/kg	4.19E+02
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
hi	kJ/h	5.82E+02
<b>QU2 (Calor útil producido por el caldero)</b>		
Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero (hg1)	kJ/kg	2.77E+03
hi	kJ/kg	5.82E+02
Flujo de vapor	kg/h	2.31E+03
QU2	kJ/h	5.05E+06
<b>QT2 (Calor total producido por el caldero)</b>	kJ/h	6.32E+06

Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8
03/02/2012	04/02/2012	05/02/2012	14/02/2012	16/02/2012	18/02/2012	20/02/2012
500	500	500	500	500	500	500
8.62	8.27	7.93	8.27	8.27	7.93	7.93
4.83	4.48	4.83	6.27	6.55	6.26	5.86
4.50	4.00	4.00	5.70	6.00	5.70	5.30
80	80	80	80	80	80	80
89.3	86.1	85.7	52.9	45.0	87.5	65.4
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03	2.94E+03
105	90	100	100	105	95	105
2.75E+03	2.74E+03	2.75E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.23E+02	6.05E+02	6.05E+02	6.62E+02	6.70E+02	6.62E+02	6.50E+02
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03	2.94E+03
4.68E+06	7.28E+06	7.33E+06	7.23E+06	6.85E+06	6.62E+06	6.19E+06
6.23E+02	6.05E+02	6.05E+02	6.62E+02	6.70E+02	6.62E+02	6.50E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0
1.97E+03	2.93E+03	2.93E+03	1.83E+03	1.47E+03	2.76E+03	1.92E+03
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0
1.97E+03	2.93E+03	2.93E+03	1.83E+03	1.47E+03	2.76E+03	1.92E+03
6.23E+02	6.05E+02	6.05E+02	6.62E+02	6.70E+02	6.62E+02	6.50E+02
2.36E+02	4.73E+02	4.89E+02	1.62E+03	1.80E+03	3.95E+02	1.02E+03
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03	2.94E+03
6.01E+02	5.79E+02	5.78E+02	5.48E+02	5.32E+02	6.31E+02	5.70E+02
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
6.01E+02	5.79E+02	5.78E+02	5.48E+02	5.32E+02	6.31E+02	5.70E+02
2.20E+03	3.41E+03	3.42E+03	3.45E+03	3.28E+03	3.16E+03	2.94E+03
4.78E+06	7.46E+06	7.50E+06	7.66E+06	7.33E+06	6.75E+06	6.46E+06
5.98E+06	9.33E+06	9.37E+06	9.58E+06	9.16E+06	8.43E+06	8.08E+06

Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
21/02/2012	23/02/2012	25/02/2012	01/03/2012	08/03/2012	03/04/2012	03/05/2012
500	500	500	500	500	500	500
7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	8.27	8.27
6.07	6.20	6.10	6.20	6.20	5.90	5.80
5.50	5.70	5.70	5.60	5.80	5.45	5.30
80	80	80	80	80	80	80
81.6	78.9	83.3	37.5	76.7	67.9	50.0
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03	3.34E+03	3.37E+03
105	105	100	100	105	90	100
2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.75E+03
6.56E+02	6.62E+02	6.62E+02	6.59E+02	6.65E+02	6.54E+02	6.50E+02
3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03	3.34E+03	3.37E+03
7.51E+06	6.82E+06	7.21E+06	7.25E+06	6.85E+06	7.01E+06	7.10E+06
6.56E+02	6.62E+02	6.62E+02	6.59E+02	6.65E+02	6.54E+02	6.50E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0

2.92E+03	2.57E+03	2.87E+03	1.29E+03	2.51E+03	2.27E+03	1.69E+03
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0
2.92E+03	2.57E+03	2.87E+03	1.29E+03	2.51E+03	2.27E+03	1.69E+03
6.56E+02	6.62E+02	6.62E+02	6.59E+02	6.65E+02	6.54E+02	6.50E+02
6.58E+02	6.85E+02	5.74E+02	2.16E+03	7.64E+02	1.07E+03	1.69E+03
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03	3.34E+03	3.37E+03
6.12E+02	6.11E+02	6.21E+02	5.09E+02	6.07E+02	5.79E+02	5.34E+02
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
6.12E+02	6.11E+02	6.21E+02	5.09E+02	6.07E+02	5.79E+02	5.34E+02
3.57E+03	3.26E+03	3.44E+03	3.45E+03	3.27E+03	3.34E+03	3.37E+03
7.71E+06	7.02E+06	7.39E+06	7.80E+06	7.08E+06	7.31E+06	7.53E+06
9.63E+06	8.78E+06	9.24E+06	9.75E+06	8.84E+06	9.14E+06	9.42E+06

Día 16	Día 17	Día 18	Día 19	Día 20	Día 21	Día 22
13/06/2012	28/06/2012	09/07/2012	22/08/2012	12/09/2012	17/10/2012	03/11/2012
500	500	500	500	500	500	500
8.27	8.27	7.93	7.93	8.27	8.27	8.27
5.72	5.86	6.00	6.05	5.80	5.17	4.30
5.20	5.30	5.50	5.40	5.20	4.60	3.70
80	80	80	80	80	80	80
63.1	60.0	71.4	88.9	76.2	75.0	72.0
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03	3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03
100	105	100	100	100	105	100
2.75E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03	2.75E+03	2.75E+03	2.74E+03
6.46E+02	6.50E+02	6.56E+02	6.53E+02	6.50E+02	6.46E+02	5.93E+02
3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03	3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03
6.89E+06	7.10E+06	7.31E+06	6.88E+06	7.29E+06	7.71E+06	7.35E+06
6.46E+02	6.50E+02	6.56E+02	6.53E+02	6.50E+02	6.46E+02	5.93E+02

4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0
2.06E+03	2.02E+03	2.49E+03	2.90E+03	2.64E+03	2.75E+03	2.46E+03
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0	0	0
2.06E+03	2.02E+03	2.49E+03	2.90E+03	2.64E+03	2.75E+03	2.46E+03
6.46E+02	6.50E+02	6.56E+02	6.53E+02	6.50E+02	6.46E+02	5.93E+02
1.21E+03	1.35E+03	9.94E+02	3.63E+02	8.25E+02	9.16E+02	9.58E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03	3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03
5.63E+02	5.57E+02	5.88E+02	6.27E+02	5.95E+02	5.89E+02	5.44E+02
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
5.63E+02	5.57E+02	5.88E+02	6.27E+02	5.95E+02	5.89E+02	5.44E+02
3.27E+03	3.37E+03	3.48E+03	3.27E+03	3.46E+03	3.66E+03	3.42E+03
7.21E+06	7.46E+06	7.59E+06	7.00E+06	7.53E+06	7.99E+06	7.61E+06
9.01E+06	9.33E+06	9.48E+06	8.75E+06	9.41E+06	9.98E+06	9.52E+06

Día 23	Día 24	Día 25	Día 26	Día 27
18/02/2013	24/03/2013	25/04/2013	11/06/2013	08/07/2013
500	500	500	500	500
8.27	8.27	8.27	8.27	8.27
6.07	6.30	5.10	5.30	6.07
5.60	5.80	4.50	4.80	5.40
80	80	80	80	80
60.0	73.3	75.0	72.2	73.7
1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03	3.44E+03	3.58E+03
100	100	100	100	100
2.76E+03	2.76E+03	2.75E+03	2.75E+03	2.76E+03
6.59E+02	6.65E+02	6.23E+02	6.33E+02	6.53E+02



3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03	3.44E+03	3.58E+03
7.55E+06	7.33E+06	7.80E+06	7.29E+06	7.54E+06
6.59E+02	6.65E+02	6.23E+02	6.33E+02	6.53E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0
2.16E+03	2.57E+03	2.75E+03	2.49E+03	2.64E+03
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0	0	0
2.16E+03	2.57E+03	2.75E+03	2.49E+03	2.64E+03
6.59E+02	6.65E+02	6.23E+02	6.33E+02	6.53E+02
1.44E+03	9.34E+02	9.17E+02	9.56E+02	9.42E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03	3.44E+03	3.58E+03
5.63E+02	5.99E+02	5.72E+02	5.74E+02	5.91E+02
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
5.63E+02	5.99E+02	5.72E+02	5.74E+02	5.91E+02
3.60E+03	3.50E+03	3.67E+03	3.44E+03	3.58E+03
7.94E+06	7.60E+06	8.06E+06	7.55E+06	7.80E+06
9.93E+06	9.50E+06	1.01E+07	9.44E+06	9.75E+06

Día 28	Día 29	Día 30
19/11/2013	11/12/2013	26/12/2013
500	500	500
8.27	8.14	8.14
6.10	6.30	6.35
5.50	5.90	5.80
80	80	80
73.9	70.0	54.5
1.01	1.01	1.01
3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03

100	100	100
2.76E+03	2.76E+03	2.76E+03
6.56E+02	6.68E+02	6.65E+02
3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
7.26E+06	6.79E+06	7.10E+06
6.56E+02	6.68E+02	6.65E+02
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0
2.55E+03	2.27E+03	1.85E+03
0	0	0
0	0	0
0	0	0
2.68E+03	2.68E+03	2.68E+03
0	0	0
2.55E+03	2.27E+03	1.85E+03
6.56E+02	6.68E+02	6.65E+02
9.01E+02	9.74E+02	1.54E+03
4.19E+02	4.19E+02	4.19E+02
3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
5.94E+02	5.93E+02	5.53E+02
2.77E+03	2.77E+03	2.77E+03
5.94E+02	5.93E+02	5.53E+02
3.46E+03	3.25E+03	3.39E+03
7.52E+06	7.06E+06	7.51E+06
9.40E+06	8.83E+06	9.39E+06

	Unidades	PROMEDIO	Desviación estándar
Capacidad instalada de generación de vapor	BHP	500	0
Presión de operación del caldero	Bar	8.16	0.18
Presión de operación del <i>Yankee</i>	Bar	5.76	0.62
Presión del tanque de condensados	Bar	5.23	0.62
Eficiencia del caldero	%	80	0
Porcentaje retorno de condensado	%	71.0	13.3
Presión de descarga del condensado	Bar	1.01	0
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
Temperatura del tanque de alimentación	°C	100.3	3.92
<b>QY (Calor usado por el <i>Yankee</i>)</b>			
Entalpía del vapor saturado a la presión del <i>Yankee</i> (hg2)	kJ/kg	2.75E+03	5.08E+00
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.47E+02	2.04E+01
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
QY	kJ/h	7.00E+06	6.85E+05
<b>% Vapor <i>flash2</i> (Condensado perdido)</b>			
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.47E+02	2.04E+01
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf5)	kJ/kg	4.19E+02	0
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg5)	kJ/kg	2.68E+03	0
% Vf2	%	0	0
<b>mflash2 (Cantidad de condensado perdido)</b>			
cantidad de retorno de condensado	kg/h	2.35E+03	4.58E+02
% Vapor <i>flash2</i>	%	0	0
mflash2	kg/h	0	0
<b>QP2 (Calor perdido por el sistema)</b>			
mflash2	kg/h	0	0
Entalpía del vapor saturado a la presión del tanque de alimentación (hg5)	kJ/kg	2.68E+03	0
QP2	kJ/h	0	0
<b>hi (Entalpía de equilibrio al ingreso al caldero)</b>			
cantidad de retorno de condensado	kg/h	2.35E+03	4.58E+02
Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque recolector (hf3)	kJ/kg	6.47E+02	2.04E+01
cantidad de agua de alimentación	kg/h	9.76E+02	4.63E+02

Entalpía del líquido saturado a la presión del tanque de alimentación (hf5)	kJ/kg	4.19E+02	2.89E-13
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.36E+03
hi	kJ/h	5.80E+02	2.92E+01
<b>QU2 (Calor útil producido por el caldero)</b>			
Entalpía del vapor saturado a la presión del caldero (hg1)	kJ/kg	2.77E+03	7.30E-01
hi	kJ/kg	5.80E+02	2.92E+01
Flujo de vapor	kg/h	3.32E+03	3.27E+02
QU2	kJ/h	7.28E+06	7.32E+05
<b>QT2 (Calor total producido por el caldero)</b>	kJ/h	9.09E+06	9.15E+05

## ANEXO 5

### PRUEBA DE NORMALIDAD

Prueba de Kolmogorov - Smirnov

		QT1	QT2
N		30	30
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	9.78E+06	9.09E+06
	Desviación estándar	9.55E+05	9.15E+05
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0.268	0.220
	Positivo	0.148	0.143
	Negativo	-0.268	-0.220
Estadístico de prueba		0.268	0.220
Significancia asintótica (bilateral) <sup>c</sup>		7.78 x 10 <sup>-6</sup>	7.02 x 10 <sup>-4</sup>

a. La distribución de prueba es normal.

b. Se calcula a partir de datos.

c. Corrección de significación de Lilliefors.

## ANEXO 6

### PRUEBA DE WILCOXON

#### Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
QT1 - QT2	Rangos negativos	0 <sup>a</sup>	0.00	0.00
	Rangos positivos	30 <sup>b</sup>	15.50	465.00
	Empates	0 <sup>c</sup>		
	Total	30		

a. QT1 < QT2

b. QT1 > QT2

c. QT1 = QT2

#### Estadísticos de prueba<sup>a</sup>

	QT1 - QT2
Z	-4,782 <sup>b</sup>
Significancia asintótica (bilateral)	1.73 x 10 <sup>-6</sup>

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

b. Se basa en rangos negativos.