



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA.

DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN Y  
DISTRIBUCION DE VAPOR EN UNA PLANTA PROCESADORA DE  
PAPEL

T E S I S:  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

PRESENTAN:

SUSAN NICTE CAZARES CAMARGO

ALMA ROSA GONZALEZ ZUÑIGA

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. RODOLFO HERRERA TOLEDO

MEXICO. D.F. 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A dios por permitirnos estar aquí y darnos la capacidad de cumplir una más de nuestras metas

A nuestros padres, quienes nos han enseñado que en la vida las personas deben trascender luchando por sus ideales, así como también superarse en el día a día dando el mejor de los esfuerzos en lo que se quiera hacer. Les agradecemos, porque siempre se preocuparon por nuestra enseñanza, nuestro bienestar y su cariño, el cual no podremos pagar con nada del mundo. Gracias.

A nuestros hermanos por su preocupación, comprensión, cariño y apoyo incondicional.

A nuestro director de tesis el M.I Rodolfo Herrera Toledo, por su ayuda, paciencia, estímulo continuo, por su gran orientación en el desarrollo de esta tesis y por recibir un gran apoyo.

Al ingeniero Carlos A. Fletes Omaña por todo su apoyo, tiempo, comprensión y tolerancia en la realización de esta tesis

A la empresa papelera por brindarnos la oportunidad de ingresar en sus instalaciones y confiar en nosotros...

A nuestros cómplices que creyeron en nosotros y nos impulsaron con su amor, apoyo y comprensión, enriqueciendo nuestra vida...

A nuestros amigos de la universidad con quienes compartimos muy buenos momentos durante la etapa de estudio y aquellos momentos de trabajo para sacar adelante el proyecto.

## INDICE

|              |   |
|--------------|---|
| RESUMEN..... | 6 |
|--------------|---|

|                   |   |
|-------------------|---|
| INTRODUCCION..... | 7 |
|-------------------|---|

|                |   |
|----------------|---|
| OBJETIVOS..... | 8 |
|----------------|---|

## CAPITULO 1 PANORAMA ENERGETICO EN MEXICO

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1.1 SITUACION ENERGETICA ..... | 9 |
|--------------------------------|---|

- *EL SECTOR ELÉCTRICO EN MEXICO*
- *GENERACIÓN DE VAPOR EN MEXICO*

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1.2 AHORRO DE ENERGÍA..... | 11 |
|----------------------------|----|

|   |    |
|---|----|
| 1.3 PROGRAMAS DE AHORRO DE ENERGÍA..... | 13 |
|---|----|

- *PROGRAMA NACIONAL DE APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE ENERGIA 2009- 2012*
- *ESTUDIO DE POTENCIAL DE COGENERACION*

|  |    |
|--|----|
| 1.4 POTENCIAL DE AHORRO DE ENERGIA EN EL SECTOR PAPELER .. | 16 |
|--|----|

- *SISTEMA ELECTRICO*
- *GENERACION DE VAPOR*

## CAPITULO 2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR

|   |    |
|---|----|
| 2.1 SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR..... | 23 |
|---|----|

- *GENERADOR DE VAPOR*
- *CLASIFICACION*
- *PARTES INTEGRANTES DE UN GENERADOR DE VAPOR*

|   |    |
|---|----|
| 2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCION DE VAPOR Y RETORNO DE CONDESADOS..... | 29 |
|---|----|

- *EQUIPOS Y ACCESORIOS*

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.3 TRATAMIENTO DE AGUA..... | 30 |
|------------------------------|----|

- *AGUA DE REPUESTO.*
- *TRATAMIENTO INTERNO DEL AGUA*
- *PURGA*

|                |    |
|----------------|----|
| 2.4 VAPOR..... | 31 |
|----------------|----|

- *VAPOR SATURADO*

- VAPOR SOBRECALENTADO
- PRINCIPALES USOS DEL VAPOR EN LA INDUSTRIA

## **CAPITULO 3. SISTEMA DE COGENERACIÓN**

### **3.1 GENERALIDADES DE LA COGENERACIÓN.....36**

- *CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS DE COGENERACIÓN*
- *NUEVOS AVANCES DE LA COGENERACIÓN*
- *CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN*

### **3.2 SISTEMA DE COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA DE PAPEL.....37**

- *CARACTERÍSTICAS DE LA COGENERACIÓN EN LA PLANTA DE PAPEL*
- *EQUIPOS DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN EN LA PLANTA DE PAPEL*
- *GENERADOR DE VAPOR*
- *TURBINA DE VAPOR*
- *GENERADOR ELÉCTRICO*
- *CONDENSADOR DE VACIO*
- *INTERCAMBIADOR DE CALOR*
- *DEAREADOR*

## **CAPITULO 4. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO**

### **4.1 RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR.....44**

- *FAMILIARIZACIÓN CON EL SISTEMA DE GENERACION Y DISTRIBUCIÓN DEL VAPOR*
- *RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DOCUMENTAL*
- *REALIZACION DEL DIAGRAMA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION DEL VAPOR*

### **4.2 EVALUACIÓN ENERGÉTICA.....50**

- *MEDICIÓN DE PARÁMETROS*
- *BALANCES DE MASA Y ENERGIA*

### **4.3ANÁLISIS DE RESULTADOS.....58**

## **CAPITULO 5. PROPUESTA PARA AHORRO DE ENERGÍA EN LA PLANTA DE PAPEL**

### **5.1 PROPUESTA 1 .....61**

|  |            |
|--|------------|
| • <i>EVALUACION ENERGETICA</i>                                   |            |
| • <i>ELABORACION DIAGRAMA DE SANKEY</i>                          |            |
| <b>5.2 PROPUESTA 2.....</b>                                      | <b>63</b>  |
| • <i>EVALUACION ENERGETICA</i>                                   |            |
| • <i>ELABORACION DIAGRAMA DE SANKEY</i>                          |            |
| <b>5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>                             | <b>65</b>  |
| • <i>VALOR PRESENTE NETO</i>                                     |            |
| • <i>TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE CAPITAL</i>                       |            |
| • <i>TIR</i>   |            |
| • <i>BENEFICIO/COSTO</i>   |            |
| <b>5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>                           | <b>76</b>  |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>81</b>  |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>82</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS Y DIAGRAMAS.....</b>                         | <b>84</b>  |
| <b>ANEXOS</b>  |            |
| <b>ANEXO A. DATOS DE EQUIPOS.....</b>                            | <b>85</b>  |
| <b>ANEXO B. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.....</b> | <b>87</b>  |
| <b>ANEXO C. BALANCE DE MASA Y ENERGIA.....</b>                   | <b>89</b>  |
| <b>ANEXO D. DIAGRAMA DE MOLIER PARA EL SISTEMA.....</b>          | <b>100</b> |
| <b>ANEXO E. FINANCIAMIENTO PROPUESTA 1.....</b>                  | <b>101</b> |
| <b>ANEXO F. FINANCIAMIENTO PROPUESTA 2 .....</b>                 | <b>102</b> |

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizo un diagnostico energético en el sistema de generación de vapor ya que es muy importante aprovechar los recursos no renovables de manera adecuada debido principalmente a que en la actualidad vemos reflejados los efectos que ocasionan a nuestro planeta, los excesos de la quema de combustible

Comenzamos dando un panorama de la situación energética en México tanto en el sector eléctrico como en el de generación de vapor, así mismo se mencionan algunas sugerencias para el ahorro de energía, posteriormente se realiza una descripción breve del sistema de generación de vapor, el cual para su mejor comprensión fue dividido: en generación, distribución y retorno de condensados, en este mismo capítulo se describen algunos de los tratamientos para agua de calderas tanto externos como internos y se menciona la importancia dentro del proceso de generación de vapor de igual forma en el capítulo 3 se describe el sistema de cogeneración, y de esa forma teniendo una descripción general, realizamos el diagnostico energético en la planta procesadora de papel , en la cual comenzamos con una descripción del sistema de generación de vapor, realizamos los balances de materia y energía para detectar los principales puntos de ahorro.

Se localizaron dos equipos en los cuales su eficiencia era muy baja: el generador de vapor y la turbina, siendo estos equipos nuestra base para realizar nuestra propuesta para ahorro de energía, en la primer propuesta se realiza una evaluación energética y económica con la sustitución del generador de vapor, y el segunda se reemplazan el generador de vapor y la turbina, se analizan ambas propuesta con índices como el valor presente neto (VPN) , el tiempo de recuperación de capital y la TIR.

Para concluir hacemos una observaciones generales acerca del sistema de generación de vapor actual y sugerimos la propuesta 2 como la opción mas viable según nuestra evaluación, pero dejamos abierta la opción de la aplicación de cualquiera de la propuestas según sea el presupuesto de la planta procesadora de papel

## **INTRODUCCIÓN**

Los recursos energéticos representan para las sociedades un bien estratégico y cada vez máspreciado, tanto por ser un factor determinante en el desarrollo económico, como también por su difícil obtención. Los sectores productivos con más años en la industria, son de baja eficiencia aunados a que muchos de sus equipos cumplieron su ciclo de vida o son ya obsoletos con respecto a las tecnologías actuales.

Lo anterior, implica que disipen calor a la atmósfera de forma considerable y generen altos costos en su operación, en particular por consumo de combustible fósil, que como es sabido es la fuente de energía convencional en los equipos de generación de vapor y hornos de calentamiento principalmente.

No obstante a pesar de que la mayoría de las empresas tienen conocimiento de lo anterior solo una minoría a tomado medidas para solucionarlo sin embargo las que lo han hecho solo contabilizan la energía pero no la administran. Cabe mencionar que los problemas que derivan de falta de administración energética implica además del costo de combustibles y un elevado consumo del mismo un daño ambiental cada vez más preocupante.

Tal ha sido la relevancia del ahorro energético, que el país cuenta actualmente con instituciones gubernamentales que promueven el uso racional y eficiente de la energía como la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Secretaria de Energía (SENER) principalmente que tienen como objetivo primordial conducir una política energética que promueva la eficiencia energética en materia de aprovechamiento sustentable de la energía en todos los procesos y actividades industriales.

En el presente trabajo de tesis se realiza la aplicación de un diagnostico energético en el sistema de generación y distribución de vapor en una planta procesadora de papel comenzando con una evaluación energética que nos ayuda a distinguir los principales puntos de ahorro de energía, y de esta forma realizar un par de propuestas que evaluaremos económicamente con parámetros como el valor presente neto, tiempo de recuperación de capital entre otros, para analizar la factibilidad de su aplicación dentro de la planta procesadora de papel.

## **OBJETIVOS**

General:

- Realizar un diagnóstico energético mediante la cuantificación de la eficiencia real del sistema de generación y distribución de vapor de la planta procesadora de papel

Particulares:

-Encontrar la eficiencia operativa actual del generador de vapor.

-Realizar la medición y cuantificación de las principales variables de operación del sistema de generación y distribución de vapor.

-Identificar y definir los factores dentro del sistema de generación de vapor que producen pérdidas de energía y disminuyen su eficiencia.

-Generación de propuestas para ahorro de energía en el sistema de generación de vapor

-Determinar en base a una evaluación económica la factibilidad de las propuestas generadas.

## **CAPITULO 1 PANORAMA ENERGÉTICO EN MÉXICO**

### **1.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA**

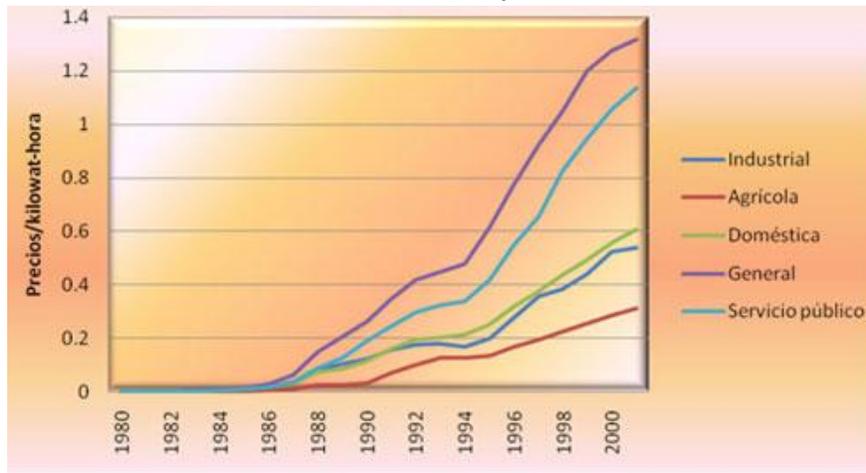
Por décadas México disfrutó de precios bajos en los combustibles y electricidad, así como una economía protegida \*[1], lo cual, llevo a las industrias en general, a tomar la decisión de seleccionar sus equipos en función del precio, sin tomar en consideración si el tamaño y diseño, eran las adecuadas para su producción. Lo anterior, implica un consumo mayor de combustible fósil y de electricidad, generando altos costos en su operación y produciendo grandes cantidades de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>) y de esta forma contribuir al calentamiento global, amenazando gravemente la vida en el planeta.

#### **EL SECTOR ELÉCTRICO EN MEXICO**

El sector eléctrico en México se considera estratégico para la soberanía nacional. Hoy en día la producción de electricidad se basa en gran medida en fuentes térmicas (74% de la capacidad instalada total), seguido por la generación hidroeléctrica (22%). Aunque la explotación de recursos solares, eólicos y biomasa cuentan con un gran potencial, la energía geotérmica es el único recurso renovable (excluyendo la hidroeléctrica) con una contribución visible en la producción de energía (2% de la capacidad de generación total). Los planes de expansión para el período 2006-2015 suponen la incorporación de unos 24.000 MW de nueva capacidad de generación, con un predominio de ciclos combinados.

La evolución histórica de los precios (grafico 1) y tarifas del sistema eléctrico, responde a la aplicación de políticas tendientes a reducir o eliminar el subsidio al consumo eléctrico y podría resumirse a lo siguiente: “La política consiste en incrementar las tarifas eléctricas y su efecto será la disminución o eliminación de los subsidios para la población que consuma más de 280 kilowatts/hora (KW/h) al bimestre” (Cámara de Diputados, 2005)

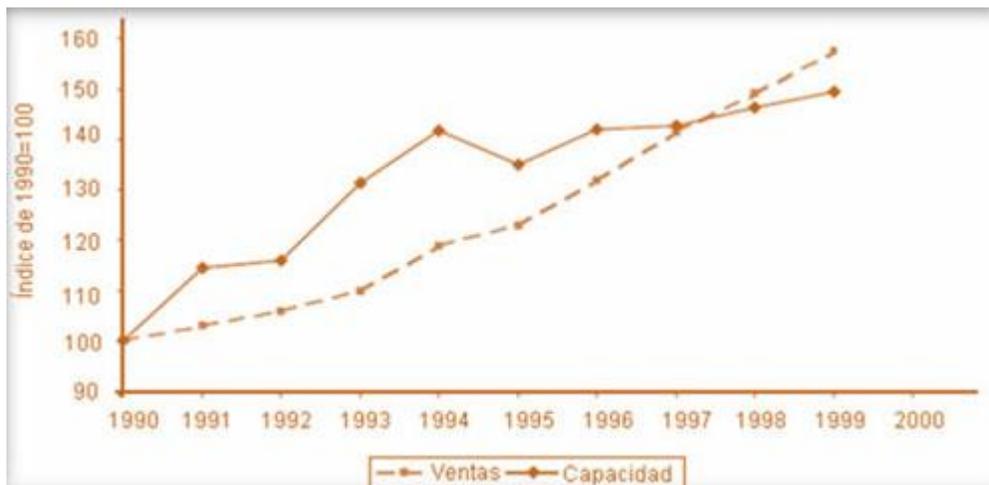
Gráfica 1: Evolución histórica de los precios de electricidad CFE.



Fuente: Secretaría de Energía .Compendio estadístico del sector energía

Como se puede observar en la gráfica 1, a partir de 1986 comienza una escalada de precios tendientes a disminuir los subsidios con el objeto de permitir posteriormente la incorporación de la generación privada bajo el esquema de **cogeneración**.

Gráfica 2. Ventas de electricidad y capacidad de generación



Fuente: Elaborado con información de la Secretaría de Energía, El presente y el futuro del sector eléctrico mexicano.

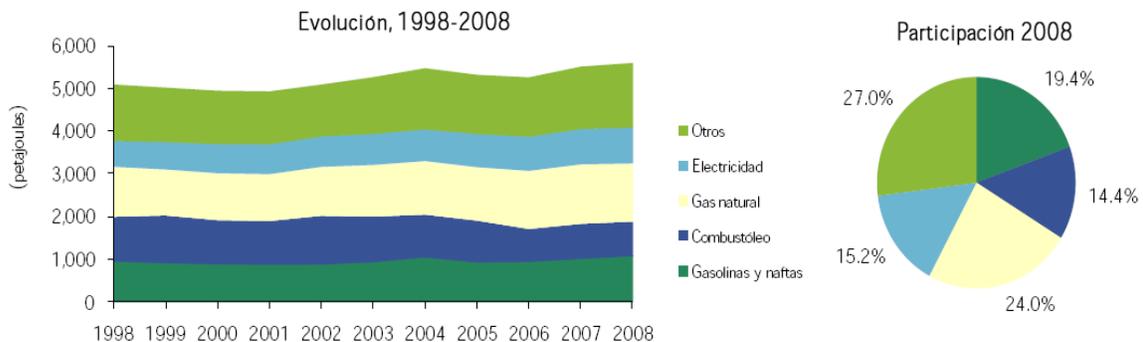
El desfase entre la tasa de crecimiento de la demanda de energía y la de la capacidad instalada se debe a la falta de recursos del Estado, razón por la cual en 1992 se reconoce la necesidad de incluir inversión privada. “En 1992, se reformó la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) para consolidar las modalidades de Autoabastecimiento, Cogeneración y Productor Independiente de Energía (SENER, 2007).”

### **GENERACIÓN DE VAPOR EN MEXICO**

En México como en todo el mundo el vapor es el servicio auxiliar más utilizado en la industria debido a su bajo costo y gran capacidad calorífica, el inconveniente de la generación de vapor es la quema de combustible las emisiones de gases de efecto invernadero que produce la quema de ellos. No hay que perder de vista que México ocupa el lugar número 14 dentro de los 25 países considerados como mayores emisores de gases de efecto invernadero, con una participación del 1.23 por ciento respecto al total mundial. El sector que más contribuye a la emisión de GEI (gases de efecto invernadero) es la generación de energía con 72% del total para el periodo 1190-2002, seguida del sector transporte: ambos producen más del 40% de las emisiones totales del país.

La estructura actual de los energéticos se caracteriza por su alta dependencia en los hidrocarburos y gas natural. En el año 2008, la producción de energía primaria se basó principalmente en hidrocarburos, (Grafica 3) en tanto que los combustibles con mayor demanda en el consumo final energético fueron: gasolina y naftas (19.4%), electricidad (15.2%), combustóleo (14.4%) y gas natural (24%).

Grafica 3. Consumo de combustibles



Fuente: Sistema de Información Energética.

## 1.2 AHORRO DE ENERGÍA

Tal ha sido la relevancia del ahorro energético, que el país cuenta actualmente con instituciones gubernamentales que promueven el uso racional y eficiente de la energía como la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Secretaría de Energía (SENER) apoyada por el FIDE que tienen como objetivo primordial conducir una política energética que promueva la eficiencia energética en materia de aprovechamiento sustentable de la energía en todos los procesos y actividades industriales.

Grafica 4. Consumo de energía por ramo industrial (peta joule)



Fuente: Balance Nacional de Energía .2008

La CONUEE estima que en México tenemos un potencial de ahorro de energía superior al 20%, para el 2012 lo que significa una economía de 100 mil millones de pesos al año. Esto se puede lograr con la participación de los gobiernos estatales y federales, así como con una participación activa de las industrias con uso eficiente de la energía. (Grafica 4)

Lo anterior, consiste en usar la energía disponible de la mejor forma: dar un rendimiento óptimo a los recursos con la menor cantidad de éstos, lo cual contribuye al desarrollo sustentable del país en la medida que promueve el mejor uso de los recursos energéticos, esenciales para gran parte del quehacer económico y humano.

Es una oportunidad para mejorar la competitividad del país (como es nuestro caso que se trata de una empresa mexicana), en la medida en que se preservan los recursos naturales y se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero mitigando así el cambio climático, la peor amenaza que enfrentamos.

### **1.3 PROGRAMAS DE AHORRO DE ENERGÍA**

El Sector energético juega un papel muy importante en nuestro país: es decisivo en la economía y tiene una clara influencia en el aparato productivo, entre otros puntos esenciales. Estos motivos marcan que es necesaria una adecuada política energética que responda a un desarrollo dinámico económicamente equitativo y con protección del ambiente.

Se observarán los esquemas de estrategias que por medio de las instancias gubernamentales, como CONUEE, el Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica (FIDE); se han concretado, así como los programas que se encuentran en su proceso de desarrollo, debemos tener muy en claro que en México, el único instrumento claro de la política pública para el ahorro de energía son sus Instituciones, de ahí la importancia de conocer sus planes, programas, lineamientos, resultados etcétera.



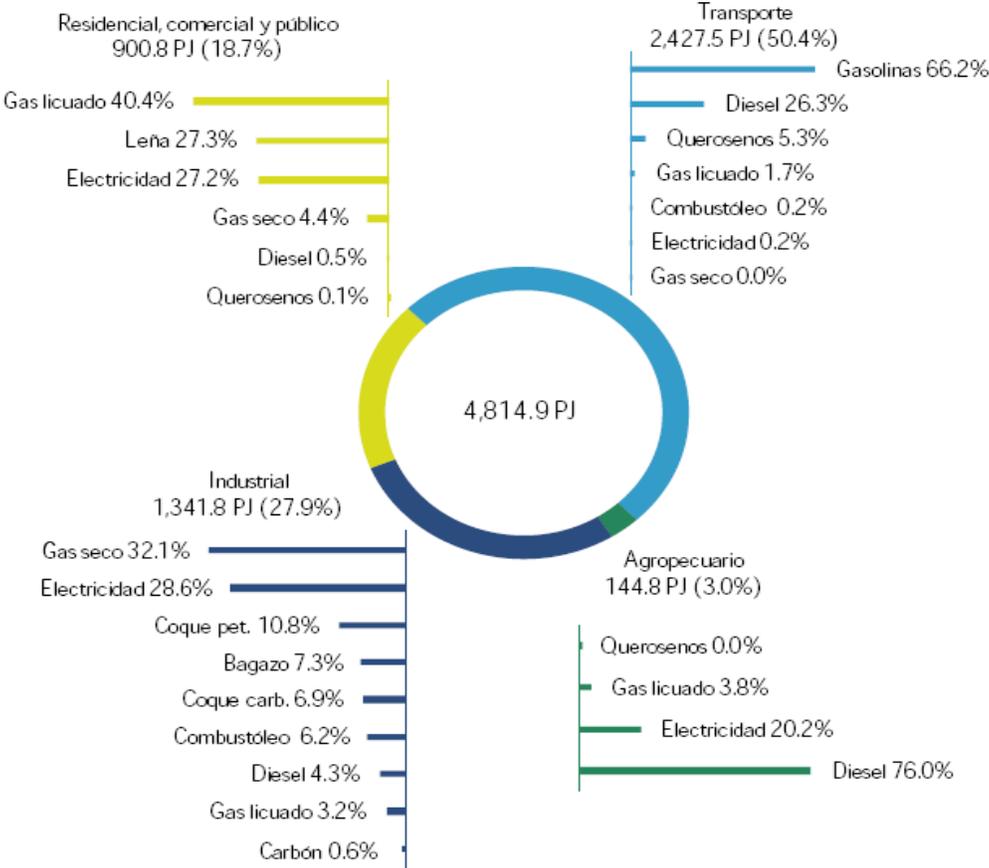
### **PROGRAMA NACIONAL DE APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE ENERGÍA 2009-2012**

En el Cuarto Foro de Difusión del Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012 identifica oportunidades para lograr un mejor aprovechamiento de la energía y generar ahorros sustanciales para el país en el mediano y largo plazo. El Programa define una estrategia integral para abordar y capturar el impacto mediante acciones, priorizando las medidas que concentran el grueso del impacto potencial.

En México el consumo final de energía representó el 56% del consumo nacional energético en 2008 (Grafica 5). Dentro del consumo final de energía, más del 90% de éste se concentra en los sectores transporte, industrial, residencial y comercial, para el 2030 se espera, en particular, que el sector transporte represente aproximadamente el 50% del consumo final de energía, seguido por el sector industrial con el 30% de consumo y por los sectores residencial, comercial y público que concentren aproximadamente el 15%. Los sectores con mayor crecimiento son el industrial, agropecuario y el de transporte.

Los energéticos de mayor utilización son: en el sector transporte la gasolina y el diesel; en la industria el gas natural (GN) y la electricidad, y en el sector residencial la electricidad y el gas licuado de petróleo (GLP).

Grafica 5. Consumo final energético por sector y tipo de energético, 2008



Fuente: Sistema de Información Energética, con cálculos propios.

No se espera un gran cambio en la proporción de uso de estos energéticos y hacia el 2030 se espera que continúen representando el grueso del consumo.

Por otra parte, en la actualidad existen diferencias entre las tecnologías que pueden utilizarse a lo largo de los sectores de consumo. Estas diferencias presentan oportunidades concretas para aumentar la eficiencia energética en el uso final de energía. El potencial de ahorro de energía es distinto para los sectores en función del total del consumo energético y la oferta tecnológica existente en equipos nuevos.

Se identificaron siete áreas de oportunidad prioritarias en las que se centra este Programa. Estas áreas representan oportunidades costo-efectivas para aumentar la eficiencia energética.

Transporte. Aborda el consumo de energía en el transporte automotor, tanto ligero y mediano, así como de carga pesada.

Iluminación. Comprende las necesidades de iluminación a lo largo de los sectores residencial, comercial, servicios e industrial, así como dentro de las dependencias y entidades de la APF y dentro de gobiernos estatales y municipales.

Equipos del hogar y de inmuebles. Se refiere al consumo de energía derivado del uso de los aparatos electrodomésticos, electrónicos y equipos de mayor consumo dentro de los hogares y otros edificios, incluyendo acondicionamiento de aire, refrigeración y calentamiento de agua.

**Cogeneración. Identifica la posibilidad de ahorro de energía en las industrias con potencial latente en esta materia.**

Edificaciones. Aborda las oportunidades de ahorro de energía derivadas de mejoras en las prácticas de construcción.

Motores industriales. Actúa sobre el consumo de energía en los motores que representan la gran mayoría del parque y del consumo de motores en el país.

Bombeo de agua. Comprende el consumo de energía para fines de bombeo agrícola y municipal.

### **ESTUDIO DE POTENCIAL DE COGENERACION**

Por otra parte se realizó un “Estudio de potencial de cogeneración en México” el cual establece acciones, dentro de las estrategias y líneas de acción del Programa “Sectorial de Energía 2007-2012, para lograr en el corto plazo el desarrollo efectivo de la cogeneración en México”.

Dentro de las estrategias concebidas para alcanzar esta situación se incluyen líneas de acción tendientes al desarrollo de políticas públicas y fomentar e impulsar a la cogeneración eficiente, dentro de un marco regulatorio que la aliente.

La cogeneración debe satisfacer los requerimientos de energía de los procesos industriales; por ello, debe ser:

- Adecuada para los requerimientos del proceso productivo del usuario.
- Flexible para variaciones estacionales y horarias.
- Con alto grado de confiabilidad y disponibilidad.
- Con nivel de inversión competitiva.
- Que genere ahorros económicos sustantivos en comparación con las condiciones actuales, para que éstos permitan pagar la inversión y su financiamiento.

Cada empresa tiene requerimientos térmicos y eléctricos específicos. Al efectuar el diseño de la cogeneración se debe seleccionar los equipos eléctricos y térmicos más apropiados para satisfacer dichos requerimientos del proceso, con un enfoque de diseño eléctrico o térmico.

El desarrollo de la cogeneración permite utilizar menos combustibles para obtener la misma energía en forma de calor y electricidad, con importantes beneficios adicionales, tanto ambientales como económicos. En el caso particular de México, los principales beneficios por el desarrollo de la cogeneración son:

- Ahorro de energía primaria de combustibles nacionales.
- Reducción en la importación de combustibles.
- Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Nuevas inversiones, desarrollo regional y creación de empleos.
- Liberación de capacidad de la red y de las subestaciones eléctricas en el SEN.
- Reducción de pérdidas de transmisión, transformación y distribución en el SEN.

#### **1.4 POTENCIAL DE AHORRO DE ENERGIA EN EL SECTOR PAPELERO**

Usar eficientemente la energía significa no emplearla en actividades innecesarias y conseguir hacer las tareas con el mínimo consumo de energía posible. Desarrollar tecnologías y sistemas de vida y trabajo que ahorren energía es lo más importante para lograr un auténtico desarrollo

Existe una amplia gama de acciones que permiten ahorrar energía, estas medidas nos ayudarán a combatir el cambio climático, la mayor amenaza que enfrenta el

planeta y conformar una nueva cultura de eficiencia energética. Entre algunas medidas del mismo se pueden considerar las siguientes:

### **POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO**

Un programa para el uso eficiente de la energía eléctrica puede desarrollarse desde lo más global en el alimentador principal de la planta, hasta lo más puntual en los equipos que conforman cada uno de los procesos industriales. A continuación se mencionan algunas de las alternativas para el ahorro de la energía eléctrica que para fines de este trabajo de tesis no se pusieron en práctica.

#### **ALTERNATIVAS PARA AHORRAR ENERGÍA EN TRANSFORMADORES**

Las principales recomendaciones que permiten reducir el consumo de energía eléctrica en transformadores son las siguientes:

- Utilizar siempre transformadores de bajas pérdidas.
- Desconecte siempre el transformador desde el primario, así se evitará el consumo de energía debido a las pérdidas en vacío.
- Procurar conocer la carga del transformador para no sobrecargarlo, y así reducir las pérdidas en el Cobre.
- Evitar operar el transformador a baja carga (< al 20%), si es posible redistribuir las cargas.
- Revisar el nivel y rigidez dieléctrica del aceite cada 6 meses, con el fin de controlar la capacidad aislante y refrigerante del mismo.
- Realizar una limpieza periódica del transformador es decir superficie del tanque, aletas disipadoras de calor, bornes, etc.
- Medir con frecuencia la temperatura superficial del transformador, ella no debe ser superior a 55 °C, de ser así, debe revisarse el aceite dieléctrico.

#### **ALTERNATIVAS PARA AHORRAR ENERGÍA EN EL SISTEMA DISTRIBUCIÓN**

Algunas recomendaciones que permiten reducir el consumo de energía eléctrica en el sistema de distribución de energía eléctrica son las siguientes:

- Revisión de conexiones y terminales.

Las conexiones flojas o inadecuadas aumentan las pérdidas de energía. En estos casos se presentan altas resistencias por lo cual se requieren corrientes más altas, aumentando el consumo de energía.

- Revisión de conductores.

Una de las principales causas de pérdidas en el sistema de distribución se relaciona con la sobrecarga de los conductores, la cual ocasiona significativos incrementos de la temperatura. Efectuando una revisión de las temperaturas de los conductores en el mantenimiento permite detectar esta anomalía. Con el

reemplazo del conductor por uno de mayor capacidad o la redistribución de la carga se pueden eliminar estas pérdidas adicionales.

- Eliminación de falla a tierra.

En sistemas trifásicos conectados en triángulo se presentan corrientes de fuga permanentes sin que sean detectados por los dispositivos de protección. Si estas corrientes no se corrigen, existirá un desperdicio de energía y se tendrá un peligro para el equipo.

- Conductores y canalizaciones.

Si al realizar las inspecciones de mantenimiento se encuentran conductores, canalizaciones, tableros u otros equipos con disipación anormal de calor, se debe estudiar la posibilidad de cambios en las instalaciones. Todo conductor de electricidad al aumentar la temperatura, aumenta su resistencia al paso de la corriente, aumentando finalmente las pérdidas en el cobre  $I^2 R$ .

- Fluctuaciones de voltaje.

Las fluctuaciones de voltaje no solo incrementan momentáneamente las pérdidas  $I^2R$  por calor sino que en mayor grado afectan el funcionamiento, rendimiento y vida útil de los equipos conectados al sistema. La primera acción para controlar las fluctuaciones de voltaje y reducir sus efectos es instalar un alimentador o subestación separada para este tipo de cargas; este método tiende a aislar eléctricamente la carga fluctuante de la carga que requiere voltaje uniforme. Si esto no fuera posible, la variación brusca de corriente deberá limitarse a un mínimo.

#### ALTERNATIVAS PARA AHORRAR ENERGÍA EN FUERZA MOTRIZ

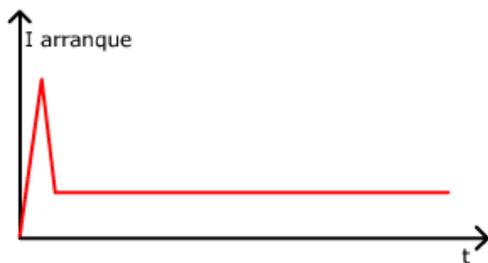
Las principales recomendaciones que permiten reducir el consumo de energía eléctrica en fuerza motriz son las siguientes:

- Evitar el arranque y la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.
- Evitar la operación en vacío de los motores.
- Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.
- Corregir la caída de tensión en los alimentadores (Ver Figura 1). Una tensión reducida en los terminales del motor, genera un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída de tensión del 5%. Para ellos utilizar conductores correctamente dimensionados.
- Balancear la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe exceder en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desbalance (ojala < del 2%), los motores operarán con mayor eficiencia.

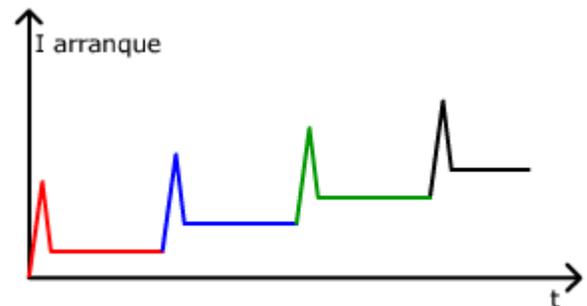
- Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques. Con esto se evita el calentamiento excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración
- Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes, porque las resistencias llegan a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.
- Instale equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación en cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.
- No se recomienda rebobinar los motores más de 2 veces, porque puede variar las características de diseño del motor, lo cual incrementaría las pérdidas de energía (disminución de la eficiencia).

Fig. 1. Tipos de arranques

#### ARRANQUE INCORRECTO



#### ARRANQUE CORRECTO



Fuente: CFE

### **POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICA EN SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR**

A continuación se presentan una serie de recomendaciones generales para ahorro de energía en el sistema de generación de vapor en la producción de papel, debido a su extensión no se consideraron en este trabajo de tesis.

#### *LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES DE CALEFACCIÓN.*

Las superficies de calefacción se ensucian frecuentemente por formación de depósito de hollín por inquemados y por arrastre de sales.

La precipitación de las sales de calcio y magnesio debido a la alcalinidad de la lejía afectara el intercambio de calor disminuyendo el coeficiente de transmisión de Calor.

### *CONTROL DE GENERADORES DE VAPOR*

Los generadores de vapor, sea cual fuese el tipo de combustible (fuel-oil, leñas negras o residuos de madera), deben estar permanentemente sometidas a varios tipos de controles:

- Control Caudal.

Estas industrias usualmente utilizan como combustible primario los chips de madera, leña, bagazo, etc., ya que éstos son subproductos o en algunos casos desechos industriales. Estas industrias generalmente tienen la posibilidad de quemar combustibles suplementarios tales como: fuel oil, gas natural y carbón pulverizado.

Es prácticamente imposible una medición precisa del caudal de los chips de madera. Los sistemas de medición más utilizados en la industria del papel son aquellos basados en la medición de la velocidad de desplazamiento y peso del combustible sobre una cinta transportadora.

Estos sistemas dan buenos resultados cuando recién están calibrados, pero las variaciones en el tipo de madera, contenido de humedad, suciedad y otros efectos, terminan por producir corrimientos en esta calibración. Debido a esto, los chips de madera nunca deben quemarse solos, sino combinados con otro combustible suplementario.

- Control de Purgas

Las purgas continuas y discontinuas suelen ser un punto de fuga de calor. Una posible disminución de purgas puede conseguirse con una desmineralización Total, por una parte, y con una buena desgasificación térmica, que disminuirá el Consumo de sulfito sódico, con lo que la salinidad de alimentación podría rebajarse.

- Control de Fugas

Un pequeño poro en una tubería de vapor produce unas pérdidas de calor aparentemente sin importancia, pero que al cabo del año pueden ser importantes. A veces estas fugas se encuentran enmascaradas por la capa de aislamiento que envuelve a la tubería o recipiente sin que se vea aparentemente un escape espectacular de vapor.

### *APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN*

Por razones económicas, cada fabricante de calderas ha definido una temperatura mínima para los gases después de recalentar el vapor, por debajo de la cual sería antieconómico seguir calentado más el vapor ya que encarecería el costo del recalentador; quedan, pues, unos gases calientes cuyo calor sensible aún es posible utilizar para precalentar el aire de combustión.

La aplicación de la corriente de calor emitido por los gases de las calderas, pueden utilizarse en el precalentamiento de aire de las calderas o su uso en evaporadores de contacto directo para evaporar lejías negras. Esta última solución es muy característica de la industria pastera, ya que los evaporadores a vacío difícilmente pueden concentrarse más del 40%, siendo necesaria una concentración suplementaria a base de contacto directo con los gases.

### *DISPOSICIÓN DE AGUA CALIENTE*

El disponer de agua caliente en los filtros de lejías mejora el filtrado, la adición de agua caliente en los regadíos será menor que si el agua fuera fría y, por consiguiente, la concentración de lejías negras obtenidas será mayor con lo que el consumo de vapor en el múltiple efecto será menor.

En cuanto a la sección húmeda de la máquina de papel, la actuación de las prensas y cajas de vacío más eficaces, y en consecuencia, la hoja entrará en la parte más seca, necesitándose menos vapor en esta última fase, que es precisamente la que más porcentaje de vapor consume. Pero así como la temperatura del agua produce estos efectos beneficiosos, puede convertirse en perjudicial si no se tiene en cuenta su calidad.

### *RECUPERACIÓN DE CALOR DEL BLOW-TANK*

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 a grandes acumuladores de vapor. Se han desarrollado varios métodos de recuperación, que van desde el intercambio por contacto directo con agua, en el que el rendimiento sería del 100%, pero presentando el inconveniente de obtener un agua caliente contaminada, hasta condensadores de tubo, con menor rendimiento térmico pero permitiendo obtener, por una parte el condensado a 100°C contaminado y por otra agua caliente a 60 -70°C.

## **CONCLUSIONES**

En este capítulo se realizó una inspección a nivel general de la intensidad energética en la que se encuentra México, así como la importancia del ahorro de energía, teniendo beneficios en el aspecto ambiental y económico de la industria. Así mismo se presentan las instituciones que contribuyen al aprovechamiento de la energía en México incluyendo sus principales programas. Finalmente se dan sugerencias de potenciales de ahorro de energía dentro de la industria del papel.

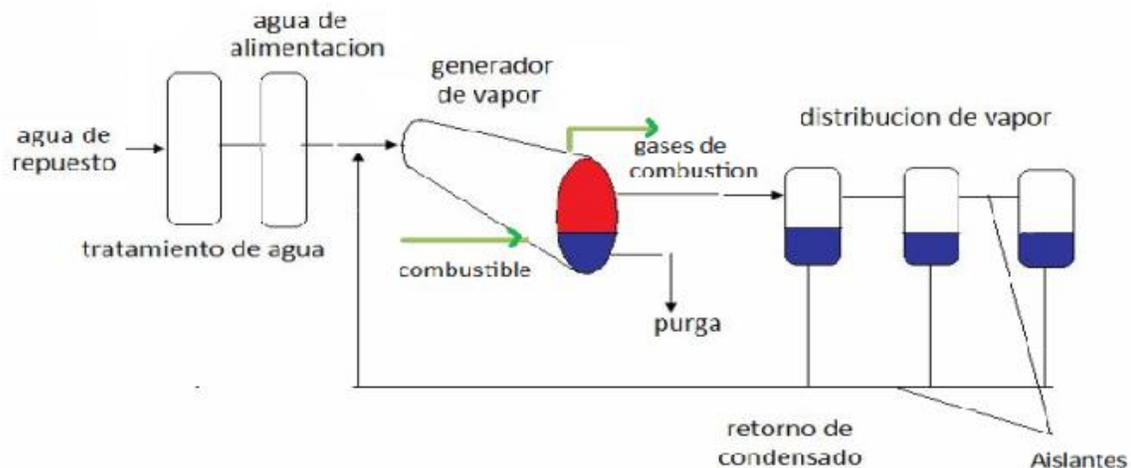
## CAPITULO 2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR

### 2.1 SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

Es un proceso que comienza con la combustión, concebida en el generador de vapor, en la cual se libera energía térmica a alta temperatura. Los productos resultantes de la combustión inician un proceso de transferencia a través de superficies metálicas al agua de alimentación previamente tratada, que es inyectada a presión suficiente para vencer todas las resistencias del sistema, se calentará hasta su temperatura de saturación y cambio de fase para convertirse en vapor saturado o, elevará su temperatura para ser entregado con el grado de sobrecalentamiento requerido al proceso.

El vapor automáticamente fluye hasta el punto de consumo a través del sistema de tubería impulsado por el gradiente de presión en donde será utilizado en diferentes funciones de la fábrica, después de ceder su energía calorífica se condensa y recicla al proceso parcialmente. Para su mejor comprensión dividiremos el sistema de generación en tres partes: generación, distribución y retorno de condensado. (Fig. 2)

Fig.2. sistema de generación de vapor



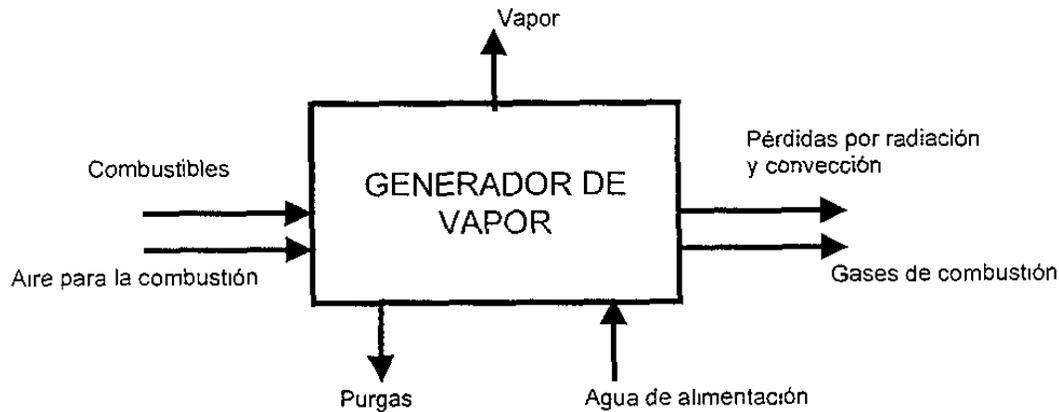
### GENERADOR DE VAPOR

Un generador de vapor (G.V.) se define como un equipo que, genera y entrega vapor en la cantidad, calidad (presión, temperatura, humedad, pureza) y oportunidad requeridas por el usuario. Frecuentemente a los generadores de vapor se les denomina también con el nombre de calderas y para el presente trabajo se omite este término, ya que se hace notar en un sentido estricto de la palabra, que la caldera es un equipo que sirve para calentar un fluido, a pesar de

que en ciertos casos, sirve para evaporar dicho fluido, produciéndose vapor saturado, con lo cual cae dentro de la definición de generador de vapor.

Un generador de vapor opera mediante la coordinación de energía entre cinco elementos: aire, combustible, productos de combustión, agua y vapor. En la fig. 3. Se puede observar esquemáticamente las corrientes que intervienen en el balance de masa y de una energía de un generador de vapor

Fig.3. Balance de masa y energía en un generador de vapor

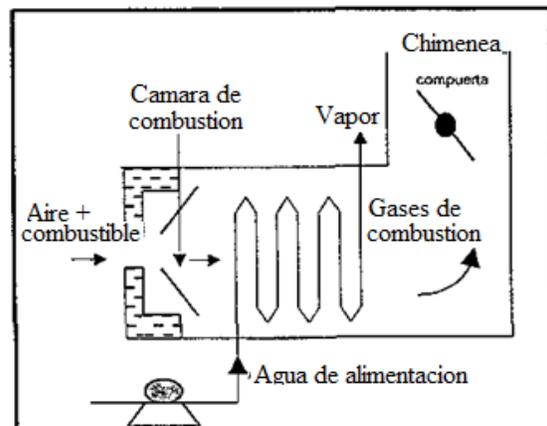
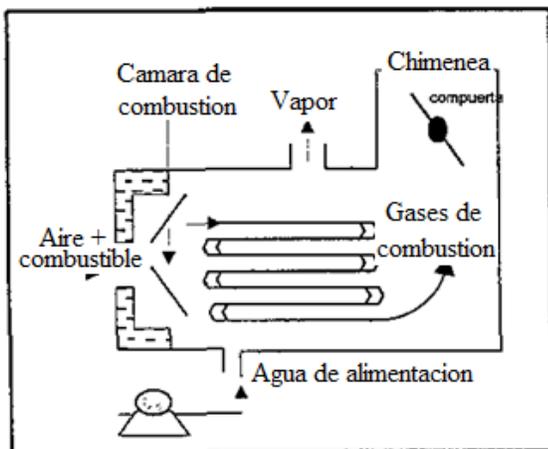


**CLASIFICACIÓN**

Los generadores de vapor pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios; en este trabajo de tesis se consideran por la forma en que circulan los gases de combustión en dos tipos: piro tubulares (fig.4) y acuotubulares (fig.5) que emplean combustibles líquidos o gaseosos.

Fig.4. Generador tipo piro tubular

Fig. 5. Generador tipo acuotubular



## GENERADORES DE VAPOR TIPO PIROTUBULAR

En estos equipos los gases de combustión son obligados a pasar por el interior de los tubos rectos, que se encuentran sumergidos en la masa de agua – tubos de humo -. Todo el conjunto, agua y tubo de gases , se encuentran rodeado por una carcasa exterior. los gases calientes al circular por los tubos ceden calor (Fig. 6) , el cual se transmite a través de los tubos al agua para lograr obtener vapor saturado.

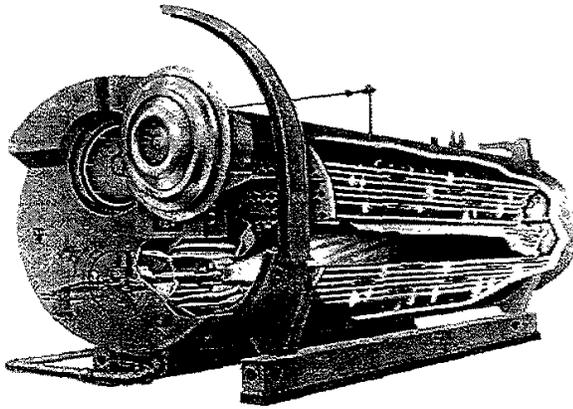


Fig 6. Generador de vapor pirotubular

| CARACTERÍSTICAS  |   |
|------------------|---|
| FUNCIONAMIENTO   | Los humos pasan por dentro de los tubos cediendo su calor al agua que los rodea.              |
| TIPO DE VAPOR    | Vapor saturado o agua caliente  |
| FLUJO            | Máximo de 20000 Kg/h  |
| PRESIÓN          | Baja hasta 10.5 Kg/cm <sup>2</sup><br>Alta hasta 20 Kg/cm <sup>2</sup>                        |
| USOS             | Calefacción ,<br>Servicios auxiliares en procesos industriales                                |
| PUESTA EN MARCHA | Lenta   |
| PELIGROSIDAD     | Gran peligrosidad en caso de explosión o ruptura debido a la gran cantidad de agua almacenada |
| COSTO            | Costo inicial y de mantenimiento bajo   |
| TAMAÑO           | Gran tamaño y a medida que aumenta la capacidad este aumenta                                  |
| MANTENIMIENTO    | Fácil inspección, reparación y limpieza   |

## **GENERADORES DE VAPOR TIPO ACUOTUBULAR**

En estos equipos los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, (Fig. 7) mientras que por su interior lo hace el agua- tubos de agua-, posteriormente en la mezcla agua- vapor y finalmente vapor.

Estos tienen una gran escala de producción de vapor, la cual puede variar desde una pequeña producción de vapor, hasta las grandes producciones de vapor para centrales termoeléctricas; ya que el volumen de los gases calientes es mucho mayor que el volumen del líquido que circulan dentro de los tubos, lo que permite un calentamiento más exhaustivo del fluido motor

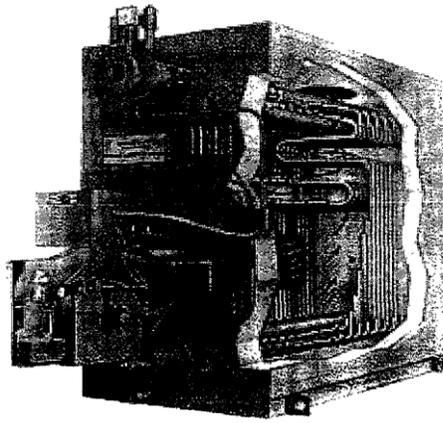


Fig. 7. Generador de vapor tipo acuotubular.

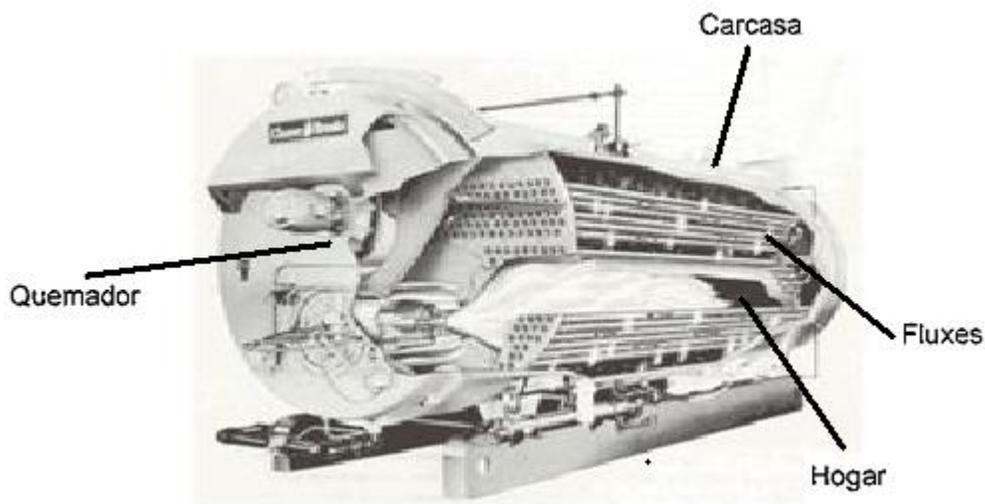
| CARACTERISTICAS  |  |
|------------------|--|
| FUNCIONAMIENTO   | El agua circula por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que pasan por el exterior vapor saturado o sobrecalentado |
| FLUJO            | Máximo de 2000 ton/h   |
| PRESIÓN          | Más de 200 kg/cm <sup>2</sup>  |
| USOS             | Generación de electricidad<br>Servicios auxiliares en procesos industriales  |
| PUESTA EN MARCHA | Rápida   |
| PELIGROSIDAD     | Cuando hay ausencia de agua o se excede su presión   |
| TAMAÑO           | compactas  |
| MANTENIMIENTO    | Las altas temperaturas en la zona de combustión (hogar) ocasionan elevados costos de mantenimiento                                       |

## PARTES INTEGRANTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

Las partes principales integrantes de un generador de vapor.

- a) Carcasa: es el cuerpo del generador de vapor, puede ser ovalado, cilíndrico o cuadrado.
- b) Hogar: es el lugar donde se lleva a cabo la combustión, se encuentra en contacto directo con la flama y por lo tanto es la zona donde se presenta la más alta temperatura de los gases de combustión.
- c) Quemador : se utiliza para realizar la mezcla aire combustible y realizar la combustión
- d) Fluxes: son los conductos por los que circulan los gases de combustión, cediendo calor al agua dependiendo del tipo de generador de vapor que se trate (Fig.8)
- e) Chimenea: se emplea para descargar los gases de combustión y lleva en su interior un recubrimiento refractario y por el exterior una capa de aislante para protección de los operadores

Fig. 8 partes integrantes de un generador de vapor



El equipo moderno de generación de vapor requiere una gran cantidad de equipo adicional, ya sea como auxiliar para incrementar la eficiencia de operación, o bien, por las características que deba reunir el vapor. El equipo complementario varía dependiendo del tipo de generador de vapor, de la calidad y de la seguridad en la generación.

Dentro del equipo complementario se encuentra el siguiente:

- Sobrecalentadores
- Desaerador
- Sopladores de hollín
- Sistema de tiro
- Precalentadores de aire
- Economizadores
- Desobrecalentadores o atemperadores
- Recalentadores

Cuyas funciones principales son:

Sopladores de hollín: el depósito de partículas de carbón en el interior de un generador es un fenómeno que se debe eliminar para mantenerse una buena transmisión de calor. Para su remoción se puede utilizar vapor o aire caliente inyectándolo adecuadamente con equipo especial que se conoce como sopladores de hollín .

Desaerador: su función principal es eliminar el oxígeno disuelto en el agua de alimentación.

Sistemas de tiro: su función es proporcionar aire suficiente para lograr una buena combustión. Los generadores pueden operar con sistemas de tiro natural, de tiro inducido o de tiro forzado. En los equipos pequeños y frecuentemente de carbón alimentados manualmente, es suficiente el tiro natural producido por la chimenea para obligar al aire a entrar al hogar y seguir su trayectoria a través del equipo para salir por la chimenea.

El sistema de tiro forzado inyecta aire primario con el combustible y aire secundario al horno. El sistema de tiro inducido propicia una presión reducida en el horno, al eliminar los gases calientes de combustión por medio de un ventilador induciendo de esta manera el aire primario y secundario.

Economizadores y precalentadores de aire: se instala con el fin de recuperar parte del calor contenido en los gases de escape de la chimenea, minimizando pérdidas de calor.

Sobrecalentadores: cambiadores de calor que tienen por objeto sobrecalentar el vapor en un generador antes de ser utilizado. Si se colocan en la salida del hogar se denominan sobrecalentadores de radiación, o bien si se sitúan en el banco de convección se les llama sobrecalentadores de convección.

Recalentadores: también son intercambiadores de calor que tienen por objeto recalentar el vapor que ya ha sido expandido principalmente en una turbina. La finalidad del recalentamiento es disminuir la erosión de los álabes de la turbina, que se puede ocasionar por la humedad que puede arrastrar el vapor consigo.

## **2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR Y RETORNO DE CONDENSADOS**

### **SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR**

Serie de tubos denominados "cabezales y ramales de vapor", que permite llevar el vapor a los puntos donde el proceso lo requiere, con la calidad y en la cantidad demandada. El objetivo principal en el Diseño de cualquier Sistema de Distribución de Vapor, es el proveer vapor seco a usuarios

### **SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADOS.**

Serie de tubos, tanques y trampas de vapor, que regresan parte del agua que se ha condensado en el proceso. Esta agua, de gran valor por su pureza, se retorna al sistema de generación de vapor con un previo tratamiento. Es muy recomendable la instalación de este sistema, ya que permite recuperar la mayor cantidad posible de condensados, lo que implica un mejor uso de la energía.

### **EQUIPOS Y ACCESORIOS:**

En ambos sistemas tanto de distribución como de retorno de condensados cuentan con los siguientes equipos y accesorios a continuación solo se mencionan algunos:

**Cabezales:** tubería principal de mayor diámetro en la cual se distribuye al fluido hacia tubería de menor diámetro

**Tuberías:** Conducto formado por tubos y accesorios por donde se lleva el vapor

**Trampas de vapor:** Al condensar el vapor después de haber transmitido su calor, es necesario desalojar este para lo cual se utiliza este equipo el cual solo deja salir el condensado sin dejar pasar el vapor. De esta forma la trampa solo actúa abriendo cuando hay condensado y cerrado cuando hay vapor presente.

**Aislantes:** son materiales como el corcho, la fibra de vidrio, el poliestireno expandido y otros análogos que se colocan en la parte exterior de tubería, tanques y equipos estableciendo una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, minimizando de esta forma la pérdida de calor

**Piernas colectoras:** Las Piernas Colectoras proveen espacio suficiente para capturar *Condensado* y *Basura*, y dirigir el condensado hacia la Trampa de Vapor (Fig. 9)

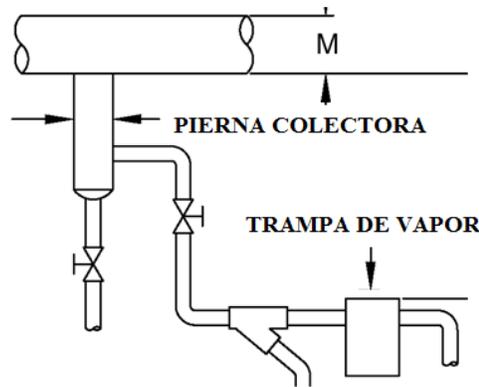


Fig. 9 Pierna colectoras

**Intercambiadores de calor:** reciben diferentes nombres según sus aplicaciones para el caso de este trabajo de tesis se mencionan los siguientes:

### 2.3 TRATAMIENTO DE AGUA

El agua es el fluido de trabajo de los sistemas de vapor y una de las sustancias naturales más abundantes; sin embargo, nunca se encuentra en estado puro, adecuado para la alimentación directa de una caldera. Por lo común en estado natural, el agua se encuentra turbia, con materias sólidas en suspensión fina. Incluso cuando está clara, el agua natural contiene soluciones de sales y ácidos que dañan con rapidez el acero y los metales a base de cobre de los sistemas de vapor

#### **AGUA DE REPUESTO.**

El agua de repuesto la que se añade a la caldera, desde una fuente externa, para reemplazar la que se pierde en la caldera y el sistema de distribución de vapor y retorno de condensado; esto incluye las purgas, fugas de vapor, pérdidas de condensado y el vapor utilizado directamente en los procesos.

La fuente normal del agua de repuesto es el suministro de agua potable municipal. Esta es, generalmente, agua tratada que mantiene prácticamente igual día con día. Algunas otras fuentes de alimentación son pozos de agua, aguas superficiales o ríos, lagos y lagunas, que son tratadas de igual forma que las municipales.

El tratamiento del agua de repuesto varía según las necesidades de cada instalación en particular y se pueden utilizar varios procesos para mejorar su calidad, entre los que se incluyen:

1. Ablandamiento mediante cal y bicarbonato de sodio
2. Intercambio de iones (general)
3. Intercambio de iones de sodio
4. Intercambio de iones hidrogenó
5. Deionización
6. Destilación
7. Ósmosis inversa
8. Electrodialisis

El agua de repuesto se combina con el condensado del vapor que regresa del sistema de retorno de condensado, para formar el agua de alimentación a la caldera. Esta es deareada para eliminar los gases no condensables y tratada con los eliminadores de oxígeno.

### **PURGA**

Purga es una parte muy importante de cualquier programa de tratamiento de agua. Su objetivo es limitar la concentración de impurezas en el agua de la caldera. La cantidad correcta de purga es fundamental los resultados son:

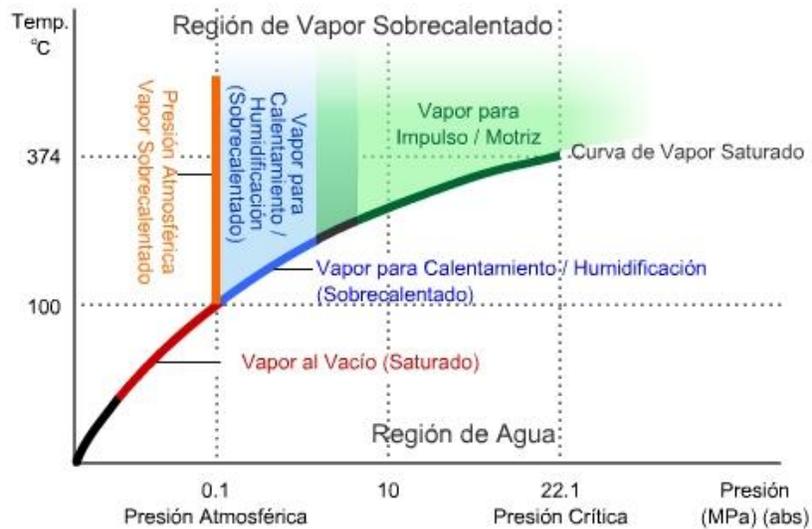
- Demasiada: Pérdida de energía y el exceso de coste de tratamiento químico,
- Insuficiente: Acumulación de impurezas excesivas y condensado en la línea con pérdidas de calor.

No hay reglas rígidas en cuanto a la cantidad de purga debido a la variación en la calidad del agua varía de un lugar a otro. Puede variar desde un 1% (basado en el flujo de agua de alimentación) hasta un 25%.

### **2.4 VAPOR**

El vapor se refiere a la materia en estado gaseoso, aunque para este trabajo de tesis se limita este término para el vapor generado por agua, en la industria los sistemas más populares utilizan vapor debido a que: no es tóxico, estable, barato, alta conductividad térmica (20°C, líquido, 0.7 W/mi), alto calor específico (20°C, líquido: 4.18 kJ/kg K; 70°C: 4.10 kJ/kg K), gran calor de vaporización . Existen diferentes tipos de vapor, pero para el propósito de este trabajo, lo dividiremos en categorías basadas en su estado.

Grafica 6 .Distribución de los Distintos Tipos de vapor



Fuente: TLV CO. LTD

## VAPOR SATURADO

Este es el tipo de 'vapor' más común. El vapor en el estado de saturación está compuesto tanto de agua en la fase líquida como de agua en la fase gaseosa. En otras palabras, la tasa de evaporación es igual a la de condensación. Este tiene muchas propiedades que lo hacen una excelente fuente de calor y por lo tanto es muy utilizado ampliamente como fuente de calor entre los 100 y 200 °C.

El vapor saturado es ampliamente usado como fuente de calor por las siguientes razones:

- Rápido, incluso es posible el calentamiento a través del calor latente.
  - Mejora la calidad del producto y la productividad.
- La presión y la temperatura pueden ser establecidas con precisión.
  - Posibilita controlar la presión en lugar de controlar la temperatura.
- Alto coeficiente de transferencia de calor.
  - El área pequeña requerida para la transferencia de calor permite reducir gastos en el equipo.
- Originado a partir del agua, por lo que ...
  - Seguro y de bajo costo.

## **VAPOR SOBRECALENTADO**

El vapor sobrecalentado es creado por medio del calentamiento adicional del vapor saturado, produciendo vapor que cuenta con mayor temperatura que la de saturación a la misma presión. Este tipo de vapor es principalmente utilizado en aplicación de propulsión/impulso y es muy poco usado en aplicaciones de calentamiento.

Las principales razones por las que el vapor sobrecalentado es poco utilizado como fuente de calor son las siguientes:

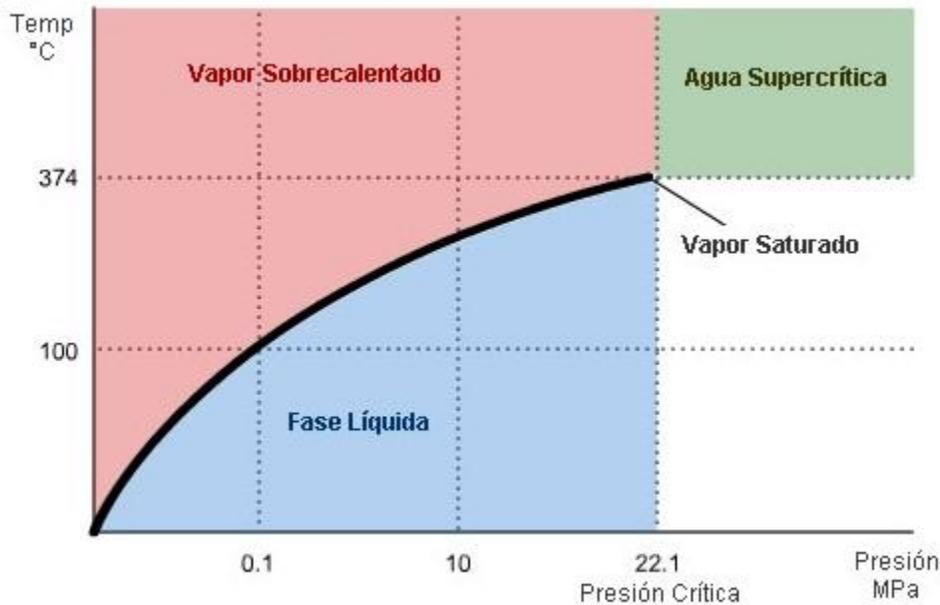
- Existen cambios de temperatura durante el calentamiento porque la porción sobrecalentada es calor sensible
  - Tiene algunos efectos sobre la calidad del producto
- Incluso si la presión es constante, la temperatura no puede ser establecida con precisión
  - No puede utilizarse el control de presión
- Eficiencia pobre en la transferencia de calor debido al bajo coeficiente de transferencia
  - Tiene algunos efectos sobre la productividad y el gasto inicial del equipo

Las principales razones por las que el vapor sobrecalentado es utilizado como medio motriz en las turbinas son las siguientes:

- Para mantener la sequedad del vapor en equipos impulsados con vapor, cuyo rendimiento se ve afectado por la presencia de condensado
- Para mejorar la eficiencia térmica

Este es conveniente para suministrar y descargar el vapor mientras se encuentra en estado sobrecalentado, porque el condensado que provoca erosión no será generado en el interior de los equipos movidos con vapor.

Grafica 7. Distribución de la Presión y la Temperatura de Distintos Tipos de Vapor



Fuente: TLV CO. LTD

Además, como la eficiencia teórica de la turbina es calculada a partir del valor de la entalpía a la entrada y salida de la turbina, incrementando los grados de sobrecalentamiento, así como el incremento en la presión, la entalpía a la entrada de la turbina también aumenta y esto por lo tanto mejora con efectividad la eficiencia térmica.

### **USOS DEL VAPOR EN LA INDUSTRIA**

Las aplicaciones principales de vapor pueden ser a groso modo divididas en aplicaciones de calentamiento / humidificación y en aplicaciones de impulso / motrices.

**Vapor para calentamiento / humidificación:** Este es el tipo de vapor más típicamente utilizado en plantas / fábricas. Ampliamente utilizado para calentamiento y humidificación en equipos, tales como: Intercambiadores de calor y evaporadores. Es normalmente utilizado entre 0.1 - 5 Mpa (abs) y a una temperatura entre 110 - 250 °C.

**Vapor de impulso motriz:** Este tipo de vapor es usado para propulsión (Como una fuerza motriz), en aplicaciones tales como: turbinas de vapor

En las fábricas de papel pueden utilizar el vapor en algunas turbinas aprovechando la energía obtenida para accionar las bombas, generadores, compresoras, máquinas para fabricar el papel y otro equipo auxiliar. Parte del

vapor de agua pasa a la línea donde es aprovechada por secadores. El vapor de baja presión se usa en la elaboración de pulpa, o retornando en forma de condensado al sistema de generación de vapor.

## **CONCLUSIONES**

El desarrollo de este capítulo tiene como principal objetivo el conocimiento general del sistema de generación de vapor para la industria, el cual implica definiciones, clasificaciones. Características de los dos tipos de generadores de vapor que existen y los equipos de recuperación de calor que se pueden utilizar para la mejora de su eficiencia, pretendiendo además la identificación de los principales accesorios de las redes de distribución de vapor para finalmente comprender la importancia de la producción del vapor en la industria debido a la gran utilidad en el calentamiento como en la generación de fuerza motriz.

## **CAPITULO 3. SISTEMA DE COGENERACIÓN**

La cogeneración se presenta como una gran oportunidad de ahorro económico y energético en las industrias ya que implica el uso secuencial de un mismo combustible para producir tanto energía eléctrica como energía térmica.

### **3.1 GENERALIDADES DE LA COGENERACIÓN**

Entre las ventajas que presenta la cogeneración con respecto a la generación eléctrica tradicional destacan:

- Mayor eficiencia energética global.
- Reporta beneficios económicos a nivel micro y macroeconómico.
- Reduce el impacto medioambiental asociado a las actividades energéticas.
- Potencia la seguridad del abastecimiento energético del usuario.
- La Eficiencia Térmica promedio de un Sistema de Cogeneración, fluctúa en los rangos de un 75% a un 80%, situación que comparada con la eficiencia de una planta termoeléctrica convencional de ciclo abierto, cuyos rangos de eficiencia fluctúan entre un 30% a un 33%, implica de hecho un ahorro substancial en el uso de combustible.
- El potencial de cogeneración en México según la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), es de 14,000 MW.

### **CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS DE COGENERACIÓN**

Son usuarios potenciales de sistemas de cogeneración aquellas plantas industriales que reúnen las siguientes características:

- Demandas de calor y electricidad simultáneos y continuas.
- Disponibilidad de combustibles de calidad.
- Calendario laboral de, al menos, 4.500 h - 5.000 h anuales.
- Espacio suficiente y legalización adecuada para la ubicación de los nuevos equipos.
- Efluentes térmicos de calidad.

Son los sectores del papel y del refino de petróleo los más atractivos para la instalación de este tipo de plantas, debido a sus altos requerimientos de energía primaria.

### **NUEVOS AVANCES DE LA COGENERACIÓN**

Entre las nuevas tecnologías de cogeneración podemos señalar como más interesantes:

| Ciclo con motor alternativo |  |  |
|-----------------------------|--|--|
|                             | Ventajas   | Inconvenientes   |
| Motores Stirling            | Pocas partes móviles.<br>No hay cámara de combustión.<br>Alto rendimiento.<br>Emisiones muy bajas.<br>Fácil de controlar.                  | Las máquinas actuales tienen una eficiencia punta baja.<br>Mejor eficiencia a 3.000 W de potencia punta.                                 |
| Microturbinas               | Alta fiabilidad.<br>Instalación simple.<br>Poco mantenimiento.<br>Tamaño compacto.<br>Peso ligero.<br>Ruido aceptable.<br>Emisiones bajas. | Costes.  |
| Células de combustible      | Bajas emisiones.<br>Alto rendimiento.<br>Diseño modular.<br>Operación automatizada.<br>Bajo mantenimiento.                                 | Costes.<br>Durabilidad.<br>Densidad de potencia.<br>Tiempo de puesta en marcha.<br>Degradación.<br>Corrosión para electrolitos líquidos. |

### **CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN**

Los sistemas de cogeneración se clasifican normalmente dependiendo de la máquina motriz responsable de la generación eléctrica

- Ciclo con turbina de gas
- Ciclo con turbina de vapor
- Ciclo combinado
- Ciclo con motor alternativo

### **3.2 SISTEMA DE COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA DE PAPEL**

Debido a que la planta de papel requiere de servicios de electricidad y vapor simultáneamente, además de la dependencia que tiene la planta respecto al vapor como servicio principal en el proceso de elaboración y terminado del papel para obtener las condiciones de calidad del producto con las especificaciones que la empresa requiere. Es fundamental la generación de energía térmica, así mismo ya que el generador de vapor produce vapor sobrecalentado y el proceso de elaboración de papel requiere vapor saturado, la empresa consideró como mejor opción la implementación de la cogeneración en sus instalaciones para abastecer tanto energía térmica como eléctrica.

## **CARACTERÍSTICAS DE LA COGENERACIÓN EN LA PLANTA DE PAPEL**

La empresa de papel produce el 63 % de la energía eléctrica que requiere la planta mediante la técnica de cogeneración con ciclo de turbina de vapor y el 37% restante lo compra mediante la tarifa HM. La capacidad teórica que tiene la planta de producción de energía eléctrica es de 5 MW, cantidad insuficiente para abastecer todos sus requerimientos eléctricos. Sin embargo debido a deficiencias en el sistema que se analizarán en el capítulo siguiente según datos de reportes se obtienen alrededor de 4.078 MW de potencia bruta.

## **EQUIPOS DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN EN LA PLANTA DE PAPEL**

A continuación se describe brevemente el funcionamiento y estructura que tiene el sistema de cogeneración en la planta de papel para poder determinar los posteriores balances de materia y energía.

No obstante debido a que el diagnóstico energético implica conocer el estado real del sistema de cogeneración es necesario conocer la eficiencia que presenta este sistema, así como la cantidad real y teórica de trabajo que se produce por tanto se mencionarán las principales formas de calcularlo.

La producción de energía térmica y eléctrica en la planta papelera se genera a partir de los equipos siguientes:

- Generador de vapor tipo acuotubular con tiro balanceado
- Turbina de vapor de acción con condensador(con extracción)
- Generador eléctrico
- Condensador de vacío
- Eyector
- Deaerador
- Intercambiadores de calor

## **GENERADOR DE VAPOR**

El ciclo comienza con la generación del vapor sobrecalentado con las siguientes condiciones termodinámicas: 4200 KPa y 467 °C, obteniendo la base para la producción de la energía eléctrica.

El generador de vapor cuenta con los siguientes equipos complementarios de recuperación de calor:

- Precalentador Aire
- Calentador Aire/Vapor
- Sobrecalentador
- Sistema de tiro inducido

El sistema de tiro inducido está compuesto por un ventilador que ayuda a que ingrese la cantidad de aire necesario para la combustión así mismo al ayudar a remover los gases calientes del horno de combustión conservando una presión diferencial necesaria para el óptimo funcionamiento del generador de vapor.

Este aire aumenta su temperatura de combustión por medio de un precalentador de aire y posteriormente con un calentador A/V que fue instalado a últimas fechas. Una vez generado el vapor antes de salir del generador pasa a través de un sobrecalentador de 4 pasos para obtener las condiciones necesarias para su utilización en la producción de energía.

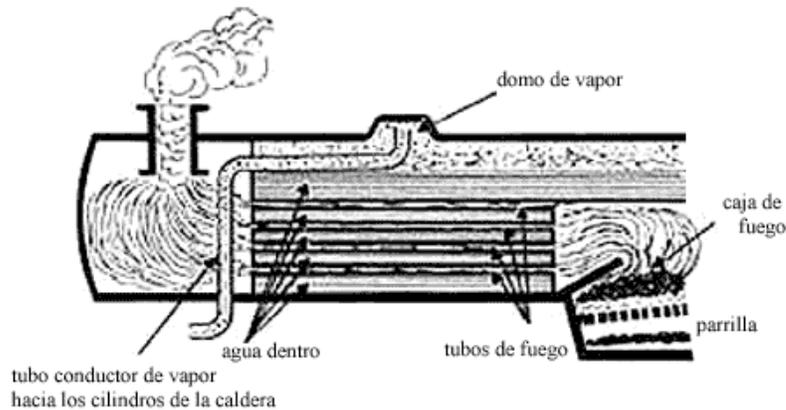


Figura 10. Generador de vapor

Como se explico anteriormente es necesario determinar la eficiencia actual del generador de vapor, de tal forma que se pueda contrastar con la eficiencia de diseño la cual tiene un valor de 83.1 %.

El cálculo de la eficiencia se realizará por el método directo de acuerdo al código ASME (American Society of Mechanical Engineers-Steam Generating), mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{gene} = \frac{m_{vapor} * (h_{vapor} - h_{agua\ alim})}{m_{comb} * PCS}$$

### **TURBINA DE VAPOR**

El vapor producido en el generador de vapor ingresa a la turbina de vapor en el cual, de acuerdo al principio termodinámico se realiza la expansión del mismo disminuyendo su temperatura y reduciendo su energía interna la cual se transforma en energía mecánica por la aceleración de las partículas de vapor, lo que permite disponer directamente de una gran cantidad de energía.

La turbina tiene una línea de extracción de vapor para proceso y consta de dos etapas en un solo eje: La etapa de Alta presión y baja presión.

En la etapa de alta presión se lleva a cabo una extracción de vapor y el resto de vapor ingresa a la etapa de baja presión de la turbina.

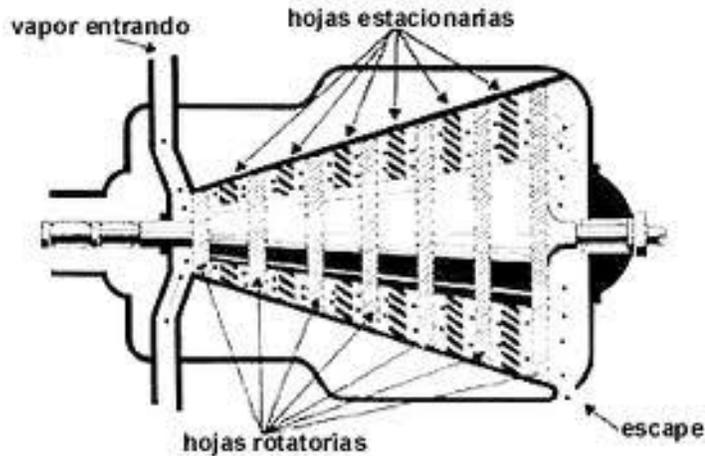


Figura 11 Turbina de vapor

Para conocer la cantidad de trabajo real y energía eléctrica que se produce en la turbina se necesitará conocer los estados termodinámicos reales de la misma y una vez determinados se podrá saber para ambas etapas la cantidad de trabajo real y por ende la eficiencia real de la misma mediante las siguientes relaciones:  
Para la eficiencia:

$$Eta_{ap} = \frac{W_{turb,ap,real}}{W_{turb,ap,ideal}} \qquad \qquad \qquad Eta_{bp} = \frac{W_{turb,ap,real}}{W_{turb,ap,ideal}}$$

Para el cálculo del trabajo ideal en ambas etapas:

$$Wt_{turb,bp,ideal} = m_{vaporentbp} * (h_{vaporentbp} - h_s \text{ alconden} )$$

$$Wt_{turb,ap,ideal} = m_{vaporenturb} * (h_{vaporenturb} - h_s \text{ a la etapa bp} )$$

Para el cálculo del trabajo real en ambas etapas:

$$Wt_{turb,ap,real} = m_{vapor \text{ entr turb}} * (h_{vapor \text{ ent,turb}} - h_{vapor \text{ ent bp}} )$$

$$Wt_{turb,bp,real} = m_{vaporentbp} * (h_{vaporentbp} - h_{vapor \text{ alconden}} )$$

## **GENERADOR ELÉCTRICO**

La generación de electricidad se produce en el generador eléctrico (como el que se muestra en la figura anterior) por la transformación de energía mecánica en eléctrica, esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre el estator.

Las características principales son 3600 RPM ,60 Hz.

## **CONDENSADOR DE VACIO**

El vapor de la turbina de baja presión ingresa al condensador de vacío con la presión de vacío correspondiente al diseño de la turbina de vapor. El vapor condensa por medio del intercambio de calor con agua proveniente de la torre de enfriamiento,(fig.12) sin embargo como es necesario extraer el aire, gases o vapores del condensador para que opere a vacío el condensador tiene conectado un eyector de dos pasos para mejorar el vacío.

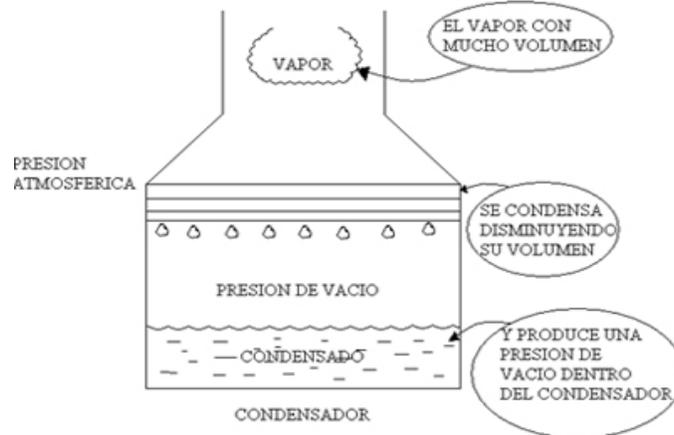


Figura 12. Condensador de vacío de la planta de vapor

Finalmente el vapor condensado de la turbina de baja presión se envía al tanque de retorno de condensados donde se mezcla con las corrientes provenientes de los condensados de servicios de calentamiento y del proceso.

## **INTERCAMBIADOR DE CALOR**

Debido a que la eficiencia del generador de vapor mejora con el precalentamiento del combustible, es necesario acondicionar el combustible, al igual que el agua de alimentación al generador de vapor (agua de repuesto y retorno de condensados) .Para lo cual se utilizan intercambiadores de calor de tubos y coraza como el que se muestran en la siguiente fig. 13:

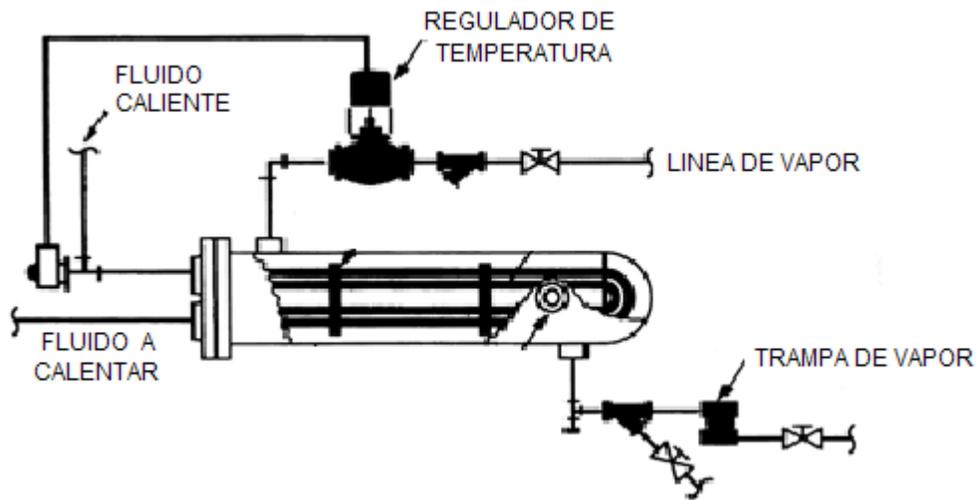


Figura 13. Sistema del Intercambiador de calor

En el caso de los intercambiadores de calor para realizar el balance de masa y energía es necesario conocer el flujo másico de los fluidos de trabajo y la cantidad de calor intercambiado de las corrientes, no obstante debido a la falta de instrumentos de medición y de información de las hojas de diseño de los mismos, se considerara una eficiencia efectiva en los intercambiadores de calor del 75% (eficiencia de diseño) para su cálculo.

### DEAREADOR

Finalmente el agua de alimentación al generador de vapor antes de ingresar al mismo pasara por el deareador el cual es un equipo necesario para eliminar los gases incondensables.

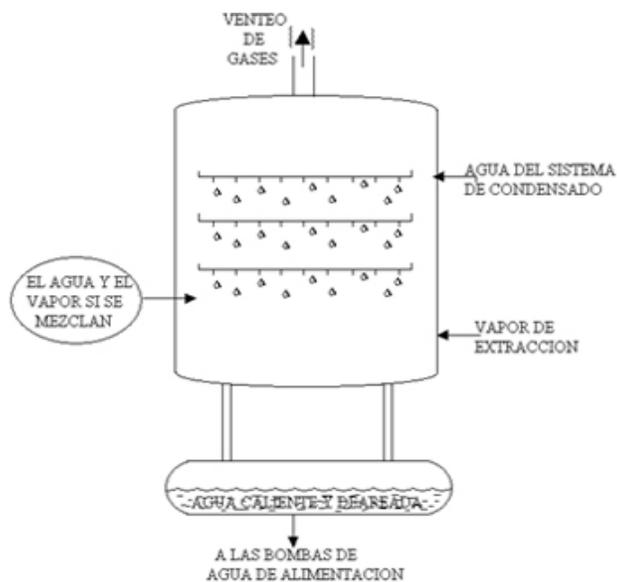


Figura 14. Deareador de la planta de papel

Eficiencia global del sistema de cogeneración

Para determinar la eficiencia del sistema de cogeneración son necesarias las siguientes relaciones:

Es necesario conocer el trabajo neto del sistema mediante:

$$W_{neto} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} - W_{bomb1} - W_{bomb2} - W_{bomb3} - W_{bomb4}$$

Finalmente la eficiencia de ciclo se calculará en la relación de la energía deseada con respecto a la energía suministrada como sigue:

$$\eta_{SISTEMA} = \frac{H_{vapor} + E_{electrica}}{m_{comb} * PCS}$$

Como se verá en el diagnóstico energético es deseable conocer por separado la eficiencia eléctrica de la eficiencia de vapor para conocer el impacto de ambos de la manera siguiente:

$$W_{netoturb} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real}$$

$$\eta_{electrico} = \frac{W_{neto}}{m_{combdot} * PCS}$$

Para la eficiencia de vapor con referencia al sistema de cogeneración de la planta se obtiene como sigue:

$$\eta_{vapor} = \frac{m_{8dot} * (h_8 - h_{12}) + m_{13dot} * h_{13}}{m_{combdot} * PCS}$$

## **CONCLUSIONES**

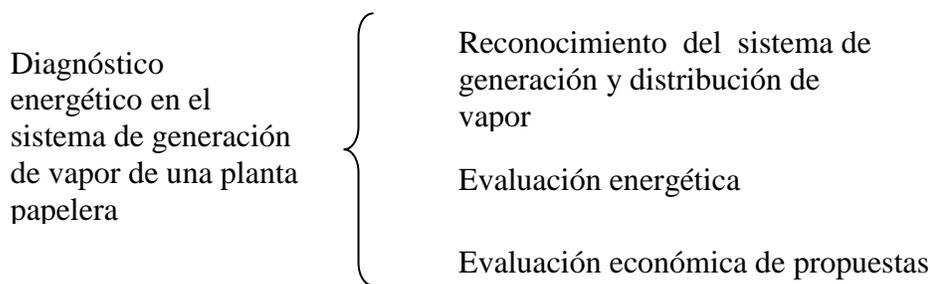
En base a la información revisada el principal objetivo de este capítulo fue conocer en términos generales la técnica de cogeneración a nivel industrial para posteriormente comprender la importancia y estructura de la misma en la planta de papel. Este objetivo se consiguió por medio del conocimiento de las características e identificación de los equipos para el sistema de cogeneración, así mismo se indicaron los parámetros de importancia (eficiencias, trabajo, energía) que serán calculados en el diagnóstico energético.

## CAPITULO 4. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

La definición de los potenciales de ahorro y las acciones que se requieren para alcanzarlos se denomina diagnóstico energético. En este se analizan y determinan balances de masa y energía, se cuantifican todas posibles pérdidas y la eficiencia de los equipos principales.

La definición de las medidas viables deben garantizar su rentabilidad económica al aplicarse y la recuperación de cualquier inversión o gasto en el periodo más corto posible. Los resultados deben orientarse también al seguimiento que hay que hacer para concentrar esfuerzos en las unidades, plantas o departamentos de índices altos de consumo, así como zonas problemáticas o de desperdicio potencial. No solo son importantes las cifras de ahorro sino también la organización para lograrlas.

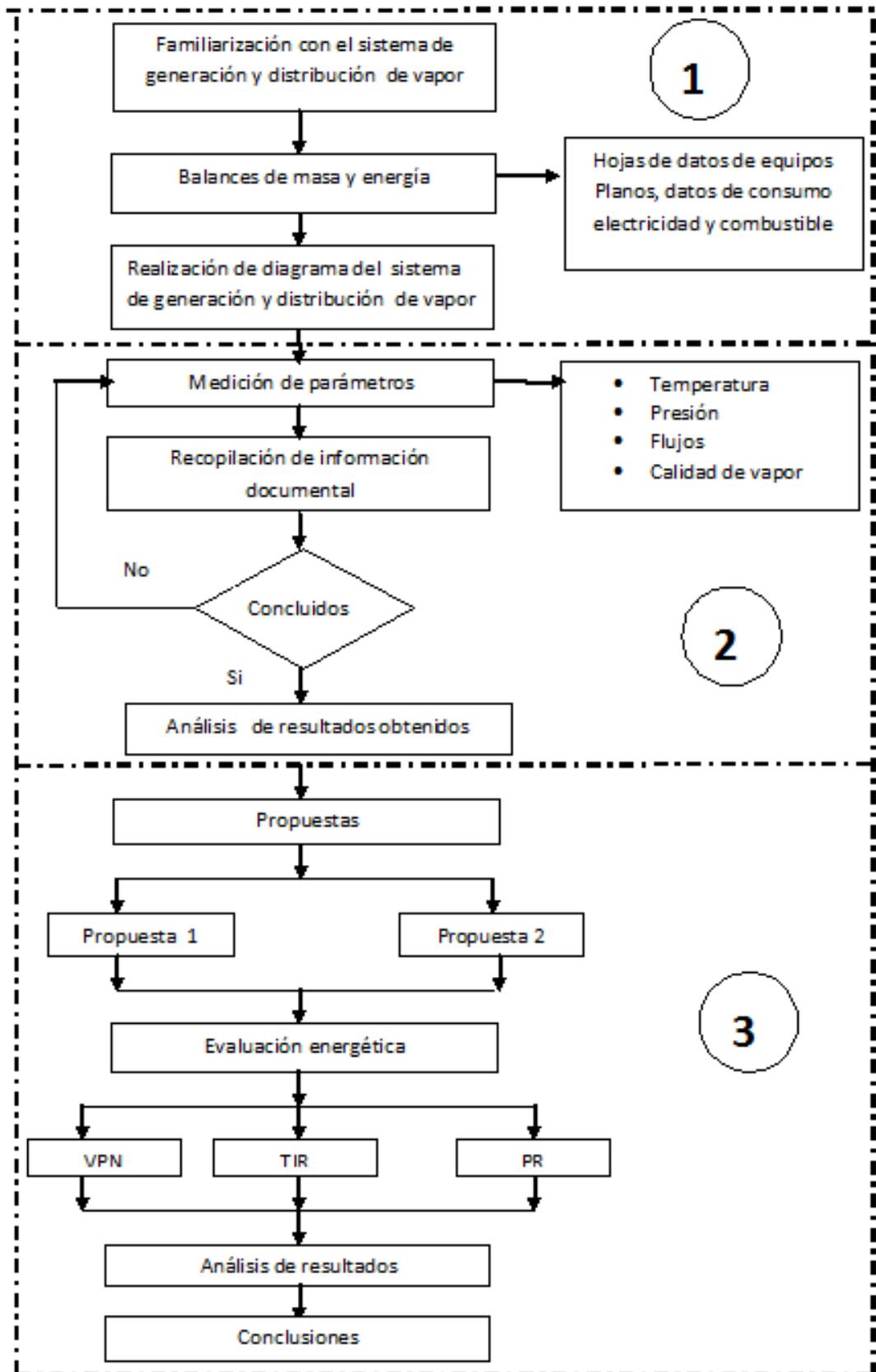
El diagnóstico energético en el sistema de generación de vapor en la planta de papel que se realizó en este trabajo de tesis, se divide en tres bloques principales que establecen la emisión de los resultados y las acciones encaminadas para obtener ahorro y uso eficiente de energía en los equipos.



El siguiente diagrama muestra la forma en que se realiza el diagnóstico del sistema de generación y distribución de vapor:

Para realizar el diagnóstico lo dividiremos en tres etapas generales

1. Reconocimiento del sistema de generación y distribución de vapor
2. Evaluación energética
3. Evaluación económica propuestas



Los propósitos del diagnóstico energético en sistemas de generación y distribución de vapor se reducen a:

- Evaluar las condiciones actuales de operación del sistema.
- Establecer los potenciales de ahorro de energía para el sistema de generación y distribución de vapor en función de la comparación de sus características de diseño con las de operación.
- Recomendar modificaciones operacionales, técnicas y económicamente viables que permitan mejorar la eficiencia en el sistema de generación de vapor.

Para alcanzar tales objetivos, se desarrollaron actividades mostradas en el diagrama.

#### **4.1 RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR**

El proceso del diagnóstico energético se inició con una inspección y reconocimiento de la planta, que permitió lograr un entendimiento del sistema de generación y distribución de vapor, así como también de las condiciones de operación y equipos que en este intervienen.

La sección del reconocimiento del sistema de generación y distribución del vapor para nuestro diagnóstico comprendió las siguientes etapas:

- ✓ Familiarización con el sistema de generación y distribución de vapor
- ✓ Recopilación de información documental
- ✓ Realización de diagrama del sistema de generación y distribución de vapor

#### **FAMILIARIZACIÓN CON EL SISTEMA DE GENERACION Y DISTRIBUCIÓN DEL VAPOR**

Es una planta que cuenta con más de 40 años de experiencia en la producción de papel Kraft tipo liner y médium (papel para empaque), su principal materia prima es el papel reciclado y como servicio auxiliar principal encontramos al vapor sobrecalentado debido a que este es necesario para el sistema de cogeneración. Comenzamos un recorrido dentro de la planta para reconocer los equipos, tuberías, accesorios principales, así como los aparatos de medición con los que cada uno cuenta, este recorrido comenzó desde el sistema de tratamiento de agua, tanto externo como interno hasta llegar al generador de vapor y posteriormente al cabezal de distribución del vapor de donde se envía a la turbina de la cual se distribuye vapor al proceso y servicios generales.

Dentro de los servicios en los que se utiliza el vapor de extracción de la turbina alcanzamos a distinguir dos requerimientos de vapor: para los servicios en el generador de vapor y para calentamiento (intercambiadores de vapor). Las aplicaciones que tiene el vapor de extracción dentro del proceso son en los secadores de papel e hidropulper.

### **RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DOCUMENTAL**

Esta etapa consistió en recabar los datos de interés para el proceso de diagnóstico tales como: Hojas de datos de equipos, Planos, historiales de consumo de electricidad y combustible así como datos generales y de producción.

#### ✓ DATOS GENERALES

En la empresa se trabaja los 365 días del año las 24 horas del día con 3 turnos, debido a la antigüedad de los equipos estos presentan constantes composturas interrumpiendo la producción de papel. Los usos principales del vapor en la planta son para:

- EQUIPOS DE PROCESO: secadores e hidropulper.
- EQUIPOS DEL AREA DE SERVICIO: turbina, eyectores, intercambiadores de calor
- SERVICIOS GENERADOR DE VAPOR: calentador A/V, deshollinador y atomización.

El área de servicios auxiliares cuenta con una bitácora de control y revisión en cada turno.

#### ✓ DATOS DE PRODUCCIÓN

El vapor es utilizado en dos equipos en los secadores donde se recupera todo el flujo de vapor y el hidropulper en el cual el vapor no se recupera ya que se utiliza para formar la pasta del papel.

#### ✓ DATOS DE EQUIPOS

Solicitamos a la empresa los datos de los principales equipos que intervienen en el sistema de generación y distribución de vapor:

- Generador de vapor
- Dearedor.
- Turbina
- Intercambiadores de calor
- Secadores
- Hidropulper
- Bombas

Sin embargo, por la antigüedad de la fábrica solo se contaban con los datos de los equipos principales que se muestran en el Anexo A

#### ✓ ENERGÍA ELÉCTRICA

Con respecto a la energía eléctrica la fábrica de papel produce la mayor parte de energía mediante cogeneración, sin embargo debido a que no satisface su requerimiento de 6500 Kw es necesario contratar el suministro faltante por medio de la CFE según las características

TARIFA: HM

Precio de la demanda facturable \$157.13/KW

Precio de la energía de punta \$1.8409/KWH

Precio de la energía intermedia \$1.1251/KWH

Precio de la energía base \$0.9404/KWH

Los datos anteriores son con respecto al mes de febrero del 2010, según datos de la CFE

#### ✓ COMBUSTIBLES

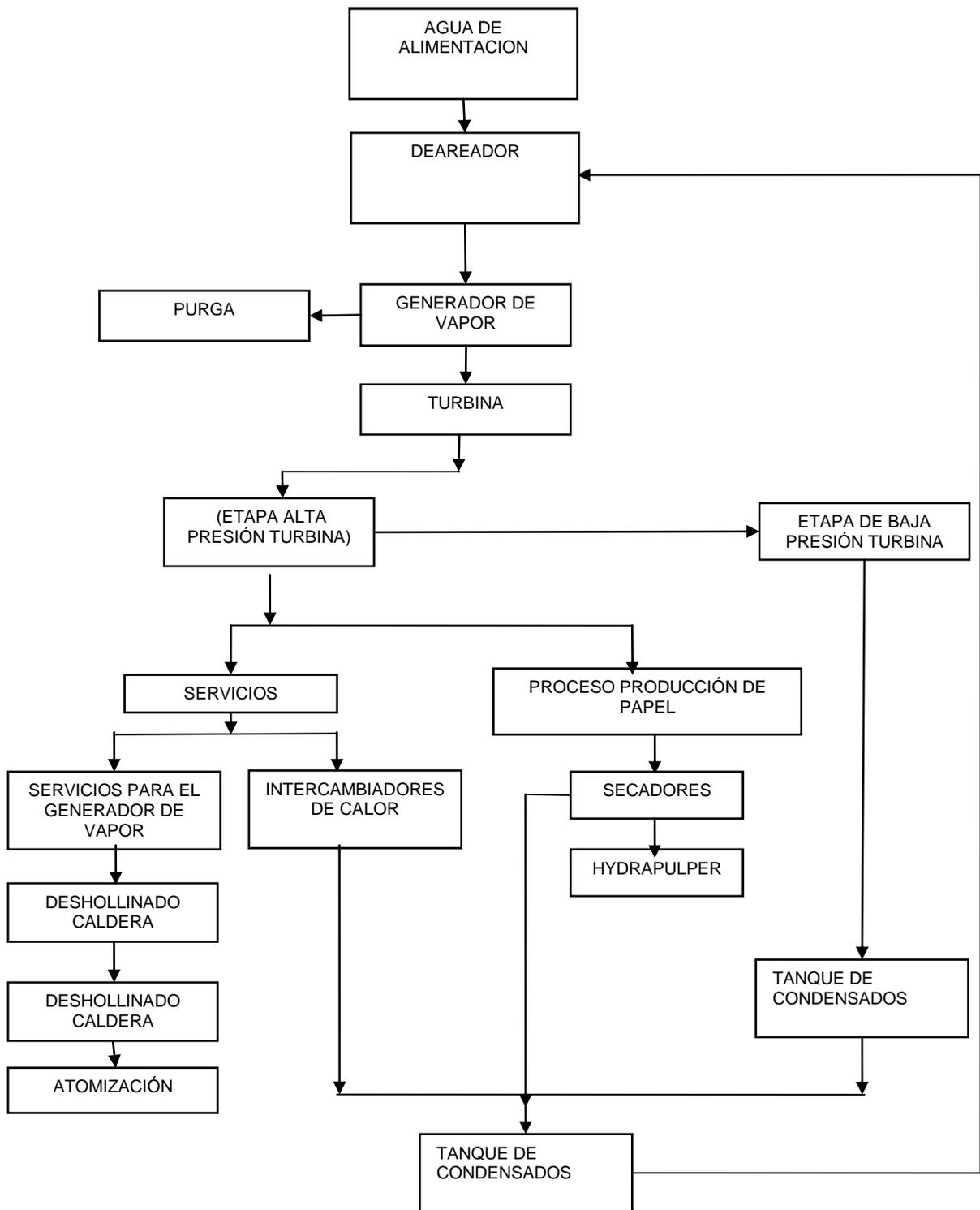
La empresa consume combustóleo solo para el generador de vapor. El cual tiene un precio promedio de 5.4 \$/LT (según facturas) con un PCS de 48000 kJ/kg

#### ✓ PLANOS

La planta no cuenta con planos de diseño, isométricos, DTI ni tampoco con diagramas del sistema de generación y distribución de vapor

### *REALIZACIÓN DEL DIAGRAMA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL VAPOR*

El diagrama de bloques siguiente muestra de manera general el sistema de generación de vapor de la planta de papel desde su generación hasta su consumo. (En el Anexo B de este trabajo se encontrará el diagrama de flujo para la planta de papel).



La explicación para el diagrama anterior se puede describir como sigue:

El proceso comienza con el tratamiento de agua para obtener las características fisicoquímicas apropiadas. Posteriormente esta ingresa al deareador en donde se eliminan el  $O_2$  y los gases no condensables adquiriendo la temperatura de  $135\text{ }^\circ\text{C}$  una vez alcanzada esta temperatura el agua ingresa al generador de vapor en donde por medio de la combustión del combustible previamente calentado (intercambiador 3, produciéndose vapor sobrecalentado ( $4200\text{ KPa}$  y  $467\text{ }^\circ\text{C}$ )). El vapor automáticamente fluye hasta el cabezal principal en donde será suministrado a la turbina para ser transformado en energía eléctrica. La turbina cuenta con dos etapas: de alta y baja presión. La extracción de vapor que se obtiene de la primera etapa (alta presión) será dividida entre los servicios y la producción de papel.

En el proceso de producción de papel es utilizado para dos equipos en específico:

- ❖ Secadores
- ❖ Hidropulper

El vapor de extracción que se utiliza en el área de secado, ingresa a una serie de 42 secadores de papel en donde cede parte de su calor latente, posteriormente una parte de este ingresa al hidropulper en donde cumple la función de deshacer completamente el papel reciclado y formar una pasta. El vapor restante se dirige al tanque de condensados en donde retornará en forma de agua de repuesto al deareador y de esta forma se incorpora de nuevo al ciclo.

El vapor que se envía a la etapa de la turbina de alta presión y posteriormente se dirige a la segunda etapa (baja presión) en donde nuevamente se transforma en energía eléctrica. A continuación el vapor pasa por un condensador de vacío en donde pierde gran parte de calor y se dirige al tanque de condensados para formar parte del agua de repuesto.

El flujo de vapor que se destina a los servicios es de  $1.633\text{ Kg/s}$  del cual se divide este flujo para servicios del generador de vapor tales como: deshollinado, atomización y calentamiento a/v del que no se recupera nada. El resto del vapor designado para los servicios es utilizado en tres intercambiadores de calor (ver Anexo B), dos de ellos destinados para calentamiento de agua (intercambiador 1 y 2) y uno para el acondicionamiento del combustible (intercambiador 3) una vez cedido su calor se recuperan totalmente y forman parte del agua de repuesto que se reincorpora al sistema.

## **4.2 EVALUACIÓN ENERGÉTICA**

En esta parte comenzaremos con la medición de parámetros que nos ayudarán a realizar los balances de masa y energía para posteriormente continuar con un análisis que nos indique como se está utilizando la energía en el sistema de generación y distribución de vapor para realizar una par de propuestas que nos permitan incrementar la eficiencia del sistema en la planta de papel.

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Se recabo información de la bitácora operacional así como de la lectura de los instrumentos colocados en líneas y equipos basados en el diagrama del sistema de generación y distribución de vapor (ver Anexo B). Es imprescindible mencionar que los siguientes datos fueron los únicos que se pudieron recopilar debido a la insuficiente instrumentación en equipos de relevancia para el cálculo de variables.

- ✓ Combustible
  - Tipo. Combustóleo
  - Poder calorífico superior. 4800 KJ/Kg
  - Temperatura de alimentación al quemador (°C) : 30.9 °C
  - Densidad :0.877 Kg/l
  - Flujo de alimentación:0.9225 Kg/s
- ✓ Generador de vapor:
  - Tipo: de tubos de agua
  - Presión: 4200 KPa
  - Flujo de vapor producido: 35.79 ton/h
- ✓ Agua de alimentación al generador de vapor
  - Temperatura: 135 °C
  - Presión( Kg/ cm<sup>2</sup>): 3900 KPa
  - Flujo: 37.112 ton/h
- ✓ Agua de repuesto
  - Temperatura de alimentación al intercambiador ( corriente 20): 25 °C
  - Temperatura de alimentación a deareador ( corriente 21): 70°C
  - Flujo(ton/h):3.32 ton /h
- ✓ Purga
  - Tipo: Continua
- ✓ Turbina
  - Tipo : dos etapas
  - Flujo de extracción etapa de alta presión (corriente 7): 3. 16 ton / h
  - Presión : 4136 KPa
- ✓ Condensador a vacio
  - Presión : 52 KPa
  - Temperatura 82 °C
- ✓ Secadores
  - Flujo (corriente 8): 26.125 ton /h
  - Presión 427 KPa
- ✓ hidropulper
  - Flujo ( corriente 13): 2.112 ton/h
- ✓ Servicio de caldera
  - Flujo (corriente 10): 2.12 ton /h
  - Presión : 427 KPa
- ✓ Deareador
  - Presión: 320 KPa
  - Temperatura 135.7 °C
- ✓ Tanque de condensados
  - Presión : 190 KPa
  - Temperatura de condensados : 90 °C

- **BALANCES DE MASA Y ENERGIA**

En base a los datos recolectados se realizaron los balances de materia y energía para fines prácticos de este trabajo de tesis a continuación se presentan los datos del balance de masa por equipo, el balance completo se encuentra en el Anexo C.

| EQUIPOS                 | CORRIENTES             | BALANCE    |
|-------------------------|------------------------|------------|
| Generador de vapor      | 23, 24, 1              | 1=23-24    |
| Válvula 1               | 1, 2                   | 1=2        |
| Turbina de alta presión | 2, 3, 7                | 2=7+8      |
| Turbina de baja presión | 3, 4                   | 3=4        |
| condensador             | 4, 5                   | 4=5        |
| Bomba 1                 | 5, 6                   | 5=6        |
| Válvula 2               | 25, 9, 7, 8,<br>10, 11 | 7=9+8      |
|                         |                        | 25=10+11   |
|                         |                        | 9=25       |
| Proceso                 | 8, 12                  | 8=12       |
| tanque de condensados   | 12, 13, 14             | 12= 13+ 14 |
| Hidropulper             | 13                     |            |
| Bomba 2                 | 14, 15                 | 14=15      |
| tanque de condensados   | 15, 16,6, 17           | 17=15+6+16 |
| Bomba 3                 | 17, 18                 | 17=18      |
| Intercambiador 1        | 18, 19                 | 18=19      |
| Intercambiador 2        | 20, 21                 | 20=21      |
| Deareador               | 21, 19, 22             | 22=19+21   |
| Bomba 4                 | 22, 23                 | 22=23      |

Para el caso del balance de energía comenzaremos con la eficiencia para el generador de vapor:

Este se realizo en base al método directo como sigue:

$$\eta_{cal} = \frac{m_{1dot} * (h_1 - h_{23})}{m_{combdot} * PCS}$$

Donde:

$\eta_{cal}$  : Eficiencia del generador de vapor

$m_{1dot}$  : Flujo de vapor generado

$m_{comb\dot{}}$ : Flujo del combustible

$h_1$  : Entalpia del vapor generado

$h_{23}$  : Entalpia del agua de alimentación al generador de vapor

$PCS$  : Poder calorífico superior del combustible

Obteniendo una eficiencia ( $\eta_{cal}$ ) de:

$$\eta_{cal} = 0.7244$$

En base a la hoja de datos de la turbina esta presenta una eficiencia del 65 % la cual nos arroja los siguientes datos

Para la turbina de alta presión el trabajo

$$W_{turb,ap,real} = m_{2\dot{}} * (h_2 - h_3) = 3772 \text{ KW}$$

$$W_{turb,ap,ideal} = m_{2\dot{}} * (h_2 - h_{s,3}) = 5804 \text{ KW}$$

Donde:

$W_{turb,ap,real}$  : Trabajo real etapa de alta presión de la turbina

$W_{turb,ap,ideal}$  Trabajo ideal etapa de alta presión de la turbina

$m_{2\dot{}}$  : Masa de vapor que se alimentación a etapa de alta presión de la turbina

$h_2$ : Entalpia de vapor de alimentación a etapa de alta presión de la turbina

$h_3$ : Entalpia real de vapor de extracción etapa de alta presión de la turbina

$h_{s,3}$  Entalpia real de vapor de extracción etapa de alta presión de la turbina

Y el trabajo para la etapa de baja presión es:

$$W_{turb,bp,real} = m_{3\dot{}} * (h_3 - h_4) = 305.8 \text{ KW}$$

$$W_{turb,bp,ideal} = m_{3\dot{}} * (h_3 - h_{s,4}) = 485.4 \text{ KW}$$

Obteniendo un trabajo real neto de la turbina:

$$W_{netoturb} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} = 4078 \text{ KW}$$

Para el caso de las cuatro bombas el trabajo ideal es

$$W_{bomb1} = v_5 * (P_6 - P_5) * m_{5\dot{}} = 0.1696 \text{ KW}$$

Donde:

$W_{bomb1}$ : Trabajo realizado por la bomba 1

$v_5$ : Volumen específico del fluido de alimentación

$P_5$ : Presión de succión de la bomba

$P_6$ : Presión de descarga de la bomba

$m_{5dot}$ : Flujo de alimentación a la bomba

Lo mismo se aplica a las tres bombas restantes obteniendo los siguientes resultados:

El trabajo para:

Bomba 1: 0.1696 Kw

Bomba 2: 0.5576 kw

Bomba 3: 1.401 kw

Bomba 4: 42.89 kw

Calculando una eficiencia de ciclo de la siguiente manera:

$$W_{neto} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} - W_{bomb1} - W_{bomb2} - W_{bomb3} - W_{bomb4} = 4033KW$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto} + m_{8dot} * (h_8 - h_{12})}{m_{combdot} * PCS}$$

$$\eta_{ciclo} = 0.5822$$

Para la eficiencia del vapor se cálculo de la siguiente manera

$$\eta_{vapor} = \frac{m_{8dot} * (h_8 - h_{12}) + m_{13dot} * h_{13}}{m_{combdot} * PCS}$$

$$\eta_{vapor} = 0.4848$$

La eficiencia eléctrica del sistema se cálculo de la siguiente manera:

$$\eta_{electrico} = \frac{W_{neto}}{m_{combdot} * PCS}$$

$$\eta_{electrico} = 0.1038$$

Los resultados del balance de masas y energía se pueden apreciar mejor en el siguiente diagrama de Sankey



#### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base a los resultados obtenidos en el balance de materia y energía del sistema de generación y distribución de vapor de la planta de papel, se encontró lo siguiente:

Como se puede observar uno de los datos de mayor interés fue el cálculo de la eficiencia real del generador de vapor cuyo valor obtenido es de 72.2 % con respecto a la eficiencia de diseño 83.1 %, este resultado se puede entender debido a que como se ha mencionado anteriormente el generador de vapor tiene una antigüedad de más de 40 años ,tiempo en el cual ha sufrido un notable deterioro y debido a lo cual se le han implementado equipos de recuperación de calor para aumentar su eficiencia ,sin embargo este equipo presenta problemas de mantenimiento correctivo en puntos de importancia como es el sobrecalentador el cual ha perdido ya 2 tubos por desgaste.

Con respecto a los resultados de la turbina de vapor la cantidad de trabajo neto ideal es de 6289.5 KW considerando una eficiencia de diseño del 65 %, Con respecto al trabajo neto real 4078 KW esta diferencia se puede entender en la antigüedad de este equipo, a pérdidas de vapor debido a una fuga en la entrada a la turbina, a un vacío ineficiente en el condensador y a las pérdidas por eficiencia en el generador eléctrico. Sin embargo como se reportó anteriormente la cantidad total de energía eléctrica que requiere la planta es de 6500 KW cantidad que no se alcanza si quiera en condiciones ideales por lo cual es necesario comprar el resto de energía eléctrica.

Con respecto al trabajo neto del sistema de cogeneración es de 4033 KW tomando en cuenta una eficiencia para las bombas del 75% según al último análisis realizado por la empresa.

Así mismo se obtuvo la eficiencia del ciclo de cogeneración 51.06 % en comparación de los valores promedio que presentan este tipo de sistemas de 70-80%, lo cual indica pérdidas significativas de energía.

Para saber la proporción que tiene el ciclo eléctrico y el ciclo térmico en la eficiencia del sistema se obtuvo el porcentaje de cada uno obteniéndose de 9.10% y 42.52% respectivamente. De donde se puede observar que con el sistema actual el aprovechamiento de la energía se lleva a cabo principalmente en el ciclo de vapor lo que podría indicar que no es redituable generar electricidad con esa eficiencia puesto que en comparación con una central eléctrica convencional que maneja un 33 %de eficiencia, ya que del total de energía eléctrica que necesitan solo producen en promedio el 62%.

Con respecto a lo anterior se puede retomar lo siguiente:

- El generador de vapor presenta una eficiencia baja, aun con la implementación de equipos de recuperación de calor de los gases de combustión lo cual nos indica que ya no es posible aumentar su rendimiento si se contempla el mismo generador de vapor. Lo cual representa un punto importante de ahorro energético mediante las propuestas que se presentaran en el siguiente capítulo.
- La turbina de vapor desde la compra de la misma no tenía la capacidad de cubrir los requerimientos actuales de energía eléctrica aun en condiciones ideales, así mismo aunque se le ha dado un mantenimiento para eliminar la fuga de vapor no se ha logrado disminuir del todo lo cual por supuesto repercute en la generación de electricidad, motivo por el cual el sistema de cogeneración no tiene una alta eficiencia.
- Por otra parte la falta de instrumentos de medición en equipos de importancia energética (intercambiadores de calor), evita se conozca realmente cual es el porcentaje de calor real transferido en los mismos, situación que repercute el consumo de combustible.
- Al realizar el balance de materia y energía se encontró que los pocos equipos de medición (manómetros principalmente) que presentan algunos equipos no están bien calibrados ya que la lectura en los mismos difiere en algunos valores del balance, situación que se puede entender debido a que como se mencionó la planta trabaja todos los días, las 24 horas lo cual no permiten detener la producción de vapor solo para correcciones importantes

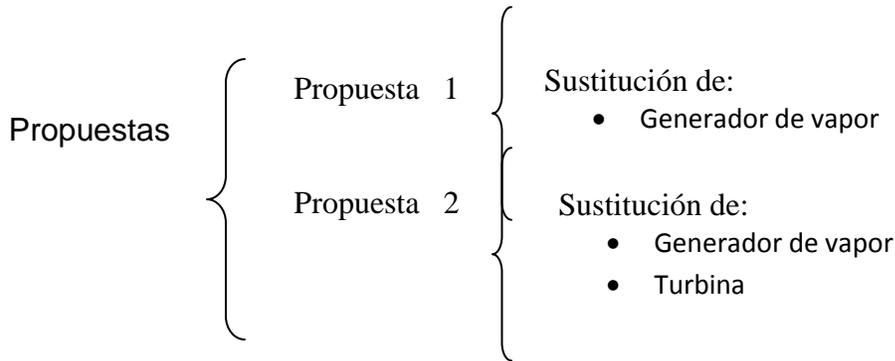
en los equipos, pero que a largo plazo representa un mayor dispendio de capital.

## **CONCLUSIONES**

En este capítulo se realizó una breve familiarización con el sistema de generación y distribución de vapor que comienza una descripción del sistema hasta la generación del diagrama, posteriormente una evaluación energética que nos permite conocer la situación energética de la fábrica procesadora de papel encontrándose datos como la baja eficiencia en el generador de vapor el cual cuenta con una eficiencia de 72.2 % y obteniéndose una eficiencia de ciclo de cogeneración de tan solo el 51.06%

## CAPITULO 5. PROPUESTA PARA AHORRO DE ENERGÍA EN LA PLANTA DE PAPEL

En base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior se consideran las siguientes propuestas para el sistema de generación de vapor debido principalmente a las bajas eficiencias que estos presentan:



### 5.1 PROPUESTA 1. SUSTITUCION DEL GENERADOR DE VAPOR.

En base a los resultados obtenidos la propuesta consiste en la sustitución del generador de vapor ya que este cuenta con más de 40 años de servicio, situación que se ve reflejada en su baja eficiencia y en las constantes composturas que el equipo requiere.

Para tal situación se realizó un nuevo balance de masa y energía con las condiciones del nuevo generador de vapor el cual cuenta con una eficiencia de 85 % por lo tanto obtendremos el nuevo consumo de combustible de la siguiente ecuación.

$$\eta_{cal} = \frac{m_1(h_1 - h_{23})}{m_{comb} * PCS}$$

Las condiciones del flujo de vapor de salida ( $h_{23}=537.3$  KJ/S,  $m_1=9.942$  Kg/s) y el agua de alimentación ( $h_1=3367$  KJ/s) así como el poder calorífico superior ( $PCS = 42100$  KJ/Kg) no cambiarán por lo tanto obtenemos un consumo de combustible de 0.786 Kg/s.

Para el caso de la turbina, el proceso y todas las líneas de distribución de vapor el balance de masa y energía no se ve afectado por el incremento de la eficiencia pero obtenemos los siguientes resultados:

Calculando una eficiencia de ciclo de la siguiente manera:

$$W_{neto} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} - W_{bomb1} - W_{bomb2} - W_{bomb3} - W_{bomb4} = 4033KW$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto} + m_{8dot} * (h_8 - h_{12})}{m_{combdot} * PCS}$$

En donde m8=7.26 kg/s, h8= 2988 KJ/s, h12=427.5 KJ/s

$$\eta_{ciclo} = 0.683$$

Para la eficiencia del vapor se cálculo de la siguiente manera

$$\eta_{vapor} = \frac{m_{8dot} * (h_8 - h_{12}) + m_{13dot} * h_{13}}{m_{combdot} * PCS}$$

Para este cálculo m13=0.59 Kg/s y h13=427.5 kJ/kg de donde obtenemos

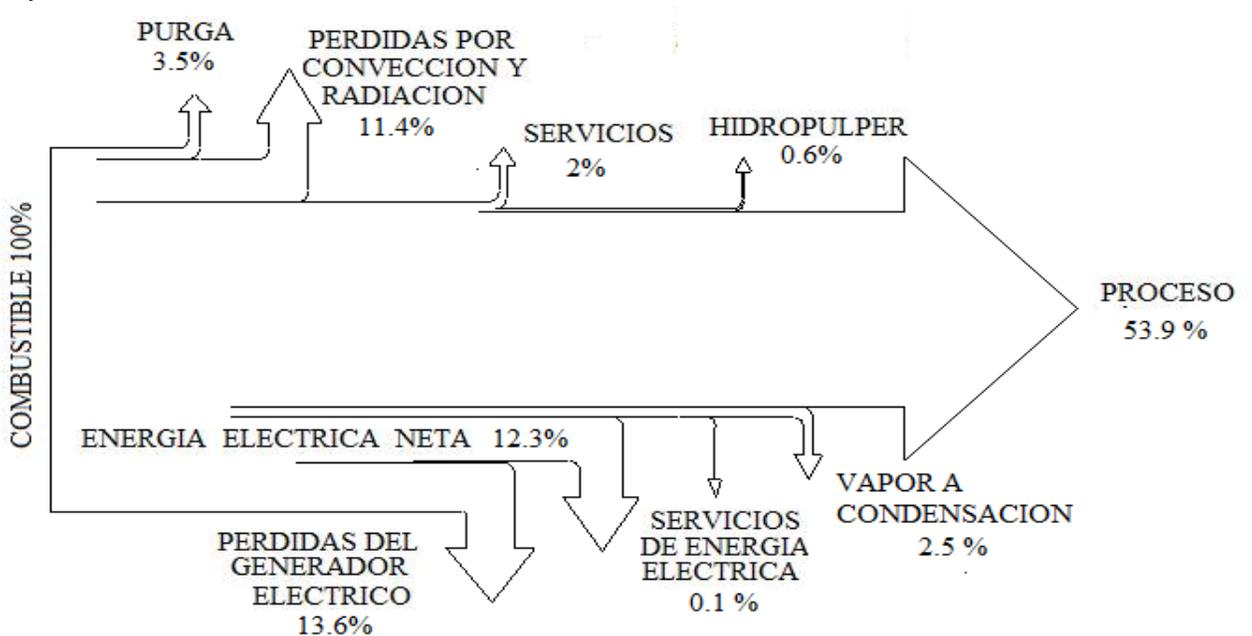
$$\eta_{vapor} = 0.567$$

La eficiencia eléctrica del sistema se cálculo de la siguiente manera:

$$\eta_{electrico} = \frac{W_{neto}}{m_{combdot} * PCS}$$

$$\eta_{electrico} = 0.120$$

Los resultados anteriores se pueden observar mejor en el siguiente diagrama de Sankey



## 5.2. PROPUESTA 2 .SUSTITUCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR Y DE LA TURBINA DE VAPOR

Para esta propuesta se considera el mismo generador de vapor de la propuesta 1 (eficiencia: 85%) y una turbina de última generación con una eficiencia de diseño del 87% para poder cubrir 6500 KW necesarios para cubrir los requerimientos totales de la planta, la turbina que cubre este requisito tiene un costo de 1.3 millones USD/MW.

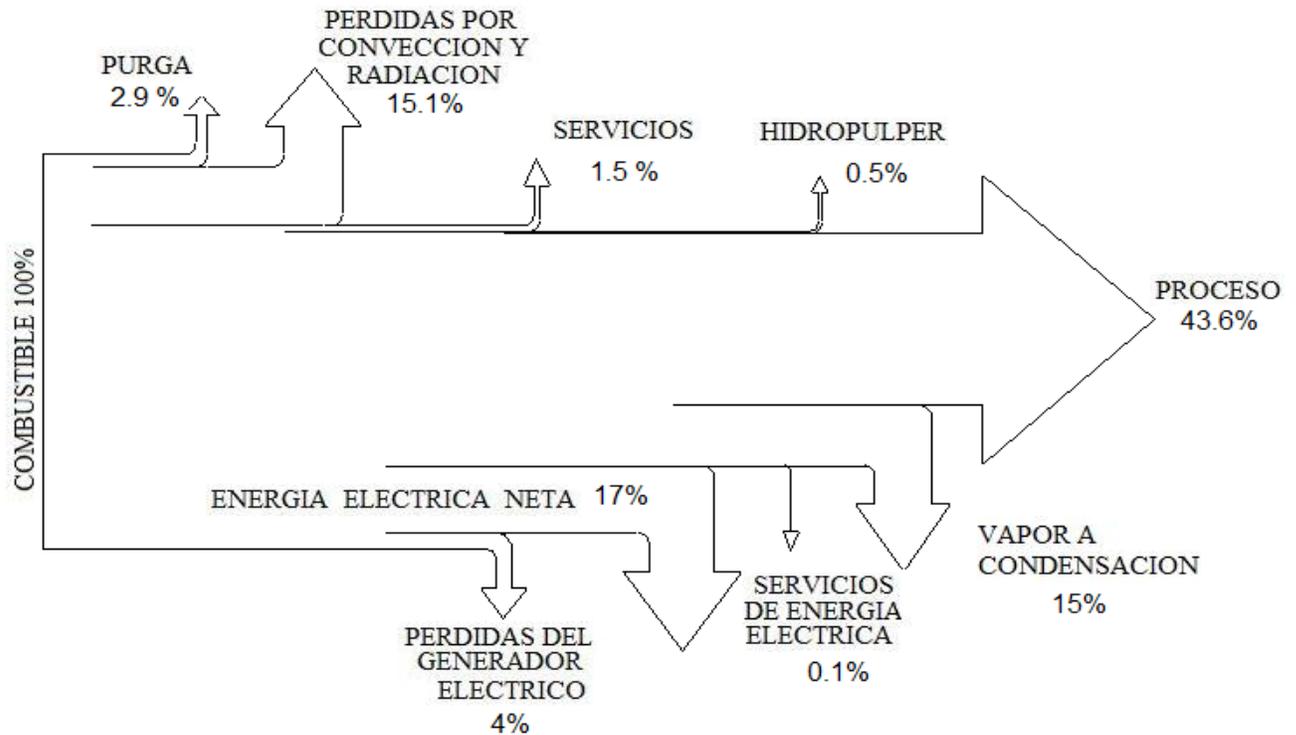
Debido a que esta turbina para satisfacer los requerimientos descritos anteriormente necesita una mayor cantidad de vapor se recalcula el balance de masa, energía y condiciones de trabajo resumiéndolas en las siguientes tablas:

| BALANCE DE MASA Y ENERGIA PROPUESTA 2 |        |           |            |        |           |            |        |           |
|---------------------------------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|
| CORRIENTE                             | Masa   | $h_{[i]}$ | $h_{s[i]}$ | $P[i]$ | $s_{[i]}$ | $s_{s[i]}$ | $T[i]$ | $x_{[i]}$ |
|                                       | [Kg/s] | [kJ/kg]   | [kJ/kg]    | [kPa]  | [kJ/kg-C] | [kJ/kg-C]  | [C]    |           |
| 1                                     | 11.53  | 3367      | -          | 4200   | 6.965     | -          | 467    | 100       |
| 2                                     | 11.53  | 3367      | -          | 4136   | 6.972     | -          | 466.6  | 100       |
| 3                                     | 2.788  | 2871      | 2783       | 427    | 7.163     | 6.972      | 205.8  | 100       |
| 4                                     | 2.788  | 2555      | 2499       | 52     | 7.32      | 7.163      | 82.29  | 0.9599    |
| 5                                     | 2.788  | 343.3     | -          | 52     | 1.099     | -          | 82     | -100      |
| 6                                     | 2.788  | 343.5     | 343.5      | 190    | 1.099     | -          | 82.02  | -100      |
| 7                                     | 8.74   | 2871      | 2783       | 427    | 7.163     | -          | 205.8  | 100       |
| 8                                     | 7.248  | 2871      | -          | 427    | 7.163     | -          | 205.8  | 100       |
| 9                                     | 1.492  | 2871      | -          | 427    | 7.163     | -          | 205.8  | 100       |
| 10                                    | 1.268  | 2871      | -          | 340    | 7.266     | -          | 203.7  | 100       |
| 11                                    | 0.2237 | 2871      | -          | 340    | 7.266     | -          | 203.7  | 100       |
| 12                                    | 7.248  | 427.5     | -          | 110    | 1.329     | -          | 102    | -100      |
| 13                                    | 0.5869 | 427.5     | -          | 108.8  | 1.329     | -          | 102    | -100      |
| 14                                    | 6.662  | 427.5     | -          | 110    | 1.329     | -          | 102    | -100      |
| 15                                    | 6.662  | 427.6     | 427.6      | 190    | 1.329     | -          | 102    | -100      |
| 16                                    | 1.268  | 1206      | -          | 190    | 3.321     | -          | 118.6  | 0.321     |
| 17                                    | 10.72  | 497.8     | -          | 190    | 1.513     | -          | 118.6  | 0         |
| 18                                    | 10.72  | 498       | 498        | 340    | 1.513     | -          | 118.6  | -100      |
| 19                                    | 10.72  | 572.1     | -          | 340    | 1.698     | -          | 136    | -100      |
| 20                                    | 1.233  | 105.1     | -          | 340    | 0.3669    | -          | 25     | -100      |
| 21                                    | 1.233  | 293.3     | -          | 340    | 0.9548    | -          | 70     | -100      |
| 22                                    | 11.95  | 543.3     | -          | 320    | 1.627     | -          | 135.7  | 0         |
| 23                                    | 11.95  | 548.9     | 547.5      | 4200   | 1.63      | -          | 135    | -100      |
| 24                                    | 0.4222 | 3367      | -          | 4200   | 6.965     | -          | 467    | 100       |
| 25                                    | 1.492  | 2871      | -          | 340    | 7.266     | -          | 203.7  | 100       |
| $m_{combdot}$                         | 0.9078 |           |            |        | -         |            |        |           |

Con respecto a la cantidad de trabajo, eficiencias que se obtienen se encuentra:

| COMPARACIÓN RESULTADOS |                              |                |             |
|------------------------|------------------------------|----------------|-------------|
|                        | VARIABLES                    | SISTEMA ACTUAL | PROPUESTA 2 |
| TRABAJO DE BOMBAS      | w_bom_1[kW]                  | 0.1696         | 0.3964      |
|                        | w_bom_2[kW]                  | 0.5576         | 0.5569      |
|                        | w_bom_3[kW]                  | 1.45           | 1.702       |
|                        | w_bom_4[kW]                  | 42.85          | 49.71       |
| CALOR EA               | Q_dot_1_aguacondensado[kJ/s] | -676.1         | -793.6      |
|                        | Q_dot_2_aguacondensado[kJ/s] | -220           | -232        |
|                        | Q_dot_condensador [kJ/s]     | 2849           | 6164        |
| EFICIENCIAS            | Eta_ap                       | 0.65           | 0.85        |
|                        | Eta_bbp                      | 0.75           | 0.75        |
|                        | Eta_bbp2                     | 0.75           | 0.75        |
|                        | Eta_bbp3                     | 0.75           | 0.75        |
|                        | Eta_bbp4                     | 0.75           | 0.75        |
|                        | Eta_bp                       | 0.63           | 0.85        |
|                        | Eta_cal                      | 0.7221         | 0.85        |
|                        | Eta_ciclo                    | 0.5822         | 0.6347      |
|                        | Eta_electrico                | 0.1038         | 0.1714      |
|                        | Eta_vapor                    | 0.4848         | 0.4699      |
| TRABAJO TURBINA        | W_netto [kW]                 | 4033           | 6550        |
|                        | W_netoturb[kW]               | 4078           | 6602        |
|                        | w_turb_ap_ideal[kW]          | 5804           | 6730        |
|                        | w_turb_ap_real[kW]           | 3772           | 5720        |
|                        | w_turb_bp_ideal[kW]          | 485.5          | 1037        |
|                        | w_turb_bp_real[kW]           | 305.8          | 881.7       |

Los resultados anteriores se pueden observar mejor en el siguiente diagrama de Sankey



### 5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica consiste en analizar la rentabilidad de las medidas con inversión identificadas en el dictamen energético a fin de resultar atractivas a la empresa

En este trabajo de tesis los métodos de evaluación económica empleados son: el método del valor presente neto, la tasa interna de rendimiento, el periodo de recuperación y la razón beneficio/ costo que se aplican directamente al flujo de efectivo (FNE), con estos datos se obtendrá la rentabilidad de las propuesta de ahorro de energía de los recursos utilizados para el proyecto a lo largo de la vida útil del mismo, para poder tomar la decisión de aceptarlo o rechazarlo.

#### VALOR PRESENTE NETO

El valor presente neto (VPN) es el valor que se obtiene al calcular para cada año el capital que se debe tener para obtener beneficio, mostrado por los flujos netos de efectivo que se dan en la vida del proyecto, a una tasa de descuento fija determinada.

$$VPN = \sum_{j=1}^n \frac{FNE_j}{(1+i)^j} - i_0$$

Donde:

VPN= valor presente neto

FNE= flujo de efectivo al año j

n= numero de periodos

i0= inversión inicial

Representa una cantidad actual equivalente a los costos anuales que tendrán durante la vida útil del equipo

1. Considerando el valor del dinero en el tiempo de acuerdo al valor de interés escogido.
2. Sitúa el valor equivalente de cualquier flujo de efectivo en un punto particular en el tiempo

El flujo neto de efectivo se define como el total de los ingresos (ahorros obtenidos) menos el total de egresos (inversión del equipo).

### **TASA DE RECUPERACION.**

La tasa de recuperación (TIR) es la tasa de descuento que aplica a los flujos netos de efectivo esperados durante la vida útil del proyecto, reduce al valor presente neto a cero, es decir la tasa de interés mas alta que el inversionista podría pagar sin perder dinero. Para calcular la TIR, se prueban varias tasa hasta encontrar aquella que haga la suma de efectivos para el periodo sea igual a la inversión y de esta forma el VPN se haga cero.

$$\sum_{j=1}^n \frac{FNE_j}{(1 + TIR)^j} = i_0$$

Donde:

TIR= tasa interna de retorno

VPN= valor presente neto

FNE= flujo de efectivo al año j

n= numero de periodos

i0= inversión inicial

### **PERIODO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN**

Esta técnica determina el tiempo en el cual el capital invertido sea cubierto por los beneficios resultantes. La medida de calcula sin tomar el valor del dinero en el tiempo.

Se calcula el tiempo en el cual la siguiente expresión se cumpla:

$$\sum_{j=1}^n FNE_{acumulado} = 0$$

### **PREMISAS DE CÁLCULO**

La evaluación económica de las propuestas se realizó con datos del mes de febrero del 2010.

### **PROPUESTA 1. SUSTITUCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR**

| DATOS TÉCNICOS                      |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Combustible empleado                | Combustóleo |
| Poder calorífico                    | 42100 kJ/kg |
| Consumo de combustible actual       | 0.9225 kg/s |
| Eficiencia normal de caldera actual | 72.20%      |

Tipo de cambio            12.75 \$ por USD\$  
 Precio del combustible    6.27 \$/kg

| BASES DE LA EVALUACIÓN                       |         |
|--|---------|
| Tasa de descuento real                       | 12%     |
| Tasa de descuento nominal                    | 9%      |
| Inflación                                    | 3.50%   |
| Vida del Proyecto                            | 10 años |
| Incremento anual en el costo del combustible | 0.00%   |
| Tipo de cambio                               | \$12.50 |

| COTIZACIÓN CALDERA          |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Marca                       | ecovis                  |
| Tipo de caldera             | paquete                 |
| Capacidad                   | 45 400 kg/h             |
| Presión de diseño           | 7.18 KPa                |
| Tipo de vapor               | sobrecalentado a 400 °c |
| <b>Medidas aproximadas</b>  |                         |
| Largo:                      | 12 m                    |
| Ancho:                      | 4.14 m                  |
| Alto:                       | 4 m                     |
| Peso aproximado:            | 60000 kg                |
| <b>Eficiencia</b>           | 85%                     |
| Precio de la caldera        | 914 000 Dlls            |
| Precio del economizador     | 195 000 Dlls            |
| Instrumentación electrónica | 200 000 Dlls            |
| Instalación                 | 300 000 Dlls            |
| Transportación              | 30 000 Dlls             |
| <b>Precio total</b>         | 1 639 000 Dlls          |
|                             | \$ 20 487 500           |

## FINANCIAMIENTO

Se consideró un financiamiento del 50% de la inversión total de \$ 10 000 000 (ver Anexo E)

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| Banco                     | Banamex      |
| Monto                     | \$10,000,000 |
| Plazo                     | 36 meses     |
| Taza de interés           | 40%          |
| Periodo de capitalización | Mensual      |

Para el consumo de energía anual de la evaluación económica se dividió en dos energías: térmica y eléctrica. Para el caso de la energía eléctrica se consideraron lo siguiente los cálculos se presentan en el Anexo F:

Para el sistema actual: 0.6145 \$/kwh generado

Para la propuesta 1: 0.5955 \$/kwh generado

Con los datos anteriores obtenemos.

| Año | Estado Actual     |                 |                        | Sistema propuesto |                 |                   | Incremental      |
|-----|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|
|     | Energía térmica   | E.E generada    | Suma de energía actual | Energía térmica   | E.E generada    | Suma              | Ahorro           |
| 0   | \$ 140,415,897.60 | \$ 492,766.27   | \$ 140,908,663.87      | 119613542.4       | \$ 749,184.92   | \$ 120,362,727.32 | \$ 20,545,936.55 |
| 1   | \$ 157,265,805.31 | \$ 551,898.22   | \$ 157,817,703.54      | 133967167.5       | \$ 839,087.12   | \$ 134,806,254.60 | \$ 23,011,448.93 |
| 2   | \$ 176,137,701.95 | \$ 618,126.01   | \$ 176,755,827.96      | 150043227.6       | \$ 939,777.57   | \$ 150,983,005.16 | \$ 25,772,822.80 |
| 3   | \$ 197,274,226.18 | \$ 692,301.13   | \$ 197,966,527.32      | 168048414.9       | \$ 1,052,550.88 | \$ 169,100,965.78 | \$ 28,865,561.54 |
| 4   | \$ 220,947,133.33 | \$ 775,377.27   | \$ 221,722,510.59      | 188214224.7       | \$ 1,178,856.98 | \$ 189,393,081.67 | \$ 32,329,428.93 |
| 5   | \$ 247,460,789.32 | \$ 868,422.54   | \$ 248,329,211.87      | 210799931.6       | \$ 1,320,319.82 | \$ 212,120,251.47 | \$ 36,208,960.40 |
| 6   | \$ 277,156,084.04 | \$ 972,633.25   | \$ 278,128,717.29      | 236095923.4       | \$ 1,478,758.20 | \$ 237,574,681.64 | \$ 40,554,035.64 |
| 7   | \$ 310,414,814.13 | \$ 1,089,349.24 | \$ 311,504,163.36      | 264427434.3       | \$ 1,656,209.18 | \$ 266,083,643.44 | \$ 45,420,519.92 |
| 8   | \$ 347,664,591.82 | \$ 1,220,071.14 | \$ 348,884,662.97      | 296158726.4       | \$ 1,854,954.29 | \$ 298,013,680.66 | \$ 50,870,982.31 |
| 9   | \$ 389,384,342.84 | \$ 1,366,479.68 | \$ 390,750,822.52      | 331697773.5       | \$ 2,077,548.80 | \$ 333,775,322.33 | \$ 56,975,500.19 |
| 10  | \$ 436,110,463.98 | \$ 1,530,457.24 | \$ 437,640,921.23      | 371501506.4       | \$ 2,326,854.66 | \$ 373,828,361.01 | \$ 63,812,560.21 |

## CALCULO DEL FLUJO NETO DE EFECTIVO

| AÑO | ENTRADAS     |                 | SALIDAS     |                    |                 | FLUJO NETO DE EFECTIVO |
|-----|--------------|-----------------|-------------|--------------------|-----------------|------------------------|
|     | AHORRO       | FINANCIAMIENTO  | INVERSION   | GASTOS FINANCIEROS | PAGO DE INTERES |                        |
| 0   | \$0          | \$70000000.0000 | \$128225000 | \$0                | \$0             | -\$58225000.0000       |
| 1   | \$23,011,449 | \$0.0000        | \$0         | \$23333333.333     | \$23722222.222  | -\$24044106.6230       |
| 2   | \$25,772,823 | \$0             | \$0         | \$23333333.333     | \$14388888.888  | -\$11949399.4178       |
| 3   | \$28,865,562 | \$0             | \$0         | \$23333333.333     | \$5055555.555   | \$476672.6520          |
| 4   | \$32,329,429 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$32329428.9258        |
| 5   | \$36,208,960 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$36208960.3969        |
| 6   | \$40,554,036 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$40554035.6445        |
| 7   | \$45,420,520 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$45420519.9219        |
| 8   | \$50,870,982 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$50870982.3125        |
| 9   | \$56,975,500 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$56975500.1900        |
| 10  | \$63,812,560 | \$0             | \$0         | \$0                | \$0             | \$63812560.2128        |

## CALCULO DEL VPN

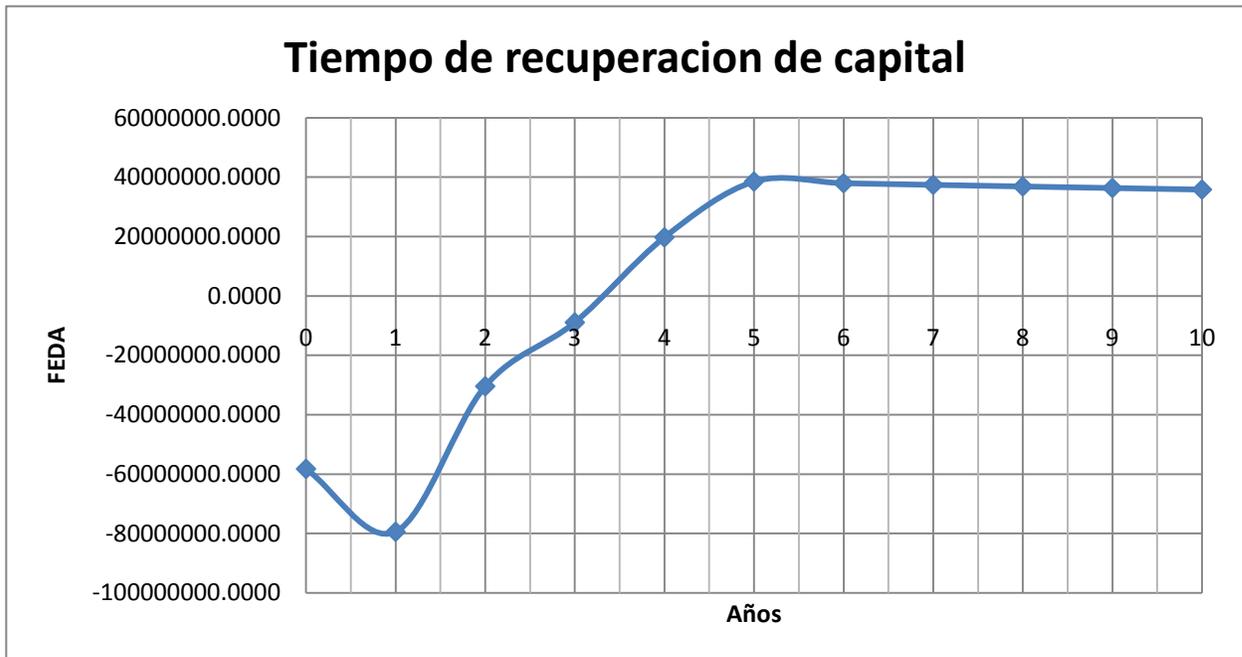
| AÑOS | FLUJO NETO DE EFECTIVO | FED               | FEDA                    |
|------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| 0    | -\$ 58,225,000.00      | -\$ 58,225,000.00 | -\$ 58,225,000.00       |
| 1    | -\$ 24,044,106.62      | -\$ 21,158,813.83 | -\$ 79,383,813.83       |
| 2    | -\$ 11,949,399.42      | -\$ 9,253,614.91  | -\$ 30,412,428.74       |
| 3    | \$ 476,672.65          | \$ 324,839.07     | -\$ 8,928,775.84        |
| 4    | \$ 32,329,428.93       | \$ 19,387,808.52  | \$ 19,712,647.58        |
| 5    | \$ 36,208,960.40       | \$ 19,108,624.08  | \$ 38,496,432.59        |
| 6    | \$ 40,554,035.64       | \$ 18,833,459.89  | \$ 37,942,083.96        |
| 7    | \$ 45,420,519.92       | \$ 18,562,258.07  | \$ 37,395,717.96        |
| 8    | \$ 50,870,982.31       | \$ 18,294,961.55  | \$ 36,857,219.62        |
| 9    | \$ 56,975,500.19       | \$ 18,031,514.10  | \$ 36,326,475.65        |
| 10   | \$ 63,812,560.21       | \$ 17,771,860.30  | <b>\$ 35,803,374.40</b> |

Para el caso de la propuesta 1 (sustitución del generador de vapor) obtenemos un valor presente neto (VPN) de **\$ 35,803,374.40**

## CÁLCULO DEL TRC

Como se puede observar en la Grafica 8 y en base al FED y el FEDA el TRC es de 3 años y 3 meses aproximadamente.

Grafica 8. Tiempo de recuperaci3n de capital propuesta 1



**CALCULO TIR**

| CÁLCULO DEL TIR |       |
|-----------------|-------|
| -58225000       | 0.207 |
| -19920552.3     |       |
| -8202222.343    |       |
| 271080.5922     |       |
| 15232421.65     |       |
| 14134475.76     |       |
| 13115669.31     |       |
| 12170297.95     |       |
| 11293068.52     |       |
| 10479069.38     |       |
| 9723742.919     |       |
| 72051.4252      |       |

Obtenemos una TIR de 20.7 %

**PROPUESTA 2**

Premisas de cálculo para la propuesta 2

La evaluación económica de la propuesta se realizó con datos del mes de febrero del 2010.

\*Los datos técnicos para el generador de vapor son los mismos de la propuesta 1

| DATOS TECNICOS PARA LA TURBINA |            |
|--------------------------------|------------|
| Eficiencia                     | 87%        |
| Trabajo neto turbina           | 6522.697   |
| Consumo de vapor               | 11.53 kg/s |
| Presión de entrada             | 4136Kpa    |

Para la realización económica de esta propuesta es necesario calcular:

- Cuánto costaría generar cada KW, para lo anterior implica conocer la cantidad de vapor que se utiliza para su generación.
- La inversión total (Generador de vapor más turbina)
- La masa de combustible necesario.

| CONDICIONES PROPUESTAS                            | Kg/s   |
|---|--------|
| Cantidad vapor entra a la turbina                 | 11.53  |
| Cantidad de vapor a proceso                       | 8.749  |
| Cantidad de vapor para generación de electricidad | 2.781  |
| precio comb.(\$/Kg)                               | 6.27   |
| Cantidad total de combustible                     | 0.9078 |

Para calcular el costo de generación de electricidad por cada KW se considera una eficiencia del generador de vapor de 85% y despejando la masa de combustible se tiene:

$$\eta_{cal} = \frac{m_{1dot} * (h_1 - h_{23})}{m_{combdot} * PCS}$$

$$M_{comb} = 0.2158 \text{ Kg/s}$$

A partir de aquí se puede obtener un costo de generación de electricidad de \$0.6471 /KW teniendo un costo anual de \$ 1415468.8

| BASES DE LA EVALUACIÓN                       |         |
|--|---------|
| Tasa de descuento real                       | 12%     |
| Tasa de descuento nominal                    | 9%      |
| Inflación                                    | 3.50%   |
| Vida del Proyecto                            | 10 años |
| Incremento anual en el costo del combustible | 0.00%   |
| Tipo de cambio                               | \$12.50 |

## FINANCIAMIENTO

Se consideró un financiamiento del 50% de la inversión total (Generador de vapor y turbina) de \$ 128225000. Ver Anexo F

| Gastos Financieros        |              |
|---------------------------|--------------|
| Banco                     | Banamex      |
| Monto                     | \$70,000,000 |
| Plazo                     | 36 meses     |
| Taza de interés           | 40%          |
| Periodo de capitalización | Mensual      |

Para el consumo de energía el ahorro se ve afectado de la siguiente manera

| Año | Estado Actual   |              |              |                     | Sistema propuesto |              |               | Incremental  |
|-----|-----------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------|--------------|---------------|--------------|
|     | Energía térmica | E.E comprada | E.E generada | SUMA ENERGIA ACTUAL | Energía térmica   | E.E generada | Suma          | Ahorro       |
| 0   | \$140,415,898   | \$942,444    | \$492,766    | \$141,851,108       | \$119,613,542     | \$884,644    | \$120,498,186 | \$21,352,922 |
| 1   | \$157,265,805   | \$1,055,538  | \$551,898    | \$158,873,241       | \$133,967,167     | \$990,801    | \$134,957,968 | 23915273     |
| 2   | \$176,137,702   | \$1,182,202  | \$618,126    | \$177,938,030       | \$150,043,228     | \$1,109,697  | \$151,152,924 | 26785106     |
| 3   | \$197,274,226   | \$1,324,066  | \$692,301    | \$199,290,594       | \$168,048,415     | \$1,242,860  | \$169,291,275 | 29999318     |
| 4   | \$220,947,133   | \$1,482,954  | \$775,377    | \$223,205,465       | \$188,214,225     | \$1,392,004  | \$189,606,228 | 33599237     |
| 5   | \$247,460,789   | \$1,660,909  | \$868,423    | \$249,990,121       | \$210,799,932     | \$1,559,044  | \$212,358,976 | 37631145     |
| 6   | \$277,156,084   | \$1,860,218  | \$972,633    | \$279,988,935       | \$236,095,923     | \$1,746,129  | \$237,842,053 | 42146882     |
| 7   | \$310,414,814   | \$2,083,444  | \$1,089,349  | \$313,587,608       | \$264,427,434     | \$1,955,665  | \$266,383,099 | 47204508     |
| 8   | \$347,664,592   | \$2,333,458  | \$1,220,071  | \$351,218,120       | \$296,158,726     | \$2,190,345  | \$298,349,071 | 52869049     |
| 9   | \$389,384,343   | \$2,613,472  | \$1,366,480  | \$393,364,295       | \$331,697,774     | \$2,453,186  | \$334,150,960 | 59213335     |
| 10  | \$436,110,464   | \$2,927,089  | \$1,530,457  | \$440,568,010       | \$371,501,506     | \$2,747,568  | \$374,249,075 | 66318935     |

## CALCULO DEL FLUJO NETO DE EFECTIVO

| AÑO | ENTRADAS     |                | SALIDAS   |                    |                 | FLUJO NETO DE EFECTIVO |
|-----|--------------|----------------|-----------|--------------------|-----------------|------------------------|
|     | AHORRO       | FINANCIAMIENTO | INVERSION | GASTOS FINANCIEROS | PAGO DE INTERES |                        |
| 0   | \$0          | 70000000.0000  | 128225000 | 0                  | 0               | -58225000.0000         |
| 1   | \$23,915,273 | 0.0000         | 0         | 23333333.3333      | 23722222.2222   | -23140282.5699187      |
| 2   | \$26,785,106 | 0              | 0         | 23333333.3333      | 14388888.8889   | -10937116.4783089      |
| 3   | \$29,999,318 | 0              | 0         | 23333333.3333      | 5055555.5556    | 1610429.5442939        |
| 4   | \$33,599,237 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 33599236.6451648       |
| 5   | \$37,631,145 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 37631145.0425845       |
| 6   | \$42,146,882 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 42146882.4476947       |
| 7   | \$47,204,508 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 47204508.3414180       |
| 8   | \$52,869,049 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 52869049.3423882       |
| 9   | \$59,213,335 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 59213335.2634748       |
| 10  | \$66,318,935 | 0              | 0         | 0                  | 0               | 66318935.4950918       |

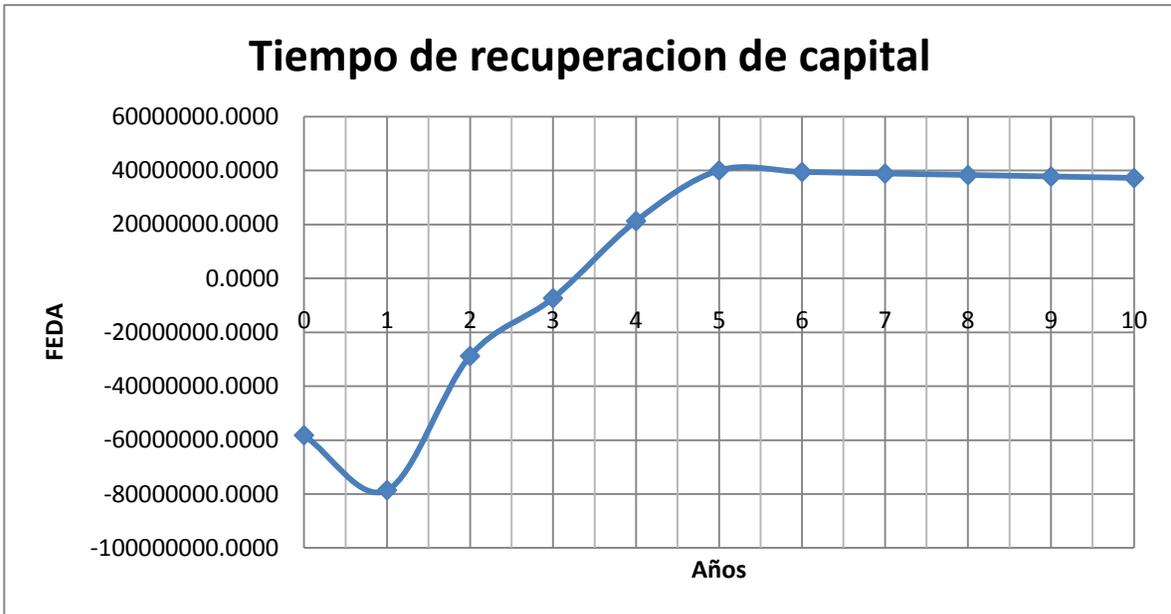
## CALCULO DEL VPN

| AÑOS | FLUJO NETO DE EFECTIVO | FED            | FEDA               |
|------|------------------------|----------------|--------------------|
| 0    | -58225000.0000000      | -58225000.0000 | -58225000.0000     |
| 1    | -23140282.5699187      | -20363448.66   | -78588448.66       |
| 2    | -10937116.4783089      | -8469703.001   | -28833151.66       |
| 3    | 1610429.5442939        | 1097462.642    | -7372240.358       |
| 4    | 33599236.6451648       | 20149306.32    | 21246768.96        |
| 5    | 37631145.0425845       | 19859156.3     | 40008462.62        |
| 6    | 42146882.4476947       | 19573184.45    | 39432340.76        |
| 7    | 47204508.3414180       | 19291330.6     | 38864515.05        |
| 8    | 52869049.3423882       | 19013535.44    | 38304866.03        |
| 9    | 59213335.2634748       | 18739740.53    | 37753275.96        |
| 10   | 66318935.4950918       | 18469888.26    | <b>37209628.79</b> |

El valor presente neto para la propuesta 2 sustitución del generador de vapor y turbina es de \$ **37209628.79**

## CÁLCULO DEL TRC

En base a la grafica 9 se puede decir que el TRC es de 3 años 3 meses.  
Grafica 9. Tiempo de recuperación de capital propuesta 2



#### CALCULO DE TIR

| CALCULO DEL TIR |       |
|-----------------|-------|
| -58225000       | 0.219 |
| -18983004.57    |       |
| -7360298.472    |       |
| 889059.061      |       |
| 15216493.62     |       |
| 13980699.63     |       |
| 12845269.55     |       |
| 11802052.42     |       |
| 10843559.24     |       |
| 9962909.226     |       |
| 9153780.42      |       |
| 125520.1217     |       |

Como se observa la tasa interna de retorno es del 21.9%

#### 5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en la evaluación técnica y económica del sistema actual de generación y distribución de vapor de la planta de papel y de las dos propuestas para el sistema se presentan lo siguiente:

Sistema actual:

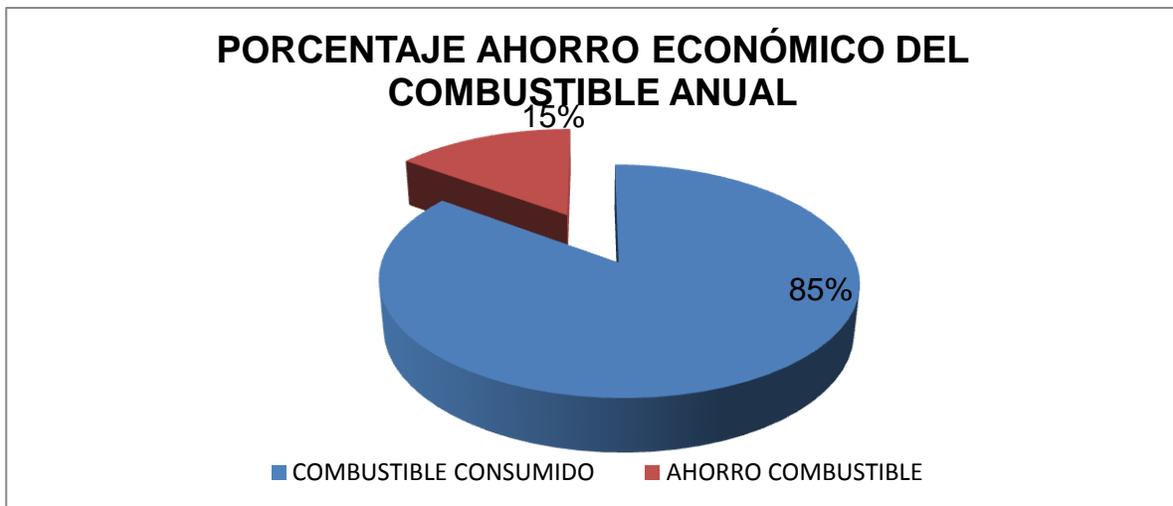
Con respecto a este sistema como se explicó en los análisis de resultados anteriormente, el sistema actual no tiene una eficiencia de ciclo dentro de los parámetros de eficiencia mínima para un sistema de cogeneración. Lo anterior debido a justificaciones importantes como la antigüedad de los equipos de

generación de vapor y de electricidad ,así mismo dentro de la evaluación nos percatamos de que no eran capaces con el sistema actual de satisfacer todos sus requerimientos energéticos ,puesto que compraban un porcentaje considerable de electricidad a CFE.

Por los motivos explicados anteriormente se eligieron las 2 propuestas analizadas en este ultimo capitulo, la primera para analizar la mejora en el ahorro de combustible al sustituir el generador de vapor y la otra al modificar totalmente la eficiencia del sistema al cambiar los 2 equipos principales: el generador de vapor y la turbina para satisfacer todos sus requerimientos eléctricos.

Para la propuesta 1:

Al considerar solo el cambio del generador de vapor, se observó que el impacto económico se origina en la disminución del consumo de combustible en un 15%, lo cual se traduce a un ahorro considerable de dinero. Como se observa en la grafica:



Retomando el análisis económico la inversión total es de \$ 20 487 500, de la cual se considera un financiamiento del 50%, sin embargo tomando en base los índices económicos se observa que se tiene un VPN de \$35803374.40 el cual es mayor que el capital social lo que indica una recuperación aceptable ,lo cual se fundamenta con el valor del TRC el cual es de 3 años y 3 meses ,lo cual nos indica que en su sistema actual hay perdidas energéticas y económicas muy grandes, finalmente la TIR es del 20.7 %la cual supera la tasa de interés bancaria cuyo valor es del 12%.Finalmente el valor del Beneficio/costo es del 10.31.Es importante mencionar que en esta propuesta se mantiene el mismo costo de consumo de energía eléctrica. A continuación se presenta la siguiente tabla que describe una comparación más descriptiva con respecto al sistema actual:

| SISTEMA ACTUAL         |                      |                 | SISTEMA PROPUESTO 1    |            |                    |
|------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|------------|--------------------|
| mcomb Kg/s             | 0.81                 | TERMICO         | mcomb Kg/s             | 0.69       | TERMICO            |
| Kg/AÑO<br>COMBUSTIBLE  | 22394880             |                 | Kg/AÑO                 | 19077120   |                    |
| \$/AÑO<br>COMBUSTIBLE  | 140415898            |                 | \$/AÑO                 | 119613542  |                    |
| \$/KWH                 | 0.6145               | E.E<br>GENERADA | TOTAL KW               | 4033       | E.E<br>GENERADA    |
| \$/año                 | 793049.12            |                 | \$/KWH                 | 0.5955     |                    |
| ENERGIA<br>GENERADA KW | 4033                 |                 | KWH/año                | 835121.376 |                    |
| \$/KWH                 | 1.08021              | E.E<br>COMPRADA | \$/KWH                 | 1.08021    | E.E<br>COMPRADA    |
| \$/año                 | 872464.013           |                 | \$/año                 | 872464.013 |                    |
| ENERGIA<br>COMPRADA KW | 2524                 |                 | ENERGIA<br>COMPRADA KW | 2524       |                    |
| \$/AÑO<br>ELECTRICIDAD | 1665513.133          |                 | COSTO TOTAL<br>\$/AÑO  |            |                    |
| COSTO TOTAL<br>\$/AÑO  | <b>142081410.7</b>   |                 |                        |            | <b>121321127.8</b> |
| AHORRO \$/ANUAL        | <b>20,760,282.94</b> |                 |                        |            |                    |

Con respecto a la propuesta 2:

Esta propuesta consideraba el cambio del generador de vapor y de la turbina de vapor para el sistema ascendiendo la inversión total a un valor de \$128, 225,000 del cual se considera un financiamiento del 50%.

Con base a los indicadores financieros el VPN tiene un valor de \$ 37, 209,628.9 cuyo valor es mayor que el capital social con el que cuenta la planta de producción. El tiempo de recuperación de capital es de 3 años 3 meses, el cual es un tiempo muy favorable considerando que generalmente el tiempo de recuperación para un sistema de cogeneración es de 10 años.

La tasa interna de retorno presenta un valor del 21.9% la cual es mayor que la tasa de interés bancaria.

Para esta propuesta es importante mencionar que el costo de energía varia ya que como se menciona anteriormente el costo actual de la generación de electricidad es de \$0.6145 /KWH, contrastando con el costo de la generación eléctrica de la propuesta \$0.6471 /KWH.

Para lo cual se considera una comparación del costo de la energía eléctrica y del combustible.

| SISTEMA ACTUAL         |                      |                 | SISTEMA PROPUESTO 2    |            |                    |
|------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|------------|--------------------|
| mcomb Kg/s             | 0.81                 | TERMICO         | mcomb Kg/s             | 0.69       | TERMICO            |
| Kg/AÑO<br>COMBUSTIBLE  | 22394880             |                 | Kg/AÑO                 | 19077120   |                    |
| \$/AÑO<br>COMBUSTIBLE  | 140415898            |                 | \$/AÑO                 | 119613542  |                    |
| \$/KWH                 | 0.6145               | E.E<br>GENERADA | TOTAL KW               | 6602       | E.E<br>GENERADA    |
| \$/año                 | 793049.12            |                 | \$/KWH                 | 0.6471     |                    |
| ENERGIA<br>GENERADA KW | 4033                 |                 | KWH/año                | 1367089.34 |                    |
| \$/KWH                 | 1.08021              | E.E<br>COMPRADA | \$/KWH                 | 0          | E.E<br>COMPRADA    |
| \$/año                 | 872464.013           |                 | \$/año                 | 0          |                    |
| ENERGIA<br>COMPRADA KW | 2524                 |                 | ENERGIA<br>COMPRADA KW | 0          |                    |
| \$/AÑO<br>ELECTRICIDAD | 1665513.133          |                 | COSTO TOTAL<br>\$/AÑO  |            |                    |
| COSTO TOTAL<br>\$/AÑO  | <b>142081410.7</b>   |                 |                        |            | <b>120980631.7</b> |
| AHORRO \$/ANUAL        | <b>21,100,778.99</b> |                 |                        |            |                    |

Con respecto a la tabla anterior se observa que al implementar la propuesta 2 a pesar de la inversión y los intereses se obtiene un ahorro anual de \$21, 100,778.99 en comparación del sistema actual.

Se resumen los principales resultados en la siguiente tabla comparativa:

| TABLA COMPARATIVA               |                |                 |                |
|---------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| PARAMETROS                      | SISTEMA ACTUAL | PROPUESTA 1     | PROPUESTA 2    |
| Eficiencia del G.V              | 0.7244         | 85%             | 85%            |
| Masa Combustible total(Kg/s)    | 0.9225         | 0.786           | 0.9078         |
| Eficiencia de ciclo             | 0.5822         | 0.683           | 0.6347         |
| Eficiencia vapor                | 0.4848         | 0.567           | 0.4699         |
| Eficiencia eléctrica            | 0.1038         | 0.12            | 0.1714         |
| VPN                             | N/A            | \$35,803,374.40 | 37,209,628.90  |
| TRC                             | N/A            | 3 años 3 meses  | 3 años 3 meses |
| TIR                             | N/A            | 20.7            | 21.9           |
| W neto sist. Cogeneración       | 4033 KW        | 4033 KW         | 6550 KW        |
| Efic. Bombas                    | 75%            | 75%             | 75%            |
| Precio energía eléctrica \$/KW  | 0.6145         | 0.5945          | 0.6471         |
| Precio por Kg vapor \$/Kg vapor | 0.58           | 0.49            | 0.49           |
| Vapor total generado Kg/s       | 9.94           | 9.94            | 11.53          |
| Vapor a proceso Kg/s            | 8.75           | 8.75            | 8.75           |
| Vapor a G.E Kg/s                | 1.19           | 1.19            | 2.788          |

Una vez analizando lo anterior se pudo determinar que la opción más viable para el sistema analizado es de acuerdo al resumen de las tablas anteriores la propuesta 2.

Lo anterior debido a una mayor disminución de costos anuales y una rápida recuperación de la inversión a pesar del financiamiento, y esto permitiría que satisfagan sus requerimientos totales de vapor y de energía eléctrica con un menor costo.

## **CONCLUSIONES**

El objetivo principal de este capítulo fue el de analizar térmica y económicamente las dos propuestas que se generaron a partir del análisis y las condiciones del sistema actual con el que cuenta la planta de papel para poder determinar si estas eran viables para la mejora del sistema, teniendo en cuenta por supuesto los requerimientos normales de exigencias de vapor y energía eléctrica para el funcionamiento diario de la planta

## CONCLUSIONES

Al haber cubierto el principal objetivo que inspiró la realización de esta tesis, así como los alcances establecidos en la misma, se puede decir lo siguiente:

En la realización del diagnóstico energético en la planta de papel, se identificaron grandes carencias y bajas eficiencias en el sistema de generación y distribución de vapor, encontrando como principales fuentes de ahorro energético la sustitución del generador de vapor y la turbina. Así mismo no solo se identificaron los puntos de ahorro en el sistema sino que se evaluaron térmica y económicamente para definir cuál era la más conveniente para la planta de papel.

Se generaron dos propuestas en la primera se consideró solo la sustitución del generador de vapor y en la segunda el remplazo del generador de vapor y turbina la evaluación energética nos permitió realizar una evaluación económica, en la que pudimos observar, que la propuesta dos nos permite satisfacer la necesidades de energía eléctrica de la planta generando un mayor ahorro económico y presentando esta unos índices económicos más altos por lo tanto se considera la propuesta dos como la opción más rentable para el caso en particular de la planta procesadora de papel en estudio.

En base al análisis energético de las propuestas generadas se sugiere un estudio futuro para la reconfiguración del sistema de generación de vapor que no se encuentra dentro de los alcances de este trabajo.

Por otra parte se recomienda realizar algunas acciones como: realizar mantenimientos preventivos esporádicos en los equipos para evitar fallas, la adquisición de equipos de revelo debido a que la planta trabaja todos los días y los equipos están sometidos a un desgaste constante, la instalación de equipos de medición así como la implementación de un plan de calibración, estas medidas nos permitirán tener un mejor control del proceso para evitar paros de la producción que generan gastos innecesarios

Así mismo la metodología para la realización de un diagnóstico energético descrita en este trabajo puede llegar a generalizarse para cualquier sistema de generación y distribución de vapor en la industria, teniendo en cuenta que el correcto uso de la energía favorece no solo al sector industrial, sino a todo el mundo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Payne, W., "Efficient boiler operations sourcebook". Ed. Prentice Hall International. 4<sup>th</sup>. Edition. 1996.
- [2] **Políticas** de precios de combustibles en América del sur y México. Implicancias económicas y ambientales. Hugo Alto monte y Jorge Rogat.
- [3] Sorensen, H., "Energy conversion system-". Ed. John Wiley & Son. 1983.
- [4] Yunus A. Cengel. "Transferencia de calor-".,2da ed. Ed.Mc Graw Hill Interamericana ,México 2004.
- [5] Woodruff, E., "Steam-Plant Operation". Ed. Mc. Graw-Hill. 1967.
- [6] ASME, PTC 4.1 Código de pruebas para generadores de vapor.
- [7] Norma oficial mexicana nom-009-ener-1995 Eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales.

## REFERENCIAS ELECTRONICA

- [8] CONAE (en línea). Tratamiento de agua para caldera. 23 de abril del 2009 (fecha de consulta). Disponible en internet. [www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/.../Tratamiento\\_de\\_agua\\_v1\\_1.pdf](http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/.../Tratamiento_de_agua_v1_1.pdf)
- [9] García San José Ricardo. "Quemadores" (en línea) 3 de noviembre 2001 (fecha de consulta 23 de abril del 2009) disponible en internet. <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/QUEMADORES.PDF>.
- [10] Mariscal ku Mario José. "Apuntes de termodinámica" (en línea). 24 de abril del 2009 (fecha de consulta). disponible en Internet. <http://www.scribd.com/doc/19570551/TERMODINAMICA>
- [11] MEP (en línea). "Guía para el análisis y evaluación de calderas y redes de distribución de vapor". Ministerio de economía y planificación. España disponible en internet. [www.energia.inf.cu/iee-mep/Document/vapor.pdf](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/Document/vapor.pdf)
- [12] Molina, L.A. y G. Molina, "Manual de eficiencia energética térmica en la industria" (en línea), CADEM-EVE, Bilbao 1993. 24 de abril 2009 (fecha de consulta). Disponible en internet. [www.diazdesantos.es/.../molina-](http://www.diazdesantos.es/.../molina-)

igartua-luis-alfonso-manual-de-eficiencia-energetica-termica-en-la-industria-  
L00008605000

- [13] SENER (en línea). “Balance Nacional de Energía en México”. 26 de abril del 2009 (fecha de consulta). Disponible en internet.  
[www.sener.gob.mx/webSener/res/PE\\_y\\_DT/.../balance](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/.../balance)

## **LISTA DE GRAFICAS Y FIGURAS**

Gráfica 1: Evolución histórica de los precios de electricidad CFE.  
Gráfica 2. Ventas de electricidad y capacidad de generación  
Grafica 3. Consumo combustibles  
Grafica 4. Consumo de energía por ramo industrial (peta joule)  
Grafica 5. Consumo final energético por sector y tipo de energético, 2008  
Grafica 6 .Distribución de los Distintos Tipos de Vapor  
Grafica 7. Distribución de la Presión y la Temperatura de Distintos Tipos de Vapor  
Grafica 8. Tiempo de recuperación de capital propuesta 1  
Grafica 9. Tiempo de recuperación de capital propuesta 2

Fig. 1. Tipos de arranques  
Fig.2. sistema de generación de vapor  
Fig.3. Balance de masa y energía en un generador de vapor  
Fig.4. Generador tipo pirotubular  
Fig. 5. Generador tipo acuotubular  
Fig. 6. Generador de vapor pirotubular  
Fig. 7. Generador de vapor tipo acuotubular.  
Fig. 8 Partes integrantes de un generador de vapor  
Fig. 9. Pierna colectora  
Fig. 10. Generador de vapor  
Fig. 11. Turbina de vapor  
Fig. 12. Condensador de vacío de la planta de vapor  
Fig. 13. Sistema del Intercambiador de calor  
Fig. 14. Deareador de la planta de papel

## ANEXO A. DATOS DE EQUIPOS

### GENERADOR DE VAPOR

Marca: Tipo de generador de vapor: Acuotubular con tiro balanceado

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Quemador                | Marca Peabody (Atomización con diferencial de presión) |
| Presión de diseño       | 34.71 kpa  |
| Capacidad Nominal       | 68038.55 kg /h   |
| Ventilador              | Tiro forzado   |
| Combustible             | Combustóleo  |
| Superficie caldera      | 1012 m <sup>2</sup>                                    |
| Temp. agua alimentación | 168 °C   |
| Precalentador           | Si   |
| Capacidad               | 4531 C.C   |
| Temperatura combustible | 30.9 C   |
| Eficiencia              | 83.1%  |

### TURBINA

Marca: THE TERRY STEAM TURBINE CO.

**Fecha adquisición: 26 noviembre 1968**

Tipo: F-12 Bleeder de acción y reacción-contrapresión

Capacidad: 5MW

12 ruedas eje

Utiliza: vapor sobrecalentado a 42 Kg/cm<sup>2</sup> y 400 °C.

Presión de extracción: 2.4 kpa

Extracción: 23667 kg/hr

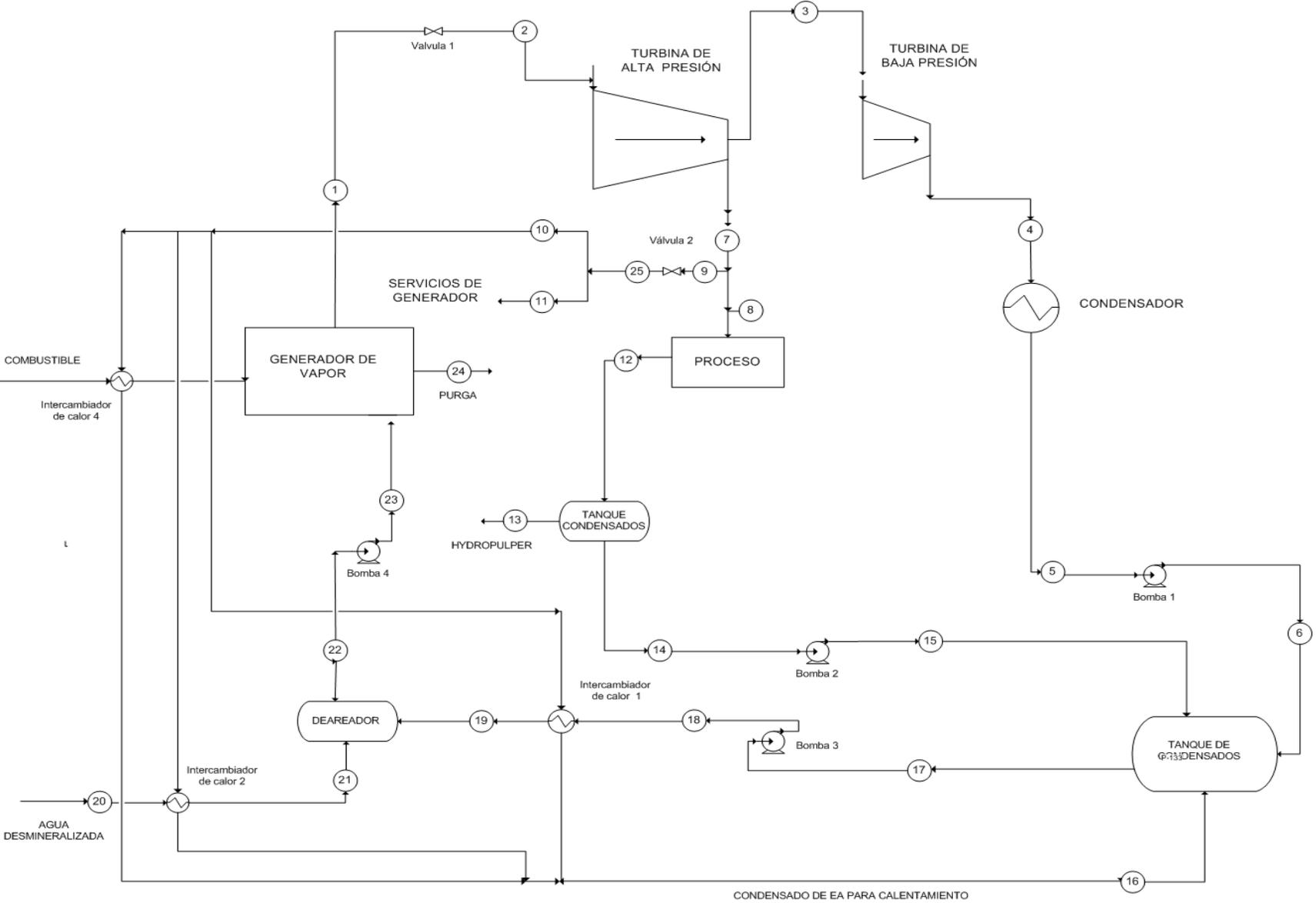
Eficiencia turbina alta presión: 63.5%

Eficiencia turbina baja presión: 61.0%

| Condiciones de operación      | Rating (name plate) cond | Bleed                | Cond               | Bleed                |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| KW                            | 5000                     | 5000                 | 4000               | 4000                 |
| R.P.M<br>TURBINE              | 3600                     | 3600                 | 3000               | 3000                 |
| Steam pressure at inlet psig  | 600                      | 600                  | 600                | 600                  |
| Steam Consumption (lbs/Kw-Hr) | 11.7<br>(Eff: 65.5%)     | 17.6<br>(Eff: 43.4%) | 13.0<br>(Eff: 60%) | 21.0<br>(Eff: 36.4%) |

Nota: No se cuenta con las hojas de datos para los demás equipos

# ANEXO B. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR



| Corrientes | Flujo (kg/s) | Presión (Kpa) | Temperatura (°C) | Entalpia (KJ/s) | Entropía (kj/Kg°C) | Calidad de vapor |
|------------|--------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| 1          | 9.94         | 4200          | 467              | 3367            | 6.97               | 1                |
| 2          | 9.94         | 4136          | 466.6            | 3367            | 6.97               | 1                |
| 3          | 1.19         | 427           | 262.1            | 2988            | 7.39               | 1                |
| 4          | 1.19         | 52            | 125.2            | 2731            | 7.8                | 1                |
| 5          | 1.19         | 52            | 82               | 343.3           | 1.1                | 1                |
| 6          | 1.19         | 190           | 82.02            | 344             | 1.1                | 1                |
| 7          | 8.75         | 427           | 262.1            | 2988            | 7.39               | 1                |
| 8          | 7.26         | 427           | 262.1            | 2988            | 7.39               | 1                |
| 9          | 1.43         | 427           | 262.1            | 2988            | 7.39               | 1                |
| 10         | 1.26         | 340           | 260.7            | 2988            | 7.5                | 1                |
| 11         | 0.22         | 340           | 260.7            | 2988            | 7.5                | 1                |
| 12         | 7.26         | 110           | 102              | 427.5           | 1.33               | 1                |
| 13         | 0.59         | 108.8         | 102              | 427.5           | 1.33               | 1                |
| 14         | 6.67         | 110           | 102              | 427.5           | 1.33               | 1                |
| 15         | 6.67         | 190           | 102              | 427.5           | 1.33               | 1                |
| 16         | 1.26         | 190           | 118.6            | 1012            | 2.82               | 0.23             |
| 17         | 9.13         | 190           | 118.6            | 497.8           | 1.51               | 0                |
| 18         | 9.13         | 340           | 118.6            | 498             | 1.51               | 1                |
| 19         | 9.13         | 340           | 136              | 572             | 1.7                | 1                |
| 20         | 1.16         | 340           | 25               | 105.1           | 0.37               | 1                |
| 21         | 1.16         | 340           | 70               | 293.3           | 0.95               | 1                |
| 22         | 10.3         | 320           | 135.7            | 540.5           | 1.62               | 0                |
| 23         | 10.3         | 4200          | 135              | 546             | 1.62               | 1                |
| 24         | 0.36         | 4200          | 467              | 3367            | 6.97               | 1                |
| 25         | 1.49         | 340           | 260.7            | 2988            | 7.5                | 1                |

## ANEXO C .BALANCE DE MASA Y ENERGIA

En base a los datos recolectados y a la numeración de las corrientes del diagrama [Anexo B] se realizo un balance de masa y energía utilizando los programas TPX y EES(Engineering Equation Solver), así mismo se baso la mayoría de los cálculos en el diagrama de molliere, de la siguiente manera:

Para el siguiente balance se consideraron unidades del sistema internacional (SI) °C para la temperatura, Kpa para la presión, Kg/s para el flujo.

En primera instancia se tiene para el generador de vapor las siguientes

$$m1dot = \frac{35790}{3600} \dots\dots (1)$$

$$T_1 = 467 \dots\dots\dots (2)$$

$$P_1 = 4200 \dots\dots\dots (3)$$

Las condiciones faltantes se calculan de la siguiente manera:

$$h_1 = h(\text{water}, T = T_1, P = P_1) = 3367 \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(4)$$

$$s_1 = s(\text{water}, T = T_1, P = P_1) = 6.965 \text{ KJ/Kg C} \dots\dots\dots(5)$$

$$x_1 = x(\text{water}, h = h_1, P = P_1) = 1 \dots\dots\dots(6)$$

### VALVULA

Se considera lo siguiente:

$$m_1dot = m_2dot \dots\dots\dots(7)$$

Y por tanto:

$$h_1 = h_2 \dots\dots\dots(8)$$

Para el balance de la turbina de vapor, debido a que tiene dos etapas el cálculo de la misma se realizara de la siguiente manera:

### TURBINA ETAPA ALTA PRESIÓN

$$P_2 = 4136 \dots\dots\dots(9)$$

$$T_2 = T(\text{water}, h = h_2, P = P_2) = 466.6 \text{ °C} \dots\dots\dots (10)$$

$$s_2 = s(\text{water}, T = T_2, P = P_2) = 6.972 \text{ KJ/Kg C} \dots\dots\dots(11)$$

En base a la curva de saturación del agua y a las condiciones ideales se tiene que:

$$s_2 = s_{s3} \dots\dots\dots (12)$$

$$x_2 = x(\text{water}, h = h_2, P = P_2) = 1 \dots \dots \dots (13)$$

Debido a que la extracción de vapor de la turbina tiene una presión de

$$P_3 = 427 \dots \dots (14)$$

$$h_{s3} = h(\text{water}, s = s_{s3}, P = P_3) = 2783 \text{ KJ/Kg} \dots \dots \dots (15)$$

Según datos de la hoja de datos de la turbina la eficiencia es de:

$$\eta_{ap} = 0.65 \dots \dots \dots (16)$$

$$Eta_{ap} = \frac{W_{turb,ap,real}}{W_{turb,ap,ideal}} \dots \dots \dots (17)$$

Como es necesario conocer el estado real de las condiciones termodinámicas en la corriente 3 se tiene la ecuación:

$$\eta_{ap} = \frac{m_{2dot}(h_2 - h_3)}{m_{2dot}(h_2 - h_{s,3})} \dots \dots \dots (18)$$

$$T_3 = T(\text{Water}, h = h_3, P = P_3) = 262.1 \text{ C} \dots \dots \dots (19)$$

$$s_3 = s(\text{Water}, h = h_3, P = P_3) = 7.393 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \text{ C} \dots \dots \dots (20)$$

$$x_3 = x(\text{Water}, h = h_3, P = P_3) = 1 \dots \dots \dots (21)$$

Debido a la importancia de conocer la cantidad de trabajo real que se genera en la turbina se tiene:

$$Wt_{turb,ap,real} = m_{2dot} * (h_2 - h_3) = 3772 \text{ KW} \dots \dots \dots (22)$$

$$Wt_{turb,ap,ideal} = m_{2dot} * (h_2 - h_{s,3}) = 5804 \text{ KW} \dots \dots \dots (23)$$

Para el cálculo de la turbina de baja presión se tiene que en condiciones ideales:

$$s_{s,4} = s_3 \dots \dots \dots (24)$$

Así mismo la presión de vacío del condensador es:

$$P_4 = 52 \dots \dots \dots (25)$$

$$h_{s,4} = h(\text{Water}, s = s_{s,4}, P = P_4) = 2581 \text{ KJ/Kg} \dots \dots \dots (26)$$

$$m_{3dot} = \frac{4294.44}{3600} \dots\dots\dots (27)$$

En analogía con la turbina de alta presión es de:

$$\eta_{bp} = 0.63 \dots\dots\dots (28)$$

$$Eta_{bp} = \frac{W_{turb,ap,real}}{W_{turb,ap,ideal}} \dots\dots\dots (29)$$

$$\eta_{bp} = \frac{m_{3dot}(h_3 - h_4)}{m_{3dot}(h_3 - h_{s,4})} \dots\dots\dots (30)$$

Las condiciones termodinámicas son:

$$T_4 = T(\text{Water}, h = h_4, P = P_4) = 125.2 \text{ C} \dots\dots\dots (31)$$

$$s_4 = s(\text{Water}, h = h_4, P = P_4) = 7.803 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (32)$$

$$x_4 = x(\text{Water}, h = h_4, P = P_4) = 1 \dots\dots\dots (33)$$

Y el trabajo para la etapa de baja presión es:

$$W_{turb,bp,real} = m_{3dot} * (h_3 - h_4) = 305.8 \text{ KW} \dots\dots\dots (34)$$

$$W_{turb,bp,ideal} = m_{3dot} * (h_3 - h_{s,4}) = 485.4 \text{ KW} \dots\dots\dots (35)$$

Entonces para el condensador de vacío se tienen las siguientes consideraciones:

$$m_{4dot} = m_{3dot} \dots\dots\dots (36)$$

$$m_{5dot} = m_{4dot} \dots\dots\dots (37)$$

$$P_4 = P_5 \dots\dots\dots (38)$$

$$T_5 = 82 \dots\dots\dots (39)$$

Las condiciones termodinámicas se calculan como sigue:

$$h_5 = h(\text{Water}, T = T_5, P = P_5) = 243.3 \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots (40)$$

$$s_5 = s(\text{Water}, T = T_5, P = P_5) = 1.099 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (41)$$

$$x_5 = x(\text{Water}, h = h_5, P = P_5) = 1 \dots\dots\dots (42)$$

Para obtener el calor del intercambiador se tiene:

$$m_{4dot} * h_4 = m_{5dot} * h_5 + Q_{condensador} \dots\dots\dots (43)$$

El balance para la bomba 1 es el siguiente:

$$P_6 = 190 \dots\dots\dots (44)$$

$$T_6 = T(\text{Water}, h = h_6, P = P_6) = 82.02 \text{ C} \dots\dots\dots (45)$$

$$v_5 = v(\text{Water}, T = T_5, P = P_5) \dots\dots\dots (46)$$

$$W_{bomb1} = v_5 * (P_6 - P_5) * m_{5dot} = 0.1696 \text{ KW} \dots\dots\dots (47)$$

$$h_{s,6} * m_{6dot} = h_5 * m_{5dot} + W_{bomb1} \dots\dots\dots (48)$$

$$\eta_{bbp} = \frac{W_{turb,bbp,ideal}}{W_{turb,bbp,real}} \dots\dots\dots (49)$$

Se considera una eficiencia para todas las bombas del 75% para obtener las condiciones termodinámicas ideales.

$$m_{5dot} = m_{6dot} \dots\dots\dots (50)$$

$$\eta_{bbp} = 0.75 \dots\dots\dots (51)$$

$$\eta_{bbp} = \frac{m_{5dot}(h_{s,6} - h_5)}{m_{3dot}(h_6 - h_5)} \dots\dots\dots (52)$$

$$s_6 = s(\text{Water}, h = h_6, P = P_6) = 1.099 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (53)$$

$$x_6 = x(\text{Water}, h = h_6, P = P_6) = 1 \dots\dots\dots (54)$$

Como se explico anteriormente el vapor de la extracción se utiliza para el proceso de papel y los servicios del generador de vapor:

DIVISOR:

$$m_{2dot} = m_{7dot} + m_{3dot} \dots\dots\dots (55)$$

$$h_{s,7} = h_{s,3} \dots\dots\dots (56)$$

$$h_3 = h_7 \dots\dots\dots (57)$$

$$P_7 = P_3 \dots\dots\dots (58)$$

$$T_7 = T_3 \dots\dots\dots (59)$$

$$P_7 = P_8 \dots\dots\dots (59)$$

$$P_7 = P_9 \dots\dots\dots (60)$$

$$h_7 = h_9 \dots\dots\dots (61)$$

$$h_7 = h_8 \dots\dots\dots (62)$$

$$T_7 = T_8 \dots\dots\dots (63)$$

$$T_8 = T_9 \dots\dots\dots (64)$$

$$s_3 = s_7 \dots\dots\dots (65)$$

$$s_3 = s_8 \dots\dots\dots (66)$$

$$s_3 = s_9 \dots\dots\dots (67)$$

$$x_7 = x(\text{Water}, h = h_7, P = P_7) = 1 \dots\dots (68)$$

$$x_8 = x(\text{Water}, h = h_8, P = P_8) = 1 \dots\dots (69)$$

$$x_9 = x(\text{Water}, h = h_9, P = P_9) = 1 \dots\dots (70)$$

Las condiciones termodinámicas para la válvula son:

$$h_9 = h_{25} \dots\dots\dots (71)$$

$$P_{25} = 340 \dots\dots\dots (72)$$

$$T_{25} = T(\text{Water}, h = h_{25}, P = P_{25}) = 260.7 \text{ C} \dots\dots\dots (73)$$

$$x_{25} = x(\text{Water}, h = h_{25}, P = P_{25}) = 1 \dots\dots\dots (74)$$

El cálculo para el cabezal de los servicios es:

$$m_{10dot} = \frac{1934.64}{3600} \dots\dots\dots (75)$$

$$m_{11dot} = \frac{3435.84}{3600} \dots\dots\dots (76)$$

$$m_{25dot} = m_{11dot} + m_{10dot} \dots\dots\dots (77)$$

$$m_{7dot} = m_{8dot} + m_{9dot} \dots\dots\dots (78)$$

$$P_{10} = P_{25} \dots\dots\dots (79)$$

$$m_{9dot} = m_{25dot} \dots\dots\dots (80)$$

$$P_{11} = P_{25} \dots\dots\dots (81)$$

$$T_{10} = T_{11} \dots\dots\dots (82)$$

$$T_{11} = T(\text{Water}, h = h_{11}, P = P_{11}) = 260.7 \text{ C} \dots\dots\dots (83)$$

$$h_{10} = h_{25} \dots\dots\dots (84)$$

$$h_{11} = h_{25} \dots\dots\dots (85)$$

$$s_{25} = s(\text{Water}, h = h_{25}, P = P_{25}) = 7.497 \text{ KJ/KgC} \dots\dots (86)$$

$$s_{25} = s_{10} \dots\dots\dots (87)$$

$$s_{25} = s_{11} \dots\dots\dots (88)$$

$$x_{10} = x(\text{Water}, h = h_{10}, P = P_{10}) = 1 \dots\dots\dots (89)$$

$$x_{11} = x(\text{Water}, h = h_{11}, P = P_{11}) = 1 \dots\dots\dots (90)$$

El cálculo del balance para el proceso de papel es el siguiente:

$$m_{8dot} = m_{12dot} \dots\dots\dots (91)$$

$$m_{13dot} = \frac{2112.78}{3600} \dots\dots\dots (92)$$

$$m_{12dot} = m_{13dot} + m_{14dot} \dots\dots\dots (93)$$

$$T_{12} = 102 \dots\dots\dots (94)$$

$$P_{12} = 110 \dots\dots\dots (95)$$

$$h_{12} = h(\text{Water}, T = T_{12}, P = P_{12}) = 427.5 \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots (96)$$

$$h_{12} = h_{14} \dots\dots\dots (97)$$

$$h_{12} = h_{13} \dots\dots\dots (98)$$

$$s_{12} = s(\text{Water}, T = T_{12}, P = P_{12}) = 1.329 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (99)$$

$$T_{12} = T_{13} \dots\dots\dots (100)$$

$$x_{12} = x(\text{Water}, h = h_{12}, P = P_{12}) = 1 \dots\dots\dots (101)$$

$$s_{12} = s_{13} \dots\dots\dots (102)$$

$$s_{12} = s_{14} \dots\dots\dots (103)$$

$$P_{13} = P_{sat}(Water, T = T_{13}) = 108.8 \text{ Kpa} \dots\dots\dots (104)$$

Cálculo para la bomba 2:

$$P_{14} = P_{12} \dots\dots\dots (105)$$

$$T_{14} = T_{12} \dots\dots\dots (106)$$

$$v_{14} = v(Water, T = T_{14}, P = P_{14}) \dots\dots\dots (107)$$

$$P_{15} = 190 \dots\dots\dots (108)$$

$$W_{bomb2} = v_{14} * (P_{15} - P_{14}) * m_{14dot} \dots\dots\dots (109)$$

$$m_{14dot} = m_{15dot} \dots\dots\dots (110)$$

$$x_{14} = x(Water, h = h_{14}, P = P_{14}) = 1 \dots\dots\dots (111)$$

$$T_{15} = T(Water, h = h_{15}, P = P_{15}) = 102 \text{ C} \dots\dots\dots (112)$$

$$h_{s,15} * m_{15dot} = h_{14} * m_{14dot} + W_{bomb2} \dots\dots\dots (113)$$

$$\text{Eta}_{bbp} = \frac{W_{turb,bbp,ideal}}{W_{turb,bbp,real}} \dots\dots\dots (114)$$

$$\eta_{bbp2} = \eta_{bbp1} \dots\dots\dots (115)$$

$$\eta_{bbp2} = \frac{m_{14dot}(h_{s,15} - h_{14})}{m_{14dot}(h_{15} - h_{14})} \dots\dots\dots (116)$$

$$s_{15} = s(Water, h = h_{15}, P = P_{15}) = 1.329 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (117)$$

$$x_{15} = x(Water, h = h_{15}, P = P_{15}) = 1 \dots\dots\dots (118)$$

Cálculo para el tanque de condensados:

$$m_{17dot} = m_{6dot} + m_{16dot} + m_{15dot} \dots\dots\dots (119)$$

$$m_{16dot} = m_{11dot} \dots\dots\dots (120)$$

$$s_{16} = s(Water, h = h_{16}, P = P_{16}) = 3.258 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (121)$$

$$P_{17} = P_{15} \dots\dots\dots (122)$$

$$x_{17} = 0 \dots\dots\dots (123)$$

$$h_{17} = h(\text{Water}, x = x_{17}, P = P_{17}) = 497.8 \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots (124)$$

$$s_{17} = s(\text{Water}, x = x_{17}, P = P_{17}) = 1.1513 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (125)$$

$$m_{17dot} * h_{17} = m_{6dot} * h_6 + m_{16dot} * h_{16} + m_{15dot} * h_{15} \dots\dots\dots (126)$$

$$x_{16} = x(\text{Water}, h = h_{16}, P = P_{16}) = 0.3098 \dots\dots\dots (127)$$

$$P_{17} = P_{16} \dots\dots\dots (128)$$

$$T_{16} = T(\text{Water}, h = h_{16}, P = P_{16}) = 118.6 \text{ C} \dots\dots\dots (129)$$

Cálculo para la bomba 3:

$$m_{17dot} = m_{18dot} \dots\dots\dots (130)$$

$$P_{18} = 340 \dots\dots\dots (131)$$

$$T_{17} = T(\text{Water}, h = h_{17}, P = P_{17}) = 118.6 \text{ C} \dots\dots\dots (132)$$

$$v_{17} = v(\text{Water}, T = T_{17}, P = P_{17}) \dots\dots\dots (134)$$

$$W_{bomb3} = v_{17} * (P_{18} - P_{17}) * m_{17dot} \dots\dots\dots (135)$$

$$T_{18} = T(\text{Water}, h = h_{18}, P = P_{18}) = 118.6 \text{ C} \dots\dots\dots (136)$$

$$h_{s,18} * m_{18dot} = h_{17} * m_{17dot} + W_{bomb3} \dots\dots\dots (137)$$

$$\eta_{bbp} = \frac{W_{turb,bbp,ideal}}{W_{turb,bbp,real}} \dots\dots\dots (138)$$

$$\eta_{bb3} = \eta_{bb2} \dots\dots\dots (139)$$

$$\eta_{bb3} = \frac{m_{17dot} * (h_{s18} - h_{17})}{m_{17dot} * (h_{18} - h_{17})} \dots\dots\dots (140)$$

$$s_{18} = s(\text{Water}, h = h_{18}, P = P_{18}) = 1.513 \text{ KJ/KgC} \dots\dots\dots (141)$$

Cálculo para el intercambiador de calor 1

$$m_{18dot} = m_{19dot} \dots\dots\dots (142)$$

$$T_{19} = 136 \dots\dots\dots (143)$$

$$P_{19} = P_{18} \dots\dots\dots (144)$$

$$h_{19} = h(\text{Water}, T = T_{19}, P = P_{19}) = 572.1 \text{ KJ/Kg} \dots\dots (145)$$

$$m_{18dot} * h_{18} = m_{19dot} * h_{19} + Q1_{\text{aguacondensado}} \dots\dots (146)$$

$$x_{18} = x(\text{Water}, h = h_{18}, P = P_{18}) = 1 \dots\dots (147)$$

Cálculo para el intercambiador de calor 2:

$$m_{23dot} = \frac{37112}{3600} \dots\dots (148)$$

$$m_{23dot} = m_{22dot} \dots\dots (149)$$

$$m_{22dot} = m_{21dot} + m_{19dot} \dots\dots (150)$$

$$m_{21dot} = m_{20dot} \dots\dots (151)$$

$$T_{20} = 25 \dots\dots (152)$$

$$P_{20} = P_{25} \dots\dots (153)$$

$$h_{20} = h(\text{Water}, T = T_{20}, P = P_{20}) = 105.1 \text{ KJ/Kg} \dots\dots (154)$$

$$s_{20} = s(\text{Water}, h = h_{20}, P = P_{20}) = 0.3669 \text{ KJ/KgC} \dots\dots (155)$$

$$x_{20} = x(\text{Water}, T = T_{20}, P = P_{20}) = 1 \dots\dots (156)$$

$$T_{21} = 70 \dots\dots (157)$$

$$P_{20} = P_{21} \dots\dots (158)$$

$$h_{21} = h(\text{Water}, T = T_{21}, P = P_{21}) = 293.3 \text{ KJ/Kg} \dots\dots (159)$$

$$s_{21} = s(\text{Water}, T = T_{21}, P = P_{21}) = 0.9548 \text{ KJ/KgC} \dots\dots (160)$$

$$x_{21} = x(\text{Water}, T = T_{21}, P = P_{21}) = 1 \dots\dots (161)$$

$$m_{20dot} * h_{20} = m_{21dot} * h_{21} + Q2_{\text{aguacondensado}} \dots\dots (162)$$

Cálculo para el Deareador

$$s_{19} = s(\text{Water}, h = h_{19}, P = P_{19}) = 1.698 \text{ KJ/KgC} \dots\dots (163)$$

$$x_{19} = x(\text{Water}, h = h_{19}, P = P_{19}) = 1 \dots\dots (164)$$

$$m_{21dot} * h_{21} + m_{19dot} * h_{19} = m_{22dot} * h_{22} \dots\dots (165)$$

$$T_{19} = \text{TEMPERATURE}(\text{Water}, h = h_{19}, P = P_{18}) = 136 \dots \dots \dots (166)$$

Cálculo para la bomba 4:

$$P_{22} = 320 \dots \dots \dots (167)$$

$$x_{22} = 0 \dots \dots \dots (168)$$

$$s_{22} = s(\text{Water}, h = h_{22}, P = P_{22}) = 1.598 \text{ KJ/KgC} \dots \dots \dots (169)$$

$$T_{23} = 135 \dots \dots \dots (170)$$

$$P_{23} = P_1 \dots \dots \dots (171)$$

$$v_{23} = v(\text{Water}, T = T_{23}, P = P_{23}) \dots \dots \dots (172)$$

$$W_{bomba4} = v_{23} * (P_{23} - P_{22}) * m_{23dot} = 42.89 \text{ KW} \dots \dots \dots (173)$$

$$h_{s23} * m_{23dot} = h_{22} * m_{22dot} + W_{bomba4} \dots \dots \dots (174)$$

$$T_{22} = \text{TEMPERATURE}(\text{Water}, x = x_{22}, P = P_{22}) = 135.7 \dots \dots \dots (175)$$

$$\eta_{tbbp} = \frac{W_{turb,bbp,ideal}}{W_{turb,bbp,real}} \dots \dots \dots (176)$$

$$\eta_{bb4} = \eta_{bb3} \dots \dots \dots (177)$$

$$\eta_{bb4} = \frac{m_{22dot} * (h_{s23} - h_{22})}{m_{22dot} * (h_{23} - h_{22})} \dots \dots \dots (178)$$

$$s_{23} = s(\text{Water}, h = h_{23}, P = P_{23}) = 1.602 \text{ KJ/KgC} \dots \dots \dots (179)$$

Para las condiciones del generador de vapor:

$$m_{23dot} = m_{24dot} \dots \dots \dots (180)$$

$$P_{24} = P_1 \dots \dots \dots (181)$$

$$h_{24} = h(\text{Water}, T = T_1, P = P_{24}) = 3367 \text{ KJ/Kg} \dots \dots \dots (182)$$

$$s_{24} = s(\text{Water}, T = T_1, P = P_{24}) = 6.965 \text{ KJ/KgC} \dots \dots \dots (183)$$

$$T_{24} = T(\text{Water}, h = h_{24}, P = P_{24}) = 467 \dots \dots \dots (184)$$

$$x_{23} = x(\text{Water}, h = h_{23}, P = P_{23}) = 1 \dots \dots \dots (185)$$

$$x_{24} = x(\text{Water}, h = h_{24}, P = P_{24}) = 1 \dots \dots \dots (186)$$

Cálculo de la eficiencia para el generador de vapor:

Este se realizo en base al método directo como sigue:

$$m_{combdot} = \frac{3321}{3600} \dots\dots\dots(187)$$

$$PCS = 42100 \dots\dots\dots (188)$$

$$\eta_{cal} = \frac{m_{1dot} * (h_1 - h_{23})}{m_{combdot} * PCS} \dots\dots\dots (189)$$

$$\eta_{cal} = 0.7221 \dots\dots\dots (190)$$

Cálculo de la eficiencia de ciclo:

$$W_{neto} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} - W_{bomb1} - W_{bomb2} - W_{bomb3} - W_{bomb4} = 4033KW \dots\dots\dots (191)$$

$$W_{netoturb} = W_{turb,ap,real} + W_{turb,bp,real} = 4078 K \dots\dots\dots (192)$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto} + m_{8dot} * (h_8 - h_{12})}{m_{combdot} * PCS} \dots\dots\dots(193)$$

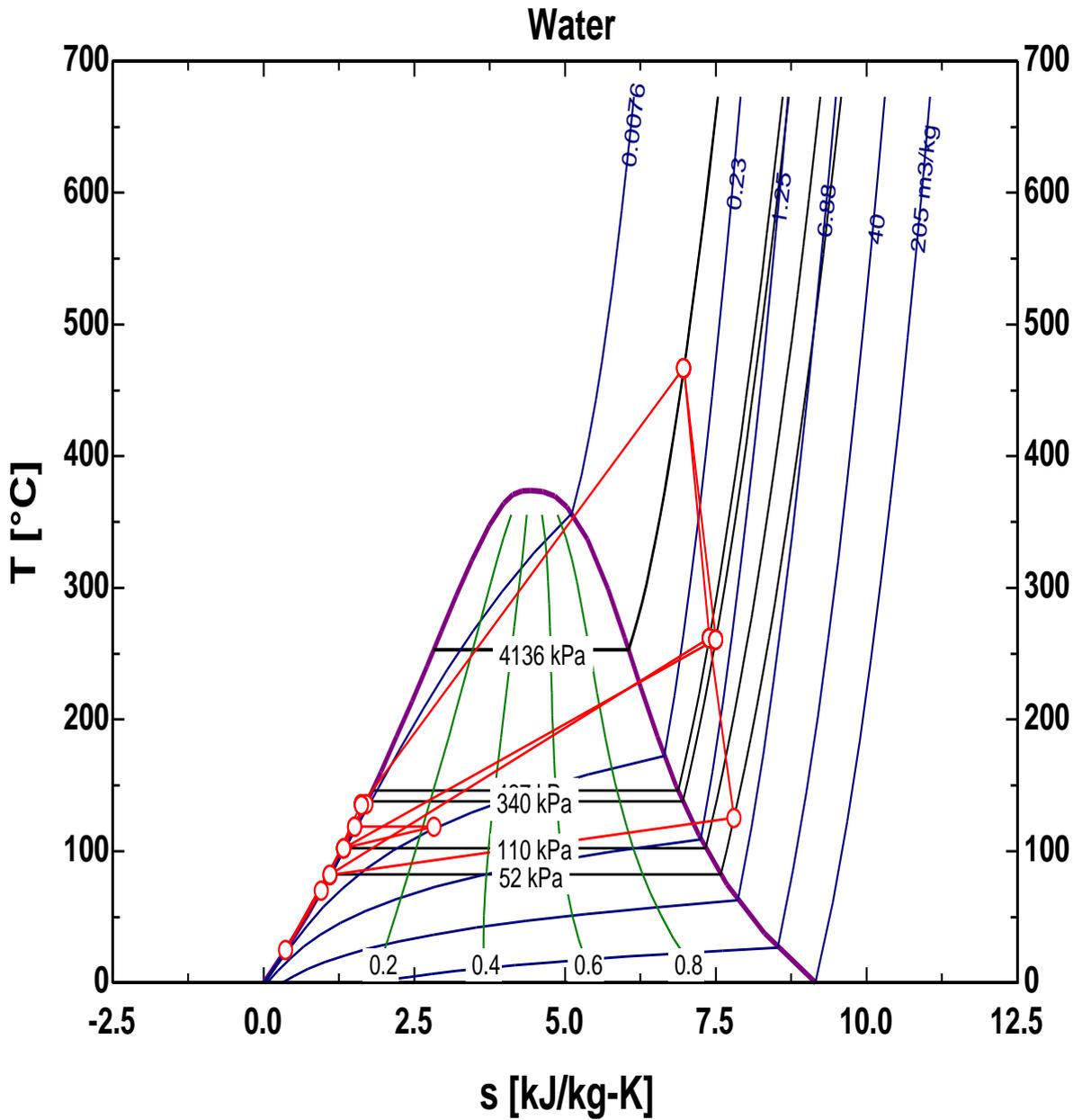
$$\eta_{ciclo} = 0.582 \dots\dots\dots (194)$$

$$\eta_{electrico} = \frac{W_{neto}}{m_{combdot} * PCS} \dots\dots\dots (195)$$

$$\eta_{vapor} = \frac{m_{8dot} * (h_8 - h_{12}) + m_{13dot} * h_{13}}{m_{combdot} * PCS} \dots\dots\dots(196)$$

$$\eta_{vapor} = 0.4848 \dots\dots\dots (197)$$

# ANEXO D. DIAGRAMA DE MOLLIERE T-S PARA EL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR DE LA PLANTA DE PAPEL



## ANEXO E. FINANCIAMIENTO PROPUESTA 1

Banco Banamex  
 Monto \$10,000,000  
 Plazo 36 meses  
 Taza de interés 40%

| PRESUPUESTO |                |                   |                 |              |
|-------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------|
| Periodos    | Valor original | Pago de intereses | Pago de capital | Saldo        |
| 1           | \$10,000,000   | \$ 333,333        | \$ 277,778      | \$ 9,722,222 |
| 2           | \$ 9,722,222   | \$ 324,074        | \$ 277,778      | \$ 9,444,444 |
| 3           | \$ 9,444,444   | \$ 314,815        | \$ 277,778      | \$ 9,166,667 |
| 4           | \$ 9,166,667   | \$ 305,556        | \$ 277,778      | \$ 8,888,889 |
| 5           | \$ 8,888,889   | \$ 296,296        | \$ 277,778      | \$ 8,611,111 |
| 6           | \$ 8,611,111   | \$ 287,037        | \$ 277,778      | \$ 8,333,333 |
| 7           | \$ 8,333,333   | \$ 277,778        | \$ 277,778      | \$ 8,055,556 |
| 8           | \$ 8,055,556   | \$ 268,519        | \$ 277,778      | \$ 7,777,778 |
| 9           | \$ 7,777,778   | \$ 259,259        | \$ 277,778      | \$ 7,500,000 |
| 10          | \$ 7,500,000   | \$ 250,000        | \$ 277,778      | \$ 7,222,222 |
| 11          | \$ 7,222,222   | \$ 240,741        | \$ 277,778      | \$ 6,944,444 |
| 12          | \$ 6,944,444   | \$ 231,481        | \$ 277,778      | \$ 6,666,667 |
| 13          | \$ 6,666,667   | \$ 222,222        | \$ 277,778      | \$ 6,388,889 |
| 14          | \$ 6,388,889   | \$ 212,963        | \$ 277,778      | \$ 6,111,111 |
| 15          | \$ 6,111,111   | \$ 203,704        | \$ 277,778      | \$ 5,833,333 |
| 16          | \$ 5,833,333   | \$ 194,444        | \$ 277,778      | \$ 5,555,556 |
| 17          | \$ 5,555,556   | \$ 185,185        | \$ 277,778      | \$ 5,277,778 |
| 18          | \$ 5,277,778   | \$ 175,926        | \$ 277,778      | \$ 5,000,000 |
| 19          | \$ 5,000,000   | \$ 166,667        | \$ 277,778      | \$ 4,722,222 |
| 20          | \$ 4,722,222   | \$ 157,407        | \$ 277,778      | \$ 4,444,444 |
| 21          | \$ 4,444,444   | \$ 148,148        | \$ 277,778      | \$ 4,166,667 |
| 22          | \$ 4,166,667   | \$ 138,889        | \$ 277,778      | \$ 3,888,889 |
| 23          | \$ 3,888,889   | \$ 129,630        | \$ 277,778      | \$ 3,611,111 |
| 24          | \$ 3,611,111   | \$ 120,370        | \$ 277,778      | \$ 3,333,333 |
| 25          | \$ 3,333,333   | \$ 111,111        | \$ 277,778      | \$ 3,055,556 |
| 26          | \$ 3,055,556   | \$ 101,852        | \$ 277,778      | \$ 2,777,778 |
| 27          | \$ 2,777,778   | \$ 92,593         | \$ 277,778      | \$ 2,500,000 |
| 28          | \$ 2,500,000   | \$ 83,333         | \$ 277,778      | \$ 2,222,222 |
| 29          | \$ 2,222,222   | \$ 74,074         | \$ 277,778      | \$ 1,944,444 |
| 30          | \$ 1,944,444   | \$ 64,815         | \$ 277,778      | \$ 1,666,667 |
| 31          | \$ 1,666,667   | \$ 55,556         | \$ 277,778      | \$ 1,388,889 |
| 32          | \$ 1,388,889   | \$ 46,296         | \$ 277,778      | \$ 1,111,111 |
| 33          | \$ 1,111,111   | \$ 37,037         | \$ 277,778      | \$ 833,333   |
| 34          | \$ 833,333     | \$ 27,778         | \$ 277,778      | \$ 555,556   |
| 35          | \$ 555,556     | \$ 18,519         | \$ 277,778      | \$ 277,778   |
| 36          | \$ 277,778     | \$ 9,259          | \$ 277,778      | \$ 0         |

## ANEXO F. FINANCIAMIENTO PROPUESTA 2

Banco Banamex  
 Monto \$70 000 000  
 Plazo 36 meses  
 Taza de interes 40%

| presupuesto |                  |                  |                 |                  |
|-------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Periodos    | Valor original   | Pago de interese | Pago de capital | Saldo            |
| 1           | \$ 70,000,000.00 | \$ 2,333,333.33  | \$ 1,944,444.44 | \$ 68,055,555.56 |
| 2           | \$ 68,055,555.56 | \$ 2,268,518.52  | \$ 1,944,444.44 | \$ 66,111,111.11 |
| 3           | \$ 66,111,111.11 | \$ 2,203,703.70  | \$ 1,944,444.44 | \$ 64,166,666.67 |
| 4           | \$ 64,166,666.67 | \$ 2,138,888.89  | \$ 1,944,444.44 | \$ 62,222,222.22 |
| 5           | \$ 62,222,222.22 | \$ 2,074,074.07  | \$ 1,944,444.44 | \$ 60,277,777.78 |
| 6           | \$ 60,277,777.78 | \$ 2,009,259.26  | \$ 1,944,444.44 | \$ 58,333,333.33 |
| 7           | \$ 58,333,333.33 | \$ 1,944,444.44  | \$ 1,944,444.44 | \$ 56,388,888.89 |
| 8           | \$ 56,388,888.89 | \$ 1,879,629.63  | \$ 1,944,444.44 | \$ 54,444,444.44 |
| 9           | \$ 54,444,444.44 | \$ 1,814,814.81  | \$ 1,944,444.44 | \$ 52,500,000.00 |
| 10          | \$ 52,500,000.00 | \$ 1,750,000.00  | \$ 1,944,444.44 | \$ 50,555,555.56 |
| 11          | \$ 50,555,555.56 | \$ 1,685,185.19  | \$ 1,944,444.44 | \$ 48,611,111.11 |
| 12          | \$ 48,611,111.11 | \$ 1,620,370.37  | \$ 1,944,444.44 | \$ 46,666,666.67 |
| 13          | \$ 46,666,666.67 | \$ 1,555,555.56  | \$ 1,944,444.44 | \$ 44,722,222.22 |
| 14          | \$ 44,722,222.22 | \$ 1,490,740.74  | \$ 1,944,444.44 | \$ 42,777,777.78 |
| 15          | \$ 42,777,777.78 | \$ 1,425,925.93  | \$ 1,944,444.44 | \$ 40,833,333.33 |
| 16          | \$ 40,833,333.33 | \$ 1,361,111.11  | \$ 1,944,444.44 | \$ 38,888,888.89 |
| 17          | \$ 38,888,888.89 | \$ 1,296,296.30  | \$ 1,944,444.44 | \$ 36,944,444.44 |
| 18          | \$ 36,944,444.44 | \$ 1,231,481.48  | \$ 1,944,444.44 | \$ 35,000,000.00 |
| 19          | \$ 35,000,000.00 | \$ 1,166,666.67  | \$ 1,944,444.44 | \$ 33,055,555.56 |
| 20          | \$ 33,055,555.56 | \$ 1,101,851.85  | \$ 1,944,444.44 | \$ 31,111,111.11 |
| 21          | \$ 31,111,111.11 | \$ 1,037,037.04  | \$ 1,944,444.44 | \$ 29,166,666.67 |
| 22          | \$ 29,166,666.67 | \$ 972,222.22    | \$ 1,944,444.44 | \$ 27,222,222.22 |
| 23          | \$ 27,222,222.22 | \$ 907,407.41    | \$ 1,944,444.44 | \$ 25,277,777.78 |
| 24          | \$ 25,277,777.78 | \$ 842,592.59    | \$ 1,944,444.44 | \$ 23,333,333.33 |
| 25          | \$ 23,333,333.33 | \$ 777,777.78    | \$ 1,944,444.44 | \$ 21,388,888.89 |
| 26          | \$ 21,388,888.89 | \$ 712,969.96    | \$ 1,944,444.44 | \$ 19,444,444.44 |
| 27          | \$ 19,444,444.44 | \$ 648,148.15    | \$ 1,944,444.44 | \$ 17,500,000.00 |
| 28          | \$ 17,500,000.00 | \$ 583,333.33    | \$ 1,944,444.44 | \$ 15,555,555.56 |
| 29          | \$ 15,555,555.56 | \$ 518,518.52    | \$ 1,944,444.44 | \$ 13,611,111.11 |
| 30          | \$ 13,611,111.11 | \$ 453,703.70    | \$ 1,944,444.44 | \$ 11,666,666.67 |
| 31          | \$ 11,666,666.67 | \$ 388,888.89    | \$ 1,944,444.44 | \$ 9,722,222.22  |
| 32          | \$ 9,722,222.22  | \$ 324,074.07    | \$ 1,944,444.44 | \$ 7,777,777.78  |
| 33          | \$ 7,777,777.78  | \$ 259,259.26    | \$ 1,944,444.44 | \$ 5,833,333.33  |
| 34          | \$ 5,833,333.33  | \$ 194,444.44    | \$ 1,944,444.44 | \$ 3,888,888.89  |
| 35          | \$ 3,888,888.89  | \$ 129,629.63    | \$ 1,944,444.44 | \$ 1,944,444.44  |
| 36          | \$ 1,944,444.44  | \$ 64,814.81     | \$ 1,944,444.44 | \$ 0.00          |