

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Química -Farmacia

Departamento de Ingeniería Química



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: "Evaluación del sistema energético y de aguas en la fábrica de papel Pulpa Cuba".

Autora: Mirialis Guevara Trujillo

Tutor: Dr. C. Juan Pedro Hernández Tousef

Ing. Bárbara Claudina Zaldívar Escalante

Curso 2014-2015

PENSAMIENTO.

*El éxito consiste en obtener lo que se desea. La felicidad,
en disfrutar lo que se obtiene.*

Ralph Waldo Emerson

DEDICATORIA

A mis padres por toda su dedicación y sacrificios durante toda mi vida.

A mi tío nene porque aunque no esté presente físicamente añoraba este momento.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo su amor y comprensión, porque sin su apoyo no hubiese sido posible que llegara este momento.

A mis tíos nene y Elida por brindarme su apoyo incondicional en todo lo que me hizo falta.

A mi tutor Juan Pedro por su total entrega y ayuda incondicional en la realización de este trabajo.

A Cristina, Isis, Echerry, Yaquelin y Baby por ayudarme en todo lo que estuvo a su alcance.

A mis compañeros por haber compartido momentos inolvidables durante estos cinco años.

A todos los profesores que durante estos cinco años han colaborado en mi formación como profesional.

A los trabajadores de la papelera Pulpa Cuba por toda la atención brindada durante las visitas a la instalación.

A todas las personas que de una forma u otra me ayudaron en la realización de este trabajo.

A todos, muchas gracias.

Resumen

La fábrica de papel Pulpa Cuba tiene la misión de satisfacer las demandas del mercado nacional de productos de papel y cartón en todos los surtidos, con la mayor calidad y competitividad, garantizando la sustitución de importaciones y aumentando las exportaciones. El objetivo de este trabajo es evaluar el sistema energético y de circulación de agua, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía y del agua, para la reducción de estos consumos y el incremento de los indicadores de eficiencia. Se define un esquema térmico, el cual presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de contrapresión y la instalación de una caldera adicional. La evaluación del sistema de circulación de aguas blancas consistió en la selección y diseño de un sistema de flotación por aire disuelto, basado en la calidad del agua residual, ofertas de Empresas exportadoras y procedimientos analíticos, siendo seleccionado un equipo con fondo tipo V con un flujo de 500 m³/h para el que se identifican las deficiencias operacionales potenciales. Como resultado de la evaluación energética y del sistema de circulación de agua, se proponen cinco proyectos de inversión que contribuyen a elevar la eficiencia en el uso de la energía y del agua, con un VAN de 12 247 506, cuya inversión global se estima que se recupere en 2 años.

Palabras claves: análisis energético, contrapresión, flotación por aire disuelto, turbogenerador

Abstract

Pulpa Cuba paper mill has the mission to satisfy the demands of the national market for paper products and cardboard in all assortments, with the highest quality and competitiveness, ensuring import substitution and increasing exports. The aim of this study is to evaluate the energy and water circulation system, by implementing management systems of energy and water, to reduce this consumption and increasing efficiency indicators. A thermal scheme is defined, which presupposes the total replacement of extraction-condensing turbogenerators by a back pressure turbogenerator and the installation of an additional boiler. The evaluation of white water circulation system consisted in the selection and design of a dissolved air flotation system, based on the quality of wastewater, international companies' offers and analytical procedures, being selected an equipment with V bottom for $500 \text{ m}^3 / \text{h}$ where the potential operational deficiencies are identified. As a result of energy and water circulation system assessment, five investment projects are proposed, that contribute to increased efficiency in the use of energy and water, with a NPV of \$ 12 247 506 and the global investment is estimated that recovers in 2 years.

Keywords: energy analysis, back pressure, dissolved air flotation, turbogenerator

Índice.

PENSAMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
Introducción.....	1
Capítulo I. Análisis bibliográfico.....	3
1.1 Gestión energética.....	3
1.1.1 Gestión energética en fábricas de papel. Distribución de los consumos de energía.....	3
1.1.2 Sistema de Gestión de la Energía (SGE). Norma cubana.....	4
1.1.2.1 Revisión energética.....	4
1.1.2.2 Diseño.....	5
1.2 Elementos de un sistema de gestión de la energía.....	5
1.3 Herramientas para el diagnóstico energético.....	6
1.3.1 Aspectos a tener en cuenta en la realización de un diagnóstico energético.....	6
1.3.2 Clasificación de los diagnósticos energéticos.....	7
1.4 Sistemas de cogeneración.....	9
1.4.1 Selección del tipo de sistema de cogeneración.....	9
1.4.1.1 Proyectos nuevos e instalaciones ya existentes.....	9
1.4.1.2 Dimensionamiento del sistema.....	9
1.4.1.3 Definición del nivel de cogeneración.....	10
1.4.2 Tecnologías de cogeneración.....	10
1.5 Sistemas de gestión de agua en la industria papelera.....	12
1.5.1 Usos del agua.....	12
1.5.2 Fuentes de contaminación del circuito de aguas.....	13
1.5.2.1 Materias primas fibrosas.....	13

1.5.2.2 Aguas de alimentación.	14
1.6 Gestión del agua en el cierre de circuitos de aguas blancas.	15
1.6.1 Consecuencias asociadas al cierre de los circuitos de las aguas	15
1.6.2 Alternativas más frecuentes para el cierre de circuitos de aguas.	16
1.6.3 Tecnologías de cierre de circuitos de agua en la industria papelera.	17
1.6.3.1 Sistema de filtración.....	17
1.6.3.2 Sistema de sedimentación.....	18
1.6.3.3 Sistema de flotación por aire disuelto (FAD).	19
1.6.4 Ventajas y desventajas de la flotación por aire disuelto.....	20
1.6.5 Aplicaciones de la flotación.	20
1.6.6 Parámetros principales en el sistema de FAD.	21
1.6.7 Problemas de operación que pueden presentar el equipo FAD.	21
Conclusiones parciales.	23
Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.....	24
2.1 Caracterización energética de la industria.	24
2.2 Aplicación del diagnóstico energético al sistema actual.	26
2.2.1 Propuesta de un esquema térmico modificado.	27
2.2.2 Balance de agua y fibra.	28
2.2.3 Balance de calor.....	29
Balance en la sección de secado	29
2.3 Evaluación del sistema de aguas.....	34
2.3.1 Caracterización del sistema de aguas blancas.....	34
2.3.2 Aplicaciones de los balances de agua y fibra en la fábrica de papel.	35
2.3.3 Determinación del flujo y consistencia del agua residual y pérdidas de agua y fibra en las condiciones actuales.	37

2.3.4 Modificación al esquema de circulación de aguas blancas.	38
2.3.4.1 Estructura del circuito de aguas.	38
2.3.4.2 Estructura del circuito de aguas propuesto.	39
2.3.4.3 Esquema con el equipo de flotación por aire disuelto FAD.	39
2.3.5 Selección del sistema de tratamiento de las aguas residuales.	39
2.3.6 Diseño del equipo de flotación.	41
2.3.6.1 Cálculo de los parámetros para la evaluación.	41
2.3.7 Identificación de deficiencias operacionales.	44
2.3.8 Sistema de control automático.	46
Conclusiones parciales	47
Capítulo III: Evaluación económica.	48
3.1 Análisis económico del sistema energético.	48
3.2 Análisis económico del sistema terciario de circulación de aguas blancas.	49
3.3 Determinación del costo total de operación.....	51
3.3.1 Estimación del Tiempo de recuperación de la inversión.....	51
3.3.2 Análisis de sensibilidad basado en el costo de adquisición.	52
Conclusiones parciales.	54
Conclusiones.....	55
Recomendaciones.	56
Referencias bibliográficas.	57
Anexos	59

Introducción.

La misión de la UEB Pulpa Cuba es satisfacer las demandas del mercado nacional de productos de papel y cartón en todos los surtidos, con la mayor calidad y competitividad, garantizando una fuerza de trabajo estable, con una capacitación permanente con la visión de estar establecidos en el mercado nacional como el mayor proveedor de productos de papel y cartón, con las instalaciones modernizadas y rehabilitadas para incrementar las capacidades productivas, garantizando la sustitución de importaciones y aumentando las exportaciones.

En la planificación estratégica 2015 - 2019, la UEB Pulpa Cuba, Trinidad, Sancti Spiritus, perteneciente al GEIQ de la Empresa Nacional del Papel tiene entre las proyecciones técnicas de mejoras tecnológicas y desarrollo, a mediano plazo, la rehabilitación y modernización de la caldera 3 con el sistema de tratamiento interno de agua para elevar la capacidad de generación de vapor y disponer de capacidad de secado para enfrentar los incrementos productivos futuros y a largo plazo la reparación capital de la caldera 1 y la reintroducción de la cogeneración eléctrica.

Los productos actuales de la fábrica son Linner 175 y 200, cartoncillo 160 y papel 85.

Entre los objetivos de trabajo para el 2016 se define dirigir la actividad técnico tecnológica, de gestión de la innovación y archivos hacia el desarrollo de nuevos productos y procesos como vía para diversificar las producciones y, paulatinamente, alcanzar en los próximos años la capacidad potencial de producción de la planta; siendo el criterio de medida de su cumplimiento: garantizar la investigación científico técnica a través de convenios de trabajo con la UCLV y con el ICIDCA en función de realizar estudio de formulaciones de materias primas y productos químicos de parte húmeda que combinado con modificaciones en el proceso tecnológico permitan obtener un papel Linner cuya calidad permita sustituir parcialmente las actuales importaciones de este producto por las plantas corrugadoras y la investigación sobre la tecnología, formulación y mejoras tecnológicas a desarrollar para la producción y homologación, a mediano plazo, de papel para cartuchos.

Su política energética consiste en obtener la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía que permita reducir de forma sistemática los indicadores y costos energéticos, como una de las vías para alcanzar la competitividad en las producciones y los servicios, lograr una adecuada diversificación en la utilización de las fuentes de energía y desarrollar una ética de la conservación de la energía, favoreciendo la protección del medio ambiente. Las principales tareas propuestas por la Empresa han estado vinculadas al ahorro de agua, vapor y electricidad.

En el Diagnóstico Técnico elaborado por el ICIDCA a la Planta en Diciembre del 2014, caracterizado de muy profesional y de calidad se manifiesta que es la única fábrica de papel en

Cuba con un sistema de cogeneración el cual se desearía lo tuvieran muchas, sin embargo no funciona y uno de los dos turbogeneradores está en proceso de desmantelamiento lo que es un pecado capital industrialmente hablando, adicionalmente se considera que se pueden apoyar en la asistencia técnica de SURPAPEL para las cuestiones más complejas de estas recomendaciones así como en el Grupo de Papel de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Otro problema que se presenta en la fábrica es el sistema de circulación de agua, que incluye el agua residual y los condensados. En cuanto al primero, no opera el sistema de recuperación de fibra de la máquina de papel y no existe un ciclo terciario de recuperación de agua y fibra para el tratamiento de residuales líquidos, lo que provoca altas pérdidas de recursos materiales y financieros y bajas eficiencias del proceso.

Problema científico:

La UEB Pulpa Cuba presenta un conjunto de factores que incrementan los consumos energéticos y de agua, introduciendo riesgos técnicos, económicos y ambientales en la industria.

Hipótesis:

Es posible la identificación, cuantificación, control, reducción o eliminación de factores que afectan la eficiencia energética de la industria y del uso del agua mediante la evaluación del sistema energético y de aguas, con la consiguiente reducción de las pérdidas de recursos materiales y financieros, los riesgos técnicos y ambientales.

Objetivo General:

Evaluar el sistema termoenergético y de circulación de agua, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía y del agua, para la reducción de estos consumos y el incremento de los indicadores de eficiencia.

Objetivos específicos:

1. Realizar análisis bibliográfico sobre tecnologías de cogeneración y cierre de circuitos de agua en la industria de fabricación de pulpa y papel.
2. Identificar el potencial energético de la industria, mediante el registro y análisis de la información sobre la generación, distribución y uso de la energía,
3. Seleccionar y diseñar una tecnología de cogeneración.
4. Evaluar el sistema de circulación de agua mediante la aplicación de programas computacionales.
5. Realizar análisis de rentabilidad de la inversión en proyectos de inversión propuestos.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

1.1 Gestión energética.

Para realizar una gestión energética eficaz se debe considerar la energía como un recurso más, otorgándole un valor equiparable con el resto de los mismos (materiales, mano de obra, materias primas, etc.). De esta forma, los sistemas de gestión energética (SGE) tratan la energía como un recurso que se debe contabilizar para así alcanzar los objetivos de consumos específicos predeterminados que permitirán: (Nordelo, 2013).

- Controlar la adquisición, almacenamiento y consumo de todo tipo de energía, manteniendo una contabilidad periódica de los mismos y de los indicadores correspondientes.
- Identificar qué áreas de actividad requieren mayor estudio y aquellas donde se malgasta energía.
- Minimizar los costos de energía.
- Proteger al medio ambiente en materia de emisiones y residuos industriales.

La política sobre el uso racional de la energía en las fábricas químicas está dirigida:

- Obtener la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía que permita reducir de forma sistemática los indicadores y costos energéticos, como una de las vías para alcanzar la competitividad en las producciones y los servicios.
- Lograr una adecuada diversificación en la utilización de las fuentes de energía.

La gestión energética puede ser concebida como un esfuerzo organizado y estructurado, para conseguir la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía. Es decir, lograr un uso más racional de la energía, que permita reducir el consumo de la misma, sin disminuir el nivel de vida.

1.1.1 Gestión energética en fábricas de papel. Distribución de los consumos de energía.

El sector papelerero es considerado uno de los siete sectores industriales con un mayor consumo energético. La fabricación de papel requiere de un elevado consumo eléctrico y también térmico. En función del origen de esta energía, las fábricas papeleras son responsables directa o indirectamente de la producción de emisiones de CO₂ y de forma minoritaria, de otros gases de efecto invernadero.

Para proceder a una reducción de las emisiones, en primer lugar hay que saber cuánto se emite (factores CO₂), cuáles son los focos mayoritarios de emisión y en qué puntos del proceso papelerero recae mayor consumo energético o mayores emisiones (Xavier, 2008)

En cuanto al consumo de vapor no siempre se requiere, y sólo determinadas etapas lo utilizan. Las necesidades energéticas están estrechamente vinculadas con el tipo de producto, el volumen de producción y el tamaño de los centros productivos, por razones intrínsecas a los procesos de fabricación, que están fuertemente determinados energéticamente por factores de escala.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

La industria papelera consume energía en una doble vertiente: electricidad para mover la maquinaria y vapor para secar la pasta y el papel. Las plantas de producción de energía dentro del sector comprenden las siguientes instalaciones:

Calderas de recuperación de licor negro: El licor negro es un biocombustible que se genera en la producción de pasta química y consiste en una mezcla de productos químicos inorgánicos utilizados en la cocción de la madera, lignina y otros compuestos orgánicos. Se quema en estas calderas para producir vapor de agua, que se cogenera para utilizarlo en el proceso de producción, y para generar además electricidad, así como para recuperar reactivos químicos que se reutilizarán nuevamente.

Calderas de combustión de cortezas: En el proceso de tratamiento de la madera para la elaboración de la celulosa, las cortezas, astillas y fangos con contenidos fibrosos, que son biomasa renovable, se aprovechan energéticamente en estas calderas.

Centrales de cogeneración: La industria de la pasta y papel, al ser intensiva en la demanda de electricidad y energía térmica en forma de vapor, ha integrado masivamente las tecnologías de cogeneración en sus procesos productivos (ACOGEN, 2013)

Calderas de generación de vapor: En estas calderas, empleando combustibles fósiles, se genera el vapor de agua que se utiliza en los procesos de secado de la pasta y el papel. Donde se dispone de plantas de cogeneración, estas calderas se utilizan solo como apoyo.

1.1.2 Sistema de Gestión de la Energía (SGE). Norma cubana.

La Norma Cubana (50001, 2011) define los siguientes aspectos principales: objeto y campo de aplicación, referencias normativas, términos y definiciones y los requisitos del sistema de gestión de la energía; este último aspecto incluye: requisitos generales, responsabilidad de la dirección, política energética, planificación energética, implementación y operación, verificación y revisión por la dirección. En la planificación energética se desarrolla la revisión energética y en la implementación y operación, el diseño.

1.1.2.1 Revisión energética

Según la norma, la organización debe desarrollar, registrar y mantener una revisión energética. La metodología y el criterio utilizados para desarrollar la revisión energética deben estar documentados. Para desarrollar la revisión energética, la organización debe:

1. Analizar el uso y el consumo de la energía basándose en mediciones y otro tipo de datos, es decir:
 - Identificar las fuentes de energía actuales.
 - Evaluar el uso y consumo pasados y presentes de la energía.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

2. Basándose en el análisis del uso y el consumo de la energía, identificar las áreas de uso significativo de la energía, es decir:
 - Identificar las instalaciones, equipamiento, sistemas, procesos y personal que trabaja para o en nombre de la organización que afecten significativamente al uso y al consumo de la energía.
 - Identificar otras variables pertinentes que afectan a los usos significativos de la energía.
 - Determinar el desempeño energético actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía.
 - Estimar el uso y consumo futuros de energía.
3. Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

1.1.2.2 Diseño

La organización debe considerar las oportunidades de mejora del desempeño energético y del control operacional en el diseño de instalaciones nuevas, modificadas o renovadas, de equipos, de sistemas y de procesos que pueden tener un impacto significativo en su desempeño energético.

Los resultados de la evaluación del desempeño energético deben incorporarse, cuando sea apropiado, al diseño, a la especificación y a las actividades de compras de los proyectos pertinentes. Los resultados de la actividad de diseño deben registrarse.

El concepto de desempeño energético incluye el uso de la energía, la eficiencia energética y el consumo energético. De esta manera, la organización puede elegir entre un amplio rango de actividades de desempeño energético. Por ejemplo, la organización puede reducir su demanda máxima, utilizar el excedente de energía o la energía desperdiciada o mejorar las operaciones de sus sistemas, sus procesos o su equipamiento. NC ISO (50001, 2011)

1.2 Elementos de un sistema de gestión de la energía.

La política energética es el impulsor de la implementación y la mejora del SGE y del desempeño energético de la organización dentro de su alcance y límites definidos. La política puede ser una breve declaración que los miembros de la organización, pueden comprender fácilmente y aplicar en sus actividades laborales. La difusión de la política energética puede utilizarse como elemento propulsor para gestionar el comportamiento de la organización (Borroto, 2006)

El objetivo de un sistema de gestión de la energía es mejorar la eficiencia energética y no repetir comportamientos ineficientes anteriores. La consecución de este objetivo debería conducir a la reducción de los costos y de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la gestión sistemática de la energía (COAKLED, 2010)

El primer paso de la revisión energética consiste en identificar las fuentes de energía utilizadas por la organización dentro de los límites y alcances definidos para el SGE. Las fuentes de energía pueden ser variadas, incluyendo combustibles, electricidad, vapor, calor, aire comprimido, entre otros. Es posible que existan fuentes de energía, tales como el aire comprimido, vapor y calor, que no sean consideradas como tal por la organización, debido a que generalmente son generadas por la misma empresa. Sin embargo, es posible hacer gestión energética importante sobre estas fuentes de energía secundaria.

Además, el uso eficiente de este tipo de energía puede dejar capacidad para reemplazar otro tipo de consumo de energía.

1.3 Herramientas para el diagnóstico energético.

1.3.1 Aspectos a tener en cuenta en la realización de un diagnóstico energético.

El diagnóstico energético tiene por objetivo identificar oportunidades de uso eficiente de la energía, se emplean distintas técnicas para evaluar grado de eficiencia con que se produce, transforma y usa la energía. Constituye la herramienta básica para saber cuánto, cómo, dónde y por qué se consume la energía dentro de la empresa, para establecer el grado de eficiencia en su utilización, para identificar los principales potenciales de ahorro energético y económico, y para definir los posibles proyectos de mejora de la eficiencia energética (Borroto, 2006), y establecer una línea base contra la cual se deberán evaluar los beneficios obtenidos como resultado de la implementación de las mejoras y recomendaciones asociadas con las oportunidades identificadas. Existen diagnósticos de diferente profundidad que están en función a la complejidad de la planta papelera y a la disponibilidad de recursos para su ejecución como se muestra en el (Anexo 1).

Según (Espinosa, 2014) el diagnóstico energético consiste en el estudio de todas las formas y fuentes de energía, por medio de un análisis crítico en una instalación consumidora de energía, con el objetivo de establecer el punto de partida para la implementación y control de un programa de ahorro de energía, ya que se determina dónde y cómo es utilizada esta, además de especificar cuánta es desperdiciada.

De acuerdo con (CNEE, 2010) los objetivos principales de un diagnóstico energético son:

- Establecer metas de ahorro de energía.
- Diseñar y aplicar sistemas integrales para el ahorro de energía.
- Evaluar técnica y económicamente las medidas de ahorro de energía.
- Disminuir el consumo de energía, sin afectar negativamente los niveles y condiciones de producción.

Con la realización del diagnóstico se logra la optimización del uso y administración de energía. Se conoce cómo y dónde se utiliza la energía eléctrica con el fin de establecer el gasto innecesario de la misma y se elimina del despilfarro de energía (Egranconel, 2006).

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

Existe diferencia en algunos autores en el nombramiento de las actividades que componen un sistema de gestión energética, (CNEE, 2010), (Borroto, 2006) lo nombran diagnóstico energético, según la profundidad de la metodología a utilizar se denominan: diagnóstico de primer grado, de segundo grado, de tercer grado, y cuarto grado. (Egranconel, 2006), (Bora, 2008) lo califica como auditoría energética, según su profundidad puede ser de tipo 1, tipo 2 y tipo 3.

Según (Bora, 2008) las auditorías energéticas pueden considerarse como el primer paso para conocer el consumo de energía. Normalmente es uno de los primeros pasos en un programa de dirección de la energía. Muestra que la energía puede ser usada eficazmente y resalta oportunidades para disminuir los costos. También pueden mostrar maneras de mejorar la productividad.

Semejante auditoría se lleva a cabo junto con un programa de eficacia de energía global y teniendo presente los eslabones fundamentales entre el uso de energía la contaminación medioambiental.

La necesidad de una auditoría energética inicial no es muy sofisticada o exacta. El objetivo debe ser obtener un uso de energía de cuadro global para poder preparar un equilibrio de energía aproximado por la organización.

1.3.2 Clasificación de los diagnósticos energéticos

El diagnóstico de nivel uno o básico (DEN 1) se lleva a cabo mediante un examen visual del proceso industrial o instalación de que se trate, reconociendo y revisando el diseño original de los equipos consumidores de energía, para dar una idea de los potenciales de ahorro de energía que se pueden lograr por modificación en los hábitos de operación, corrección de desperdicios o por la incorporación de tecnologías eficientes.

De este diagnóstico se pueden obtener buenas recomendaciones a nivel general. Por ejemplo, fugas de energía, mala operación de los equipos y/o instrumentos, equipos que pueden reemplazarse por otros más eficientes, como motores, compresores, aires acondicionados, luces, etc.

Los potenciales de ahorro de energía son meramente estimados y descansan en muchas suposiciones por lo que los ahorros pueden o no lograrse, ya que en este nivel no se realizan mediciones y apenas se obtiene un conocimiento muy somero de las instalaciones energéticas.

Su principal ventaja es dar una idea general sobre si existe o no posibilidad de ahorro energético. Este nivel tiene un costo económico, que es el de menor respecto a los de niveles superiores (Hernandez, 2010, Espinosa, 2014) (Espinosa, 2014).

Cabe recalcar que en este tipo de estudio no se pretende efectuar un análisis exhaustivo del uso de la energía, sino precisar medidas de aplicación inmediata (CNEE, 2010).

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

Un diagnóstico energético de primer nivel puede realizarse en un término aproximado de tres a seis semanas, dependiendo de las características de la instalación y del alcance del diagnóstico y los recursos disponibles, incluyendo una visita inicial (un día), el trabajo de campo (una a dos semanas), el trabajo de gabinete (dos a tres semanas) y la elaboración y presentación del informe final (una o dos semanas) (Borroto, 2006).

El nivel dos (DEN 2) o fundamental: proporciona información sobre el consumo de energía tanto eléctrica como térmica por áreas funcionales o procesos específicos de operación, es decir se detecta los subsistemas de mayor desperdicio energético. Este nivel provee datos acerca del ahorro de energía y en consecuencia de reducción de costos, como consecuencia de su realización se obtiene una cartera de proyectos de aplicación, logrando de esta forma dirigir el camino de las metas para ahorro energético, (Espinosa, 2014), además de incluir aspectos de mantenimiento y control automático relacionados con el ahorro y uso eficiente de la energía (Borroto, 2006). La información obtenida directamente en la operación se compara con la de diseño, para obtener las variaciones de eficiencia (Espinosa, 2014).

Es el más útil para conocer los potenciales de ahorro de energía de una instalación. Estos se cualifican y se cuantifican. Se analiza entre el 75 y 80 % de los consumidores energéticos, dando prioridad a los de potencia superior y mayor tiempo de utilización.

En la aplicación del diagnóstico, a este nivel, será importante contar con los equipos e instrumentos necesarios para la evaluación de parámetros energéticos que conlleven a determinar los potenciales de ahorro de energía (Espinosa, 2014).

El balance de materiales y energía, los planos unificares actualizados, así como la disposición de los índices energéticos reales y de diseño complementan el diagnóstico, ya que permiten establecer claramente la distribución de la energía en las instalaciones, las pérdidas y desperdicios globales y así se determina la eficiencia con la que se utiliza la energía (Mckeen, 2003).

Finalmente, se debe evaluar, desde el punto de vista económico, las medidas que se recomiendan llevar a cabo, tomando en consideración que se debe pagar con los ahorros que se tengan y en ningún momento deben poner en riesgo la liquidez de la empresa (CNEE, 2010).

Diagnóstico de tercer nivel (DEN 3): proporciona información precisa y comprensible, de todos y cada uno de los puntos relevantes del diagrama del proceso industrial o cualquier instalación a evaluar, así como las pérdidas de energía de cada uno de los equipos involucrados. Este nivel está caracterizado por instrumentación extensiva, por la adquisición de datos y por los estudios de ingeniería involucrada (Espinosa, 2014), debe realizarse con la participación de especialistas de cada área, auxiliados por el personal de ingeniería, se aclara que muchas de las acciones propuestas para lograr ahorro de energía son producto de reingeniería de los procesos.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

Las recomendaciones derivadas de estos diagnósticos generalmente son de aplicación a mediano plazo e implican modificaciones a los equipos y procesos, e incluso de las tecnologías utilizadas. Debido a que las inversiones de estos diagnósticos son altas, la evaluación económica debe ser rigurosa en cuanto al período de recuperación de la inversión.

Diagnóstico de cuarto nivel (DEN 4): en estos diagnósticos es común el uso de técnicas de simulación de procesos, con la finalidad de estudiar diferentes esquemas de interrelación de equipos y procesos. El sistema de simulación en computadora permite el control periódico de todos los indicadores y su registro con facilidad sin necesidad de contratar un especialista. Permite la evaluación de efectos al cambio en las condiciones de operación, producciones, condiciones ambientales o de materia prima que modifican los consumos específicos de energía.

Las recomendaciones derivadas de este diagnóstico se dividen: de corto, mediano y largo plazo, algunas implican modificaciones de tipo tecnológico e inversiones importantes.

1.4 Sistemas de cogeneración.

1.4.1 Selección del tipo de sistema de cogeneración.

Se ha podido establecer el potencial de cogeneración que la instalación presenta, atendiendo a los valores de las capacidades térmica y eléctrica, considerando las posibilidades de ahorro de energía que existen, las condiciones que deben mantener las corrientes energéticas y otros factores (CONAE, 1995).

1.4.1.1 Proyectos nuevos e instalaciones ya existentes.

En el caso de proyectos nuevos en los que la cogeneración es una parte del proyecto general, la selección del esquema aplicable no se ve impactada por restricciones del espacio.

Su programación contempla la satisfacción de las necesidades de instalación y del entorno que le rodea, en función de la posible exportación de energía hacia otros usuarios o al servicio público, atendiendo a la infraestructura que exista o que se tenga proyectado instalar, involucrando de manera importante a varias entidades.

Este caso difiere del anterior en que, la mayoría de las veces, el sistema de cogeneración implica una adaptación y, por lo tanto, además de los resultados del análisis termodinámico, es necesario considerar la disponibilidad de espacio, equipo existente que podrá o no aprovecharse y la capacidad de la red pública externa para exportar los excedentes de energía (CONAE, 1995).

1.4.1.2 Dimensionamiento del sistema.

La comparación de los perfiles de demanda térmica y eléctrica permite visualizar la simultaneidad con que ocurren los picos y valles de cada una de ellas; adicionalmente las gráficas de la relación Q/E podrán

mostrar un comportamiento uniforme o con variaciones; el primero conduce a un dimensionamiento de un sistema simple y el segundo a un sistema que posea flexibilidad de modificar la relación Q/E.

1.4.1.3 Definición del nivel de cogeneración.

En el escenario actual, dada la problemática del sector eléctrico, los beneficios de los sistemas de cogeneración no solo se manifiestan hacia el usuario directo en un menor costo energético, sino también en la posibilidad de la venta de excedentes eléctricos a la red pública. Aunque en general la mayoría los empresarios muestren interés por satisfacer sus necesidades de energía de proceso, existe la alternativa de convertirse además en productor de electricidad, que puede resultar muy atractiva, atendiendo inicialmente a la satisfacción total de sus necesidades térmicas y, en función de esto, ampliar su capacidad de generación eléctrica. (CONAE, 2011)

Existen entonces dos niveles de cogeneración por tratar:

1. Satisfacción térmica al 100% y compra de electricidad.

Este es incapaz de generar toda la electricidad requerida en ocasiones, debido a fuertes variaciones en la relación Q/E, causadas por la variación de la demanda eléctrica. La flexibilidad que se requiere complicaría considerablemente el sistema y, dada la duración de los picos de demanda eléctrica, no se justifica la inversión en incrementar así su capacidad eléctrica.

2. Satisfacción térmica al 100% con excedentes eléctricos.

En el caso anterior, el aumento de la capacidad de generación eléctrica, en caso de que resulte técnica y económicamente viable, como es el caso de varias instalaciones actuales, daría como resultado poder exportar electricidad a la red pública por largos períodos.

1.4.2 Tecnologías de cogeneración.

La cogeneración es una tecnología que encaja idóneamente en los procesos papeleros. Atendiendo a las diferentes tecnologías de cogeneración utilizadas en el sector papelerero, es mayoritaria la aplicación de turbinas de gas, bien en ciclo simple o en ciclo combinado acompañadas de turbinas de vapor, si bien también un importante número de instalaciones utilizan motores de combustión interna, reflejo de la amplia variedad de necesidades, procesos y operaciones de las distintas empresas que lo componen. De cinco tipos de tecnologías de cogeneración, el cuarto lugar lo ocupa la turbina a contrapresión y el quinto las turbinas de condensación (ACOGEN, 2013).

Aún cuando la cogeneración debe ser evaluada como parte de un plan de administración de energía su principal prerequisite es que la planta presente una demanda significativa y concurrente de calor y energía eléctrica, una vez identificado este escenario puede explorarse sistemas de cogeneración aplicables bajo las siguientes circunstancias:

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

- Desarrollo de nuevas instalaciones.
- Ampliaciones importantes a instalaciones existentes con incremento de demandas de calor y/o de producción de energía remanente de proceso.
- Reemplazo de equipo viejo de proceso o de generación de energía eléctrica y oportunidad de mejorar la eficiencia del sistema de suministro de energía (Campos, 2015).

La turbina de no condensación (Contrapresión) opera con un escape igual o en exceso a la presión atmosférica; el vapor de escape se usa para cargas de bajas de vapor para proceso; disponible en pequeños tamaños y consumen grandes cantidades de vapor por MW de salida (bajas eficiencias); producen menor trabajo útil que la turbina de condensación, pero como el vapor pasa a proceso, la baja eficiencia de la generación (15 – 35 %) no es una preocupación; son económicamente efectivas con válvulas paralelas de reducción de presión, garantizando un uso eficiente de los requerimientos de baja presión y normalmente tienen menor costo que las turbinas de condensación. ((Steam), 2015)

El uso de una turbina de contrapresión (o de reducción de presión) en una aplicación de cogeneración, es la forma más eficiente de generación de electricidad. Esta eficiencia se deriva del hecho de que el vapor de proceso se usa doble; primero para generar potencia y segundo para satisfacer las cargas del proceso. Las eficiencias de combustibles a electricidad tienen un rango típicamente de 75 a 90 %, mientras que las redes eléctricas en los E. U. logran solo 33 %.

Esta diferencia de eficiencia lleva a ahorros sustanciales para los cogeneradores, que pueden producir electricidad de 1,5 a 2,0 centavos por kWh, comparado con los valores de los servicios que son de 4 a 10 centavos por kWh. Esto significa también que un cogenerador de contrapresión puede producir electricidad con 1/3 del combustible requerido por la red lo que significa menores emisiones de cada contaminante incluyendo el CO₂. (Word, 2015)

Para proceder a una reducción de las emisiones, en primer lugar hay que saber cuánto se emite (factores CO₂), cuáles son los focos mayoritarios de emisión y en qué puntos del proceso papelerero recae mayor consumo energético o mayores emisiones (Xavier, 2008).

En cuanto al consumo de vapor no siempre se requiere, y sólo determinadas etapas lo utilizan. Las necesidades energéticas están estrechamente vinculadas con el tipo de producto, el volumen de producción y el tamaño de los centros productivos, por razones intrínsecas a los procesos de fabricación, que están fuertemente determinados energéticamente por factores de escala.

La industria papelera consume energía en una doble vertiente: electricidad para mover la maquinaria y vapor para secar la pasta y el papel. Las plantas de producción de energía dentro del sector comprenden las siguientes instalaciones:

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

Calderas de recuperación de licor negro: El licor negro es un biocombustible que se genera en la producción de pasta química y consiste en una mezcla de productos químicos inorgánicos utilizados en la cocción de la madera, lignina y otros compuestos orgánicos. Se quema en estas calderas para producir vapor de agua, que se cogenera para utilizarlo en el proceso de producción, y para generar además electricidad, así como para recuperar reactivos químicos que se reutilizarán nuevamente.

Calderas de combustión de cortezas: En el proceso de tratamiento de la madera para la elaboración de la celulosa, las cortezas, astillas y fangos con contenidos fibrosos, que son biomasa renovable, se aprovechan energéticamente en estas calderas.

Centrales de cogeneración: La industria de la pasta y papel, al ser intensiva en la demanda de electricidad y energía térmica en forma de vapor, ha integrado masivamente las tecnologías de cogeneración en sus procesos productivos.

Calderas de generación de vapor: En estas calderas, empleando combustibles fósiles, se genera el vapor de agua que se utiliza en los procesos de secado de la pasta y el papel. Donde se dispone de plantas de cogeneración, estas calderas se utilizan solo como apoyo (ACOGEN, 2013)

1.5 Sistemas de gestión de agua en la industria papelera.

1.5.1 Usos del agua

En la fabricación de papel y cartón, el principal empleo del agua lo constituye su uso como medio de dispersión y transporte de las materias primas fibrosas y de los aditivos, a través de las etapas del proceso de producción, que van desde el pulpeo hasta la formación. El agua se utiliza también como fluido de intercambio de calor, para el sellado de los sistemas a vacío, para la producción de vapor, como agente lubricante, etc. El volumen de agua consumida depende de numerosos factores (lo cual explica la disparidad de los datos encontrados), entre los que cabe destacar tres principales: el tipo de fibra utilizada como materia prima, el producto fabricado y la tecnología del proceso de producción.

Con respecto al uso del agua en la industria de la celulosa y papel, este se puede dividir en: agua para el proceso (lavado de materia prima, transporte de sólidos), agua para enfriamiento (atemperamiento, intercambio de calor, vapor), agua para usos sanitarios u otros (servicio del personal que labora dentro de las fábricas y riego de las áreas verdes).

El consumo promedio del agua es de 54 m³ /tonelada. (Para la industria del papel oscila entre 7,5 y 37,8 m³ /tonelada y para la pulpa y papel entre 15 y 226 m³ /tonelada). Las industrias integradas presentan un ahorro en el consumo del agua. (C. Negro, 1995).

En el anexo 2 se resumen los principales usos del agua en esta industria.

1.5.2 Fuentes de contaminación del circuito de aguas.

De acuerdo con (C. Negro, 1995) las fuentes de contaminación de los circuitos de aguas en la fabricación de papel y cartón son: las materias primas fibrosas, los aditivos y el agua de alimentación. A continuación se estudiará la importancia de las mismas, así como los efectos más importantes a ser considerados en cada caso en el estudio de la contaminación producida.

1.5.2.1 Materias primas fibrosas.

Las materias primas fibrosas constituyen la fuente de contaminación principal de las aguas blancas, si bien la naturaleza e importancia de la misma varía considerablemente en función del tipo de fibra utilizada en el proceso de producción. Los tres parámetros más importantes son: el contenido de partículas de finos, el contenido de materia orgánica soluble y la concentración de microorganismos. La importancia de estos parámetros en función del tipo de fibra utilizada se muestra en el anexo 3.

Según (Salome, 2004) aunque la naturaleza química de las partículas incorporadas a las aguas de proceso por la fibra virgen y secundaria es distinta, orgánica para las primeras e inorgánica para las segundas, los problemas asociados con la incorporación de estos contaminantes pueden solucionarse en ambos casos mediante cambios en el tratamiento de las fibras o en el uso de aditivos que mejoren la retención y el drenaje.

En la fibra virgen, la principal fuente de contaminación orgánica la constituyen las materias extractivas, como, por ejemplo, los ácidos resínicos y las ceras, así como las ligninas y sus derivados. Sin embargo, también pueden encontrarse contaminantes de residuos químicos utilizados en las etapas previas de pulpeo, lavado y blanqueo, que originan compuestos contaminantes específicos, como los organoclorados, las dioxinas, los diparabenzofenilos, etc.

Las pastas de fibra secundarias presentan una mayor variación en su contenido en materia orgánica soluble debido a los aditivos utilizados en el proceso de fabricación del papel o del cartón previo. Los problemas asociados con los depósitos de materias resinosas en fibras vírgenes son reemplazados, en este caso, por un gran número de problemas asociados a los depósitos potenciales de stickies (sustancias pegajosas) (C. Negro, 1995).

Las fuentes principales de estos contaminantes potenciales son adhesivos de contacto (polímeros de estireno-butadieno, acrilatos de vinilo, etc.) y adhesivos de fusión (por ejemplo, el acetato de vinilo). Otros contaminantes son los aglutinantes que entran a formar parte de las tintas modernas, como por ejemplo, las resinas alquílicas en los pigmentos de impresión láser.

Además, todos los papeles estucados contienen aglutinantes en su composición (polímeros de estireno-butadieno, acetato de polivinilo, etc.). Otra fuente de contaminación importante de las fibras secundarias

es la elevada concentración de microorganismos como consecuencia de la suciedad y la humedad del medio en que se almacena el papelote antes de su reutilización. Por otra parte, los almidones presentes en el papel reciclado son un excelente medio de crecimiento para los microorganismos presentes en el sistema de aguas de proceso, y, por tanto, favorecen el desarrollo de microorganismos y, los problemas asociados a los mismos.

1.5.2.2 Aguas de alimentación.

Con el agua de alimentación se puede introducir en el proceso una gran variedad de contaminantes, que pueden interferir en el mismo. La naturaleza y concentración de los contaminantes está generalmente relacionada con el origen del agua utilizada. Se pueden establecer dos grandes grupos de recursos: aguas superficiales (lagos, ríos y pantanos) y aguas subterráneas (pozos). Los valores típicos de utilización de recursos hídricos en la industria papelera a nivel europeo se encuentran entre 65-85 % de aguas superficiales y 15-35 % de aguas subterráneas. (Salome, 2004)

Las aguas superficiales contienen diferentes contaminantes de naturaleza inorgánica, orgánica y biológica, cuya concentración varía en función de la época del año, de las características del cauce, etc. Las aguas subterráneas, sin embargo, presentan una calidad estable a lo largo del año y se caracterizan por la ausencia o baja concentración de materia orgánica y por un mayor contenido de materia inorgánica disuelta.

Los parámetros fundamentales que se consideran en las aguas de alimentación de las fábricas de papel y cartón son:

- pH: El pH del agua de alimentación tiene una mayor influencia en los sistemas de producción que operan en condiciones de pH neutras o alcalinas que en los que operan a pH ácido.
- Iones inorgánicos: Si bien la concentración total de estos iones, medida habitualmente a través de la conductividad, afecta a la química del proceso, en los intervalos normales de conductividad el factor más importante es la naturaleza de los iones. Las sales iónicas afectan a la química de la parte húmeda de la máquina de papel o wet-end, debido a su capacidad para neutralizar la carga superficial de las partículas y de las cadenas de polímeros.
- Contenido de materia orgánica: La importancia de este parámetro, desde el punto de vista cuantitativo, no es significativa en la industria de papel y cartón si se compara con los niveles encontrados en los otros dos agentes contaminantes, aditivos y materias primas fibrosas.

1.6 Gestión del agua en el cierre de circuitos de aguas blancas.

Cualquier paso hacia el cierre de cualquier circuito de agua, es una cuestión de regulación. Este balance existe entre la acumulación de contaminantes y su impacto en el funcionamiento y marcha de la máquina de papel. En la práctica hay un particular nivel de contaminación en los circuitos de agua, que es aceptable para cada máquina, sin causar desperfectos inaceptables. Cuando este nivel de contaminantes ha sido excedido, es detectado como un mal funcionamiento y debe aplicarse algún procedimiento adicional para tratar el agua, a fin de alcanzar nuevamente, un nivel aceptable y rebajar el grado de contaminación.

El objetivo o meta de la completa gestión del agua es obviamente el reciclado razonable de circuitos de agua. No significa ello el cierre completo, sino el equilibrio entre la alta calidad del producto, buen funcionamiento de las máquinas y calidad de agua de proceso estable con la mejor y más competitiva tecnología disponible al seleccionar los equipos.

Es obvio, que la mejor tecnología disponible en los tratamientos del agua bruta, así como todos los métodos anteriormente descritos, incluyendo los tratamientos biológicos, la tecnología de membranas y la evaporación, serán parte del concepto de gestión del agua, cuando los circuitos de agua se estén cerrando en equilibrio con la calidad final del producto y el funcionamiento de las máquinas (Alcala-Galiano, 1998).

El objetivo de una completa gestión del agua es, en definitiva, reciclar todo aquel material útil de nuevo al proceso de fabricación y reutilizar el agua en la circulación de aguas de proceso. Las grandes ventajas que aporta una buena gestión del agua son todos aquellos ahorros que ello genera: la disminución del consumo y del coste de agua bruta, la disminución de los costos de inversión y de mantenimiento operativo de tratamiento de efluentes, el mejor funcionamiento de la máquina de papel/cartón y los menores problemas de calidad en el producto final. Además, se minimiza el impacto ambiental.

1.6.1 Consecuencias asociadas al cierre de los circuitos de las aguas

Los problemas asociados al cierre de los circuitos de las aguas como consecuencia de la acumulación de sustancias contaminantes en las aguas de proceso son de muy diversa índole, si bien se pueden clasificar de forma general por los problemas asociados:

- Incremento de los sólidos en suspensión.
- Incremento de la materia disuelta y coloidal.
- Incremento de la temperatura.
- Efectos en la productividad de la máquina: peor retención y desgote, formación de depósitos e incrustaciones, incremento de la frecuencia de roturas, etc.
- Efectos en la eficacia de los aditivos.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

- Efectos en la calidad del papel: mala formación, disminución de la opacidad y blancura, presencia de agujeros, suciedad, pérdida de resistencia mecánica y química, etc.

Los problemas asociados al incremento de los sólidos en suspensión son los más fáciles de resolver, por cuanto estos compuestos pueden ser eliminados mediante sistemas de clarificación de las aguas de proceso. Sin embargo, una concentración elevada de los mismos puede dar lugar a graves problemas por depósitos en distintas partes del proceso de fabricación, mayor consumo de aditivos y pérdidas de propiedades físicas en el producto final. El ejemplo más característico son los bloqueos de los rociadores en aquellas fábricas que reutilizan el agua de proceso para esta aplicación (Alcala-Galiano, 1998).

Los problemas asociados al aumento de la materia orgánica en suspensión son similares a los que se exponen a continuación referidos a la aglomeración de materia coloidal. Con respecto al crecimiento de los sólidos inorgánicos en suspensión, hay que considerar los efectos perjudiciales del incremento de cargas en las aguas de proceso. A modo de ejemplo, pueden citarse:

- Incremento de depósitos en los equipos de fabricación.
- Incremento de la abrasión en partes móviles, como bombas, rodillos, telas, etc.
- Reducción de la resistencia física y química del producto.
- Disminución de la eficacia de determinados aditivos: agentes de encolado, colorantes, etc.
- Incremento de espumas cuando el carbonato cálcico se encuentra en medio ácido.

Los problemas asociados al incremento de la materia disuelta y coloidal son los que presentan una mayor importancia en la fabricación de papel y cartón. Se deben, en general, al aumento de la concentración de sales inorgánicas, de la materia orgánica y de los microorganismos.

La acumulación de sales inorgánicas en el sistema es uno de los aspectos importantes que hay que considerar como detrimento en el cierre del sistema de las aguas de proceso, debido al número elevado de problemas que pueden acarrear, tanto en el proceso de producción, como en el producto.

En cuanto a la materia disuelta y coloidal de naturaleza orgánica, los problemas relacionados con los distintos tipos de pitch o grumos de resinas stickies o grumos pegajosos y slime, biofilm o depósitos de microorganismos son los más importantes para los fabricantes de papel y cartón. Estos depósitos son los responsables de problemas tales como la modificación de la química de la parte húmeda o wet-end, la formación de depósitos en los equipos y en el producto final, corrosión, producción de malos olores, roturas de la banda de papel, etc. (Salome, 2004).

1.6.2 Alternativas más frecuentes para el cierre de circuitos de aguas.

Si el agua se utilizase en la fabricación de papel en circuitos totalmente abiertos, el consumo de agua sería técnica, económica y ecológicamente inadmisibles en la actualidad. Por tanto, todas las fábricas utilizan,

en mayor o en menor medida, algún grado de reciclado del agua en el proceso de fabricación (Alcala-Galiano, 1998). Las alternativas más frecuentemente adoptadas en la industria papelera para la reducción del consumo de agua son:

- Reutilización de las aguas blancas como aguas de proceso.
- Reutilización del agua clarificada para diferentes aplicaciones.
- Utilización del agua en sistemas en cascada en función de los requisitos calidad-uso.
- Utilización del agua para usos técnicos en sistemas cerrados.
- Reutilización del efluente después de su tratamiento como agua de alimentación.

1.6.3 Tecnologías de cierre de circuitos de agua en la industria papelera.

Según (Alcala-Galiano, 1998), el primer paso en la gestión de los circuitos de agua es normalmente la reutilización de las aguas blancas como aguas de proceso. Las fibras recuperadas, cargas y aditivos son reciclados adecuadamente cuando lo permiten los requisitos de calidad o de otra forma son totalmente retirados del proceso para evitar acumulaciones innecesarias. Los métodos aplicados son las tecnologías de Filtración, Sedimentación y Flotación por aire disuelto (FAD).

El sistema elegido para cada aplicación depende del criterio de prioridad, de cuales sean los requisitos de tratamiento del agua, de los equipos, de los consumos, etc. Un paso más en el fomento del ahorro es tratar los filtrados o vertidos mediante la tecnología de membranas, ultrafiltración, por ejemplo, a fin de conseguir un agua libre de sólidos en suspensión y de algún modo reducir el contenido de materia coloidal.

En el caso del destintado el objetivo del tratamiento de aguas filtradas es extraer los contaminantes, como el plástico, barro, arcilla y tinta, del agua de proceso. La especial ventaja del sistema D.A.F (Dissolved Air Flotation) en este tipo de tareas, es su habilidad para extraer los contaminantes que pueden causar problemas. El sistema D.A.F. es pequeño en volumen aunque puede tolerar alta carga superficial, y el fango extraído del sistema puede alcanzar una relativamente alta concentración. En función del grado de cierre puede haber uno o dos circuitos de agua separados, aún dentro de la línea de destintado (Salome, 2004).

Al eliminar los contaminantes coloidales de la última etapa de filtración mediante un clarificador D.A.F., el aumento de problemas en el circuito de agua de proceso de preparación de stock puede ser minimizado, así como el paso de estos contaminantes a la máquina de papel.

1.6.3.1 Sistema de filtración.

La filtración es el proceso de separación de la materia sólida suspendida de un líquido, el cual pasa a través de los poros de alguna sustancia llamada filtro. El líquido que ha pasado a través del filtro se llama

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

el filtrado. El filtro puede ser papel, tela, algodón hidrófilo, el asbesto, o de escoria de lana de vidrio, loza de barro sin esmaltar, arena u otro material poroso. La filtración se emplea con mucha frecuencia en la tecnología química, y a menudo presenta grandes dificultades. En la mayoría de las operaciones técnicas, el paño de algodón es el material de filtrado, pero ocasionalmente es necesario de lana o tela de pelo. La tela puede ser fijada en un marco de madera de tal manera que se forma una bolsa poco profunda, en la que se vierte el líquido turbio. El filtrado, en esta facilidad, es turbio al principio, pero pronto se hace evidente, y luego la parte turbia se devuelve al filtro. La filtración se retarda a menudo por la presencia de precipitados finos, viscosas, o por la formación de cristales en los intersticios de la tela, de la solución caliente. Cualquier intento de acelerar la filtración, por raspado o agitar el precipitado en la tela, siempre hará que el filtrado salga turbio.

Una forma mejor es la "bolsa-filtro", estrecha de algodón sarga, con el apoyo de una cubierta exterior gruesa, fuerte red, capaz de sostener un peso considerable y la presión hidrostática. Estas bolsas son a menudo cinco o seis pies de largo y ocho pulgadas o más de diámetro. El extremo abierto de la bolsa se ata firmemente alrededor de un anillo metálico o un pezón, por el cual se suspende el conjunto, y a través del cual se introduce el licor a filtrar. Cuando se filtran líquidos calientes, las bolsas cuelgan a menudo en baños de vapor calentado, siendo la temperatura casi la del líquido. En la filtración a presión, el líquido es forzado a través de los intersticios del filtro por la presión atmosférica directa, el aire que está siendo agotado desde el receptor; o por la presión hidrostática, obtenida ya sea por medio de una alta columna del líquido, o por una bomba de fuerza. Por el primer método, llamado filtración por succión, el líquido puede ser forzado hacia abajo a través del filtro en un receptor; el precipitado se recoge en la parte superior del filtro y se convierte en una parte de la capa filtrante. Esto a veces causa dificultad, las partículas de ciertos precipitados se unen para formar una capa impermeable o el filtrado puede extraerse hacia arriba a través del filtro, que se suspende en el líquido a filtrar; de este modo la obstrucción no se produce tan fácilmente, ya que gran parte del precipitado se deposita en el fondo del recipiente y no entra en contacto con el filtro hasta que la mayoría del líquido se ha dibujado fuera.

1.6.3.2 Sistema de sedimentación.

La sedimentación es la separación de una suspensión diluida de partículas sólidas en un líquido sobrenadante y una suspensión concentrada. Si el propósito del proceso es concentrar los sólidos, se denomina espesamiento; y si el objetivo es la eliminación de las partículas sólidas para producir líquido claro, se llama clarificación. El espesamiento es la operación común para la separación de sólidos finos a partir de suspensiones. Ejemplos de ello son la magnesia, alúmina lodo rojo, cobre y sus concentrados, caolín (caolín), residuos de carbón, lodos de fosfato, la pulpa de papel y otros residuos industriales. La

clarificación es importante en el tratamiento de los suministros de agua municipales (AccessScience, 2016).

La separación por gravedad bajo condiciones difíciles de sedimentación se utiliza a menudo para convertir una suspensión diluida de partículas finas en un líquido clarificado y una suspensión concentrada. El proceso se lleva a cabo en grandes tanques abiertos llamados espesantes y clarificadores. La suspensión concentrada, o lodos, puede tener para ser filtrada para producir un producto más seco pero el costo de la etapa de filtración es mucho menor que si la suspensión original había sido filtrada directamente. El líquido clarificado libre o casi libre de partículas en suspensión puede reutilizarse como agua de proceso o descargada como residuos (CourseHero, 2016).

1.6.3.3 Sistema de flotación por aire disuelto (FAD).

La Flotación por Aire Disuelto es un proceso que permite remover las partículas presentes en el agua haciéndolas flotar, por medio de la adhesión de pequeñísimas burbujas de aire. En este proceso, las microburbujas de aire, son generadas por la súbita reducción de presión en la corriente líquida saturada de aire, proveniente de una cámara o tanque de saturación. En efecto, por medio de una bomba, una pequeña cantidad de agua clarificada (5 a 10 % del caudal que pasa por la unidad) es presurizada hasta un valor de 4 a 5,5 bar y conducida a un tanque de saturación, donde la concentración de aire disuelto alcanza su correspondiente valor de saturación. El aire es provisto mediante compresor controlado según demanda del sistema. Esta agua presurizada y saturada de aire, es distribuida a la entrada del agua floculada a la celda de flotación, donde mediante brusca descompresión, se propicia la liberación del exceso de aire en forma de diminutas burbujas. Estas a su vez, se adhieren rápidamente a los flóculos preformados haciéndolos flotar. Los flóculos ascienden y se acumulan en la superficie del recinto de flotación, formando una capa de lodo de espesor creciente, que se remueve periódicamente mediante raspadores superficiales (Gross, 2015). La flotación por aire disuelto es el sistema de flotación más usado en el tratamiento de agua residual. La operación del proceso DAF está basada en principios descritos con detalle en trabajos anteriores. Las variables de operación que afectan el rendimiento del DAF son la presión de saturación, la razón de recirculación y el modo de inyección del agua saturada o posición de la válvula reductora de presión. En general a mayor presión de saturación se tiene una mayor cantidad de aire disuelto en agua, y mayor dispersión en la distribución de diámetros de burbuja con aparición de turbulencia. Dada la importancia de obtener un diámetro de burbuja lo más pequeño y homogéneo posible, es preciso establecer una presión de trabajo intermedia (Salas, 2004).

1.6.4 Ventajas y desventajas de la flotación por aire disuelto.

Ventajas:

1. Requiere menos tiempo que la decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua.
2. Alta eficiencia en la remoción de sólidos.
3. Menor área requerida para instalación.
4. Remoción de microorganismos y precipitados difíciles de sedimentar.
5. Alta tasa de separación.
6. Más eficiente para remoción de DBO5 que otros procesos de separación.
7. Sensible economía de productos químicos, con una reducción posible de hasta 20 a 30 % de coagulante, no siendo necesaria la adición de auxiliares de coagulación como polímeros para dar peso al flóculo.
8. Gran eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos, generalmente superando los valores obtenibles con los decantadores más eficientes. De acuerdo a la experiencia evaluada de anteriores estudios, resulta perfectamente factible obtener valores de turbiedad de agua clarificada por flotación inferiores a 1 NTU. De esta manera la carga de flóculos a los filtros disminuye en forma significativa, determinando mejoras en la calidad de agua filtrada y mayor duración de carreras de filtración.
9. La flotación permite remover algas que frecuentemente causan serios problemas en la decantación y en la filtración y produce agua de sabor agradable y saturada de oxígeno.
10. El lodo flotado contiene un tenor de sólidos generalmente superior al 3 %, lo que facilita su disposición final mediante secado directo en filtro de bandas o prensa, previo a su disposición final en relleno sanitario.
11. Dada la similitud de tasas de diseño superficiales, la celda de flotación puede disponerse directamente sobre el lecho filtrante, resultando en una mayor compacidad de la instalación (CONAMA, 2015).

Desventajas:

1. Sensible a variaciones de temperatura, sólidos en suspensión, recargas hidráulicas, variaciones químicas y fisicoquímicas, comparado con procesos de sedimentación.
2. Costos operacionales elevados cuando existe un control riguroso automático de parámetros.

1.6.5 Aplicaciones de la flotación.

- Separación de materias floculadas en clarificación de agua de superficie (generalmente en lugar de la decantación, para aguas poco mineralizadas cargadas de materias orgánicas y frías).

- Separación y recuperación de fibras en aguas de papelería.
- Separación de aceites, floculados o no, en aguas residuales de refinerías, aeropuertos, metalurgia.
- Separación de hidróxidos metálicos o de pigmentos en tratamiento de aguas residuales industriales.
- Espesamiento de fangos activados (o de mezcla fangos activados-fangos primarios) procedentes del tratamiento de aguas residuales orgánicas.

Las técnicas varían según:

- El modo de formación de las burbujas.
- La forma de alimentación del flotador.
- La forma de los tanques o depósitos utilizados.
- El sistema de recogida de las materias flotantes.

La técnica más extendida de producción de microburbujas es la de la presurización. Las burbujas se obtienen por expansión de una solución enriquecida de aire, disuelto a una presión de varias atmósferas. Como líquido presurizado, se utiliza el agua bruta, o agua tratada recirculada. El caudal de agua presurizada es sólo una fracción del caudal nominal de la instalación; para presiones de 8 a 3 atmósferas, esta fracción equivale del 10 al 30 % del caudal a tratar, y se obtiene como valor medio la disolución de un exceso de aire del 60 % aproximadamente, con relación al nivel de saturación a la presión considerada. El consumo de aire comprimido varía entre 15 y 50 litros normales de aire por m³ de agua tratada (CONAMA, 2015).

1.6.6 Parámetros principales en el sistema de FAD.

Los principales parámetros de diseño y operación de un sistema de FAD son: el tiempo de floculación (min) con un rango de 8-45; el tiempo de flotación (min) con un rango de 10-30; la tasa de escurrimiento (m³/m²*d) con valores entre 72- 480; la tasa de recirculación (%) que oscila entre 3 – 30; el por ciento de sólidos en el lodo con valores entre 0,1- 8; el consumo de aire comprimido (l/m³agua) con un rango de 15-50; el consumo de energía (W/m³/h) con valores entre 45- 60; la relación aire sólido (kg aire/kg sólido) con valores entre 0,01-0,2; la tasa de escurrimiento de sólidos (lb/pie²) con un rango de 30-40 y la presión (atm) con valores entre 1-6. (Salas, 2004)

1.6.7 Problemas de operación que pueden presentar el equipo FAD.

Los siguientes problemas se pueden presentar a la hora del funcionamiento del equipo de flotación por aire disuelto.

- Control de la calidad de burbujas y flujo al sistema de FAD.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

- A presiones menores que 30 lb/pulg² se producen grandes burbujas y a mayores que 80 psia burbujas pequeñas.
- Mantener la operación continua. Si se detiene la operación sedimenta el lodo.
- Si no se mantiene la presión en el sistema, chequear grasas, sólidos acumulados en válvulas de control o bombas de recirculación y el estado de la bomba.
- Si no se mantiene la interface aire/agua chequear los sensores y limpiarlos, la presión de aire disponible, las válvulas de regulación de aire.
- Si no se crean burbujas, chequear el nivel de la interface agua/aire. Si el tubo está lleno de agua los sensores debes estar funcionando mal. Chequear el solenoide de suministro de aire.
- Capa de lodo flotante fina:

Causa: insuficiente aire. Relación aire/sólido excesiva (flotado aparece espumoso), alimentación de productos químicos impropia, el barredor se mueve lento.

Acción correctiva: Chequear compresor de aire, flujo de aire, ajustar velocidad, ajustar dosis.

- Altos sólidos suspendidos del efluente.

Causa: insuficiente aire, impropio punto de adición de productos químicos, sobrecargada la unidad, el barredor se mueve lento.

Acción correctiva: chequear compresor de aire, flujo de aire, mezclado, dosis y punto de adición, ajustar velocidad, chequear flujo contra carga de sólidos totales suspendidos y diseño (Alemayehu, 2015).

Conclusiones parciales.

1. En los sistemas de gestión de la energía la Norma cubana (50001, 2011) define el objeto y campo de aplicación, referencias normativas, términos y definiciones y los requisitos del sistema de gestión de la energía; este último aspecto incluye entre otros, la planificación energética en la cual la revisión energética constituye el elemento de mayor trascendencia en el proceso de gestión.
2. Las turbinas de contrapresión producen menor trabajo útil que la turbina de condensación, pero como el vapor pasa proceso, la baja eficiencia de la generación (15 – 35 %) no afecta el proceso; son económicamente efectivas con válvulas paralelas de reducción de presión, garantizando un uso eficiente de los requerimientos de baja presión y normalmente tienen menor costo que las turbinas de condensación.
3. Las tecnologías internacionales que se utilizan para el cierre de circuitos de agua en la industria del papel están compuestas, principalmente por equipos de filtración, sedimentación y de flotación por aire disuelto.
4. La FAD tiene una alta eficiencia en la remoción de sólidos, pero es sensible a variaciones de temperatura, sólidos en suspensión, recargas hidráulicas, variaciones químicas y fisicoquímicas y los costos operacionales son elevados ya que generalmente requiere un control riguroso automático de parámetros.
5. Los principales parámetros de operación que son objeto de control en la FAD son: flujo de agua clarificada reciclada, flujo de agua al tanque de presurización, presión y flujo de aire al tanque de presurización y flujo de agua presurizada al equipo de FAD.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

La planificación energética se realiza según la NC (50001, 2011) en la cual, la revisión energética analiza el uso y el consumo de la energía basándose en mediciones y otro tipo de datos, tales como: fuentes de energía actuales, uso y consumo pasados y presentes de la energía, identificación de las áreas de uso significativo de la energía, es decir, desempeño energético actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía y la identificación y registro de oportunidades para mejorar el desempeño energético.

La gestión de los circuitos de agua comienza con la reutilización de las aguas blancas como aguas de proceso y la recuperación de fibras. El agua en la fábrica se utiliza en un circuito totalmente abierto, que conduce a un consumo técnico, económico y ecológicamente inadmisibles en la actualidad. La reducción del consumo se puede lograr con alternativas reportadas en el Capítulo I.

2.1 Caracterización energética de la industria.

La caracterización se realiza a los equipos generadores y consumidores de energía y la red de distribución del vapor. La fábrica de papel operaba originalmente con tres calderas que suministraban vapor a dos turbogeneradores de extracción - condensación de 2,5 MW y a un turbogenerador de contrapresión.

En la fábrica se genera vapor actualmente con una caldera, la cual suministra vapor a un turbogenerador HP 1200 de 0,9 MW, a la máquina de papel, al calentador de combustible y al deareador a través de tres válvulas de reducción de presión.

La caldera se alimenta con Fuel Oil; existe deficiente aislamiento térmico y no se recuperan más del 50 % de los condensados, siendo por tecnología original 30 % de condensados y 70 % de agua de reposición. Toda la operación es manual, por lo que el control de la combustión depende totalmente de la actividad del operador. En esta solo existe regulación de Fuel Oil a los quemadores en dependencia de la presión de vapor, el aire de combustible se introduce de forma manual, así como el vapor de atomización.

La Tabla 2.1 muestra una serie de mediciones realizadas por BioEnergía Caribe, en un diagnóstico en operación de la caldera 1 en diciembre del 2013.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Tabla 2.1 Principales parámetros durante el diagnóstico.

Mediciones realizadas durante el diagnóstico										
Parámetros	Hora									
	9:30 AM	10:30 AM	10:45 AM	11:30 AM	1:30 PM	2:45 PM	3:30 PM	3:45 PM	4:00 PM	4:15 PM
Presión de vapor (Psi)	410	415	410	400	400	400	400	410	410	410
Temperat. del vapor (°F)	540	560	540	540	540	540	550	540	550	540
Temperat. agua alimentar (°C)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Temperat. combustible (°F)	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Temperat. Gases	380	385	375	350	350	350	375	380	360	340

Se observa un comportamiento variable en la temperatura de los gases producto de la combustión. En los primeros años de operación la temperatura de los gases de salida era de 260 °C. Actualmente la temperatura ha sido aumentada alrededor de 100 °C.

Según datos de diseño el agua de alimentación a la caldera entra a una temperatura de 93 °C mientras que en la Tabla 2.1 muestra que está alrededor de los 100 °C. A medida que la temperatura del agua de alimentación se eleva con mayor facilidad se evapora. Por datos de diseño la temperatura del vapor sobrecalentado es de 398 °C, actualmente se encuentra por debajo de los rangos establecidos.

Para el generador de vapor el sistema de instrumentación debería comportarse de la siguiente forma. En la Figura 2.1 se indican algunos de los principales lazos de control del generador de vapor.

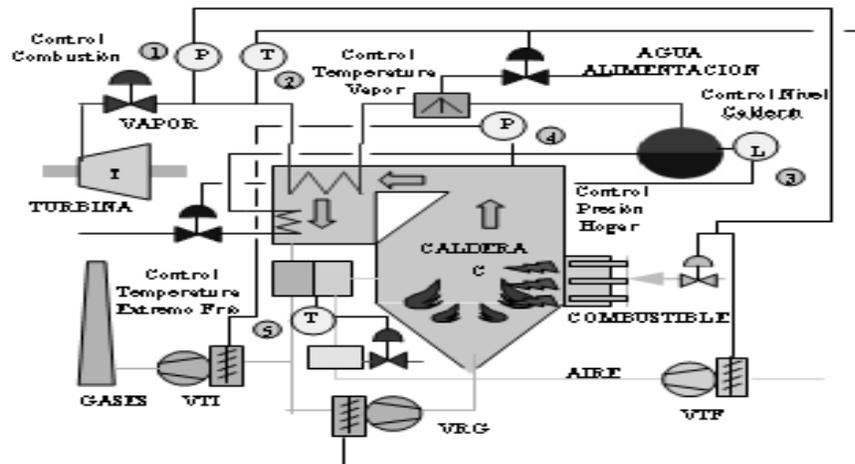


Figura 2.1 Principales lazos de control de un generador de vapor.

Los equipos consumidores de vapor son: deaerador, calentador de Fuel Oil, secadores en la máquina de papel y turbo HP 1200.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

El deaerador es un tanque cilíndrico situado en posición horizontal, con un domo en su parte superior donde están situadas en su interior las bandejas y en su parte exterior las diferentes entradas de agua. En este se recuperan todas las aguas que reúnen una serie de requisitos de pureza y ninguna sal mineral incrustante. Su función principal es eliminar el oxígeno disuelto en el agua. En sentido contrario al flujo de agua circula un flujo de vapor saturado en forma ascendente. El vapor arrastra los gases liberados y los expulsa hacia la atmósfera, además calienta el agua antes de entrar a las calderas.

El agua de reposición (agua tratada) es regulada por una válvula automática a la entrada del deaerador y es operada por un flotante que abre y cierra la válvula según baje o suba el nivel del mismo.

2.2 Aplicación del diagnóstico energético al sistema actual.

En la Figura 2.2 se expone el esquema termoenergético de la Papelera Pulpa Cuba.

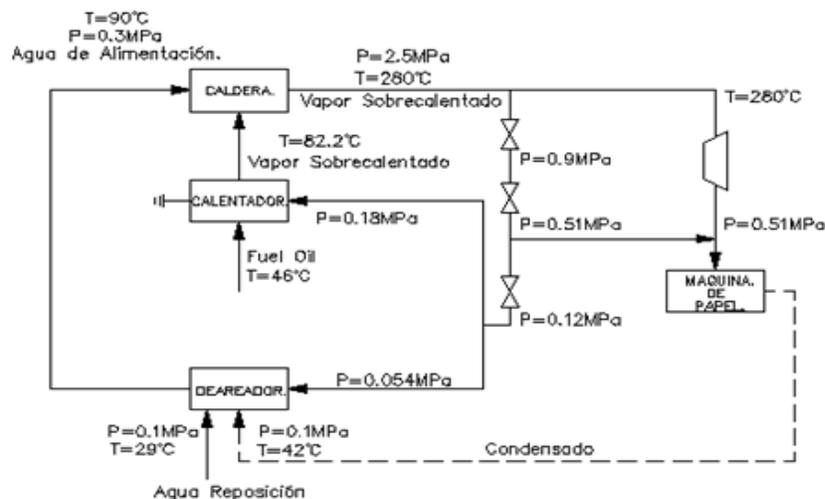


Figura 2.2 Esquema térmico

El agua antes de ser alimentada a la caldera es tratada. El tratamiento externo del agua se basa en el principio de coagulación – sedimentación, utilizándose como sustancia coagulante el sulfato de alúmina. Aunque la cal no es un coagulante se incluye como tal por ser necesaria para el ajuste del pH para las reacciones de suavización que tienen lugar en la mayoría de los programas de clarificación de agua. El combustible puede ser impulsado hacia el calentador simultaneando dos bombas de alimentación de Fuel Oil. El mismo entra a una temperatura de 46 °C y es calentado hasta 82 °C, para alimentar la caldera. El agua de alimentación a la caldera entra a una temperatura

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

de 93 °C y a una presión de 0,3 MPa. En la caldera la energía se aporta por un proceso de combustión, el calor aportado se transmite al agua. El vapor sale sobrecalentado a 280 °C y una presión de 2,5 MPa, a esta temperatura y presión el vapor entra al turbo HP 1200 que acciona un generador de corriente continua que alimenta a los motores del mecanismo de transmisión de la máquina de papel. El vapor sobrecalentado pasa por dos válvulas reductoras de 2,5 hasta 0,9 MPa y de 0,9 hasta 0,51 MPa, a esta última presión de vapor es alimentado a la sección de secado de la máquina de papel. Posteriormente la presión del vapor es reducida de 0,51 hasta 0,12 MPa. El condensado de la máquina de papel sale a una temperatura de 42 °C y el agua de reposición entra a 29 °C. Ambos flujos de agua son acumulados en el tanque llamado deareador a una presión de 0,12 MPa.

2.2.1 Propuesta de un esquema térmico modificado.

Considerando los resultados obtenidos anteriormente y suponiendo condiciones normales de operación en cuanto a: agua de reposición, fugas, purgas, aislamiento y recuperación de condensado se propone la instalación de un nuevo turbogenerador KKK Siemens CFR5 G5 (Lohrmann, 2015) cuya generación es de 983 kW, con un consumo de vapor de 10000 Kg/h con el fin de ahorrar energía.

En la Figura 2.3 se muestra el esquema térmico propuesto para la papelera Pulpa Cuba.

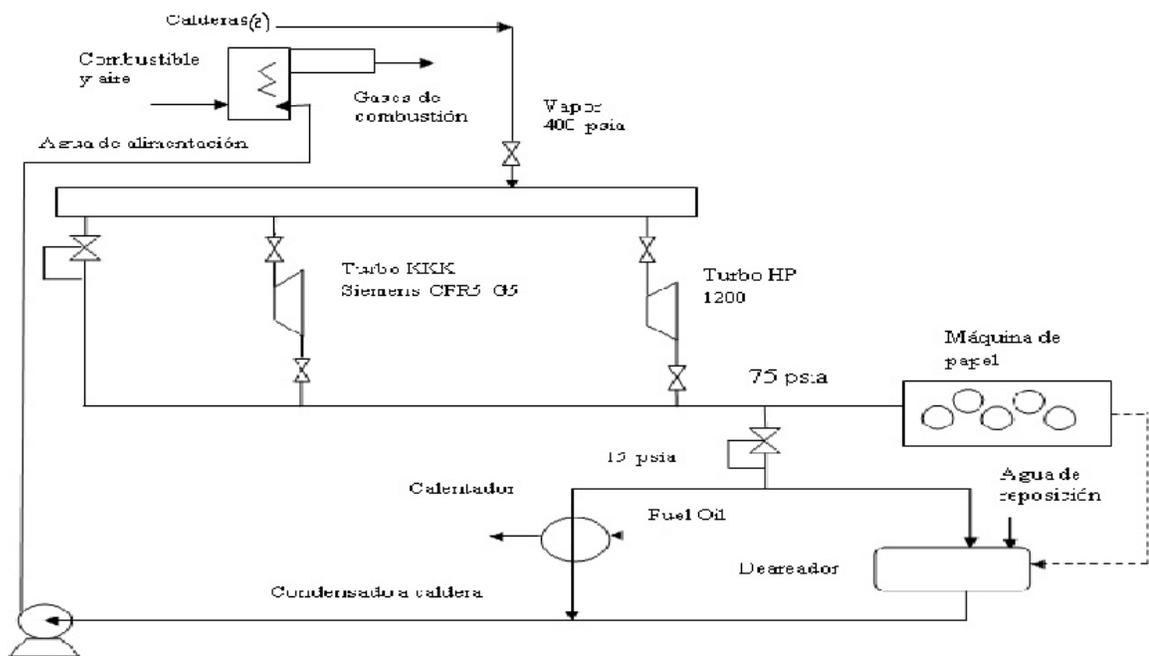


Figura 2.3 Esquema térmico modificado.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Las especificaciones técnicas del turbogenerador seleccionado se toman de la Empresa alemana Siemens (Stromerzeuger-Discount, 2015), mostradas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del turbogenerador.

Marca	KKK (Siemens) CFR 5 G5
Potencia	983 kW
Generación	AEG 1250 kVA, 400 Volts, 50 Hz, $\cos \Phi$ 0,8
Consumo de vapor	10 t/h a carga máxima
Entrada de vapor	16,6 - 25,4 bar
Presión	0,0 - 1,5 bar
Temperatura del vapor de entrada	300 - 378 °C
Relación de transmisión	9,29
Fabricación	1993
Horas de trabajo	53000
Peso	9 tons
Dimensiones	3,50 L * 2,50 H * 2,40 - 2,75 W

2.2.2 Balance de agua y fibra.

Para la realización del DEN 2 en la UEB Pulpa Cuba, se realiza primeramente un balance de agua y fibra en la sección de secado y bobinado, para determinar las principales corrientes para su utilización en el balance de energía aplicado en la sequería de papel.

La realización de los balances de materiales se lleva a cabo en condiciones estables de operación, en la cual se produce Linner de 175 g/m² con una producción de 73 t/d. Las materias primas utilizadas en dicho estudio están constituidas por recortes OCC nacional. La Tabla 2.3 muestra la nomenclatura utilizada:

Tabla 2.3 Nomenclatura utilizada.

Ps: Papel seco	S: consistencia de una corriente
Pf: Producción final.	At: Ancho de la tirilla
Ph: Papel húmedo	Vm: Velocidad de la máquina de papel
Ae: Agua evaporada	Pb: Peso básico
At: Ancho de la tirilla	PN: Producción neta
t: tiempo para producir una tonelada de papel.	

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los balances de materiales en parte seca.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Tabla 2.4 Resultados de los balances de materiales.

<i>Etapa o equipo</i>	<i>Datos</i>	<i>Ecuaciones Utilizadas</i>	<i>Resultados</i>
Bobinadora	Vm: 90 m/min Peso básico: 175 g/m ² Pf: 1 000 kg	Ps= Pf + Tr Tr= At*Vm*Pb*t t= 1/ PN	Tr= 15,53 kg/tpapel Ps= 3 173,5 kg/h
Secado	Sph=0,32 Sps=0,94 Ps= 3 173,5 kg/h	Ph=Ps+Ae Ph*Sph=Ps*Sps	Ph= 9322 kg/h Ae= 6148,7 kg/h

2.2.3 Balance de calor

Balance en la sección de secado

La hoja de papel procedente de las prensas entra a la sequería con un 32 % de sequedad y se seca durante todo su recorrido sobre las 41 tamboras secadoras. Al final de la sequería la hoja sale con un 6% de humedad. Los datos utilizados para la realización del balance energético en los secadores de papel se pueden consultar el Anexo 4.

Cálculo del gasto útil de calor para el secado del papel (Qump).

La metodología utilizada para el cálculo del calor para el secado del papel (Qump) se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 2.5 Resultados del balance de calor en la sección de secado.

<i>Parámetros</i>	<i>Resultados</i>	<i>Ecuación</i>
Cantidad de calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca que está en el papel secado al aire (Q1.1)	38362,5	$Q1.1 = G * C_p * (T_f - T_i)$
Cantidad de calor para el calentamiento del agua que se queda en el papel seco al aire (Q1.2)	262777	$Q1.2 = W1 * C_{p_a} * (T_f - T_i)$
Cantidad de calor necesario para la evaporación (Q1.3)	15279776	$Q1.3 = W * (i - C_p * T_{ms})$
Gasto útil de calor para el secado del papel (Qump)	15536500,25	$Q_{ump} = Q1.1 + Q1.2 + Q1.3$
Pérdidas térmicas en la máquina de papel (Qtmp)	35678046,36	$Q_{tmp} = \sum_1^{10} Q_{mp}$
Gasto específico de vapor (Ga _{MP})	16625	$Ga_{MP} = \frac{Q_t}{i - c * t}$
Eficiencia (η_{mp})	44	$\eta_{mp} = \frac{Q_{ump}}{Q_{tmp}}$

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Calentador de Fuel Oil.

Tabla 2.6 Datos empleados en el cálculo del consumo de vapor del calentador.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Masa del combustible (mc)	770 kg/h
Capacidad calorífica del Fuel Oil (Cpc)	11,83 kJ/kg °C
Temperatura de entrada del combustible (Te)	46 °C
Temperatura de salida del combustible (Ts)	82,2 °C
Presión de vapor (Pv)	0,18 MPa
Calor latente del vapor (λ_v) Tabla 2 (KEENAN, 1978)	2211 kJ/kg

$$m_c C_p \Delta T = G_{cal} \lambda_v$$

$$770 \frac{kg}{h} * 11,83 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (82,2 - 46)^{\circ}C = G_{cal} * 2211 \frac{kJ}{kg}$$

$$G_{cal} = 149,1 \text{ kg/h}$$

Turbo HP 1200.

Tabla 2.7 Datos empleados en el cálculo del consumo de vapor del turbo HP 1200.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Índice de consumo específico	$14 \frac{lb}{HP-hr}$
Voltaje del generador principal	120 V
Corriente generada	680 A

$$900 \frac{kWh}{h} * 1,34 \frac{Hpot}{kW} = 1206 \frac{HP-h}{h}$$

$$14 \frac{lb}{HP-h} * 1206 \frac{HP-h}{h} = 15678 \frac{lb}{h} * \frac{1kg}{2,17lb} = 7126 \text{ kg/h}$$

$$G_{TG} = 7126 \text{ kg/h}$$

Deaerador.

$$G_{deaerador} = 1145 \text{ kg/h}$$

$$G_{condensado} = G_{mp} + G_{deaerador}$$

$$G_{condensado} = 17770 \text{ kg/h}$$

Balance de vapor

$$G_{vr2} = G_{deaerador} + G_{cal}$$

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

$$G_{vr2} = 1145 + 149,1$$

$$G_{vr2} = 1294 \text{ kg/h}$$

$$G_{TG1} + G_{TG2} + G_{vr1} = G_{\text{proceso}}$$

$$G_{vr1} = 793 \text{ kg/h}$$

$$\% G_{vr} = \frac{G_{vr}}{G_{cald}} * 100$$

$$\% G_{vr} = \frac{1508}{19945}$$

$$\% G_{vr} = 4\%$$

Según (Espinosa, 1990) el porcentaje que debe de pasar por válvula reductora es de un (12-15 %).

$$G_{\text{proceso}} = P_{mp} + G_{\text{deareador}} + G_{cal}$$

$$G_{\text{proceso}} = 17919 \text{ kg/h}$$

$$G_{cald} = (G_{vr1} + G_{TG1} + G_{TG2}) * 1.1$$

$$G_{cald} = 19711 \text{ kg/h}$$

Balance de agua.

$$G_{ar} = G_{cald} - G_{\text{proceso}}$$

$$G_{ar} = 19711 - 17919$$

$$G_{ar} = 1792 \text{ kg/h}$$

$$\% \text{Aguareposición} = \frac{G_{ar}}{G_{cald}} * 100$$

$$\% \text{Aguareposición} = \frac{1812}{19945} * 100$$

$$\% \text{Aguareposición} = 9\%$$

Según la literatura el porcentaje de agua de reposición se debe de encontrar entre (10-15 %).

Balance de calor

$$Q_{cald} = G_{cald} * h_0$$

$$Q_{cald} = 19711 \text{ kg/h} * 2950 \text{ kJ/kg} * 1 \text{ h} / 3600 \text{ s}$$

$$Q_{cald} = 15347 \text{ kW}$$

Como el sistema va a trabajar con dos calderas la 1 y la 3, el calor en la caldera sería:

$$Q_{cald} = Q_{cald1} + Q_{cald3}$$

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Qcald= 30694 kW

ho=2803 kJ/kg Tabla 3 (KEENAN, 1978)

Tabla 2.8 Distribución del calor del sistema.

<i>Equipos y condensado</i>	<i>Datos</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Distribución del calor, kW</i>
Qcond	Gacond=17770 Kg/h Hmp=632,2kJ/kg Hdear=419kJ/kg	Qcond=Gmp*h +Gdear*h	3052
Q _{TG2}	G _{TG2} =7126 kg/h ho=2803kJ/kg	Q _{TG2} =G _{TG2} *ho	5786
Q _{TG1}	G _{TG1} = 10000kg/h ho=2803kJ/kg	Q _{TG1} = G _{TG1} *ho	4123
Qmp	Gmp=16625 kg/h ho=2114 kJ/kg (Mijeev, 1988)	Qmp=Gmp* ho	9762
Qcalt	Gcal=149,1 kg/h ho=2114KJ/kg	Qcalt=Gcal*ho	87
Qdeareador	Gdear=1145 kg/h ho=2256 kJ/kg	Qdear=Gdear*ho	717
Qvr1	Gvr1= 793kg/h ho=2803 kJ/k	Qvr1=Gvr1*ho	617
Qvr2	Gvr2= 1294 kg/h ho= 2746 kJ/kg	Qvr2=Gvr2*ho	987
Qcaldera	Gcald=19711 kg/h ho=2803 kJ/kg	Qcald=Gcald*ho	30694

Pérdidas del sistema.

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{cald}} - \sum Q_n$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{cald}} - \sum Q_{TG2} + Q_{MP} + Q_{\text{calet}} + Q_{\text{deareador}} + Q_{TG1} + Q_{VR1} + Q_{VR2} + Q_{\text{cond}}$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 30694 - 25131$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 5563 \text{ kW}$$

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{Q_{\text{perd}}}{Q_{\text{cald}}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = 18 \%$$

Los resultados del balance de vapor son adecuados desde el punto de vista de % válvula reductora, % agua reposición, vapor producido por la caldera y vapor del proceso ya que el vapor producido

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

por la caldera satisface las necesidades del proceso, pero con estrecha diferencia entre el vapor producido con el consumido, por lo que el proceso requiere un generador de vapor adicional de pequeña capacidad y no rehabilitar la caldera número 3 que es de igual capacidad, puesto que incrementa excesivamente la pérdidas de calor y el vapor no se utiliza en producir trabajo.

Suponiendo una caldera de una capacidad de 14000 kg/h se obtienen los siguientes resultados.

$$Q_{cald} = G_{cald} * h_o$$

$$Q_{cald} = 14000 \text{ kg/h} * 2803 \text{ kJ/kg} / 3600 \text{ s}$$

$$Q_{cald} = 10653 \text{ kW}$$

$$Q_{perd} = 26000 - 25131$$

$$Q_{perd} = 869 \text{ kW}$$

$$\% \text{Perd} = \frac{Q_{perd}}{Q_{cald}} * 100$$

$$\% \text{Perd} = 3\%$$

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{Q_{cald} - Q_{perd}}{Q_{cald}} * 100$$

$$\text{Eficiencia térmica} = 96\%$$

$$\eta_{\text{generación}} = \frac{G_{cald}}{G_{\text{nominal}}} * 100$$

$$\eta_{\text{generación}} = \frac{19711}{23000} * 100$$

$$\eta_{\text{generación}} = 86\%$$

Actualmente se proyecta la instalación de una caldera acuotubular de dos domos con hogar presurizado con una capacidad de 16 000 kg/h y 16,5 kg/cm². Como se observa existe cierta correspondencia entre la propuesta anterior y el proyecto de inversión

Tabla 2.9 Comparación del esquema energético actual y modificado.

<i>Parámetros</i>	<i>Esquema actual</i>	<i>Esquema modificado</i>
Consumo vapor máquina de papel, kg/h	16555,3	16625
Consumo vapor calentador, kg/h	149,1	149,1
Consumo vapor Turbo HP 1200, kg/h	7126	7126
Consumo vapor deareador, kg/h	1145	1145
Flujo de agua de reposición (Gar), kg/h	18596,3	1792
% Agua de reposición	85	9
Flujo de condensado, kg/h	8770,3	3052

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Vapor a válvula reductora 2, kg/h	18843,7	1294
Eficiencia de generación(η), %	94,8	86
Vapor válvula reductora 1, kg/h	20827,1	793
Vapor en la caldera, kg/h	21817,9	19711
Calor en la caldera(Q_{cald}), kW	17878,5	30694
Calor del proceso, kw	14105,5	13755
Calor perdido, kw	2532	5563
Calor del condensado (Q_{cond}), kW	427,3	3052
Calor del turbogenerador (Q_{TG2}), kW	-	5786
Calor en la máquina de papel (Q_{mp}), kW	12645	9762
Calor del calentador (Q_{cal}), kW	91,5	87
Calor del deareador ($Q_{deareador}$), kW	1369,9	717
Calor del turbogenerador 1 (Q_{TG1}), kW	4123	4123
Consumo de combustible, kg/h	1534	1317
Generación de electricidad, kWh/a	6 480 000	13 557 600

2.3 Evaluación del sistema de aguas.

2.3.1 Caracterización del sistema de aguas blancas.

Las aguas blancas en la industria del papel juegan un papel esencial en el proceso productivo, ya que estas surgen producto de la desfibración de la materia prima, y son ricas en productos químicos y fibra. En el área de preparación de pasta por sus características se utiliza un mayor volumen de agua, donde entra al proceso la materia prima que aún no está procesada.

Las aguas blancas que se recuperan en el proceso de fabricación de papel fundamentalmente en el fourdrinier son de vital importancia ya que estas llevan consigo gran cantidad de productos químicos como son AKD, agente de retención y otros productos que se le podían añadir al proceso productivo.

Existen equipos que por descontroles operacionales y deficiencias tecnológicas vierten a la zanja, tales como: el colador rotatorio (Cowan) por problemas en las mallas, por estar la bomba de rechazo fuera de servicio; los sistemas de almacenamiento como la torre de alta densidad y la cuba, estos pueden ser por ausencia de un control de nivel; el recuperador de agua y fibra fuera de servicio donde se pierde gran cantidad de fibra y no se puede recuperar el agua blanca, además estas aguas son ricas en productos químicos como AKD y agente de retención que se le añade al papel en el proceso productivo, los depuradores de alta y depuración fina, los cuales pueden presentar salideros en las tuberías o tuplición, el agua blanca que se recupera en la lavadora se almacena en los tanques de sellos, filtrado y tanque de agua blanca y cuando estos se llenan vierten directo a la zanja, esto incide ocasionalmente por parada de la fábrica, en el caso de la máquina de papel y sigue trabajando

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

la línea de preparación de pasta, el ecopulper chino vierte gran cantidad de fibra a la zanja en la limpieza diaria, por no estar concluido totalmente su montaje en estos momentos.

Actualmente se presentan varias deficiencias tecnológicas que afectan en gran medida la eficiencia del proceso asociadas a la pérdida de agua y fibra, tales como la rotura del recuperador de fibra; los depuradores de alta densidad fuera de servicio; problemas en la bombas de vacío, carencia de tecnología para recuperación de fibra y agua blanca en zanja, entre otros.

2.3.2 Aplicaciones de los balances de agua y fibra en la fábrica de papel.

La realización de los balances de materiales se llevó a cabo en condiciones estables de operación, para la fabricación de linner de 150 g/m² con una producción de 70 t/d. Las materias primas utilizadas en dicho estudio están constituidas por recortes corrientes, OCC nacional y DKL importado; siendo sus proporciones en la formulación de 48, 32 y 20 % respectivamente.

A continuación se muestran los resultados de los balances de agua y fibra en la fábrica de papel Pulpa Cuba.

Tabla 2.10 Principales equipos que generan aguas.

<i>Equipo</i>	<i>No de la Corriente (Anexo 7)</i>	<i>Flujo Generado (t/d)</i>	<i>Consistencia (fracción)</i>
Hidrociclones	14	108,97	0,00598
Desaguador	4	1324,46	0,0008
Colador Cowan	5	104,85	0,0066
Espesador	6	3402,67	0,0008
Recuperador de fibras	7	3817,74	0,00086
Cleaner terciario	15	15,44	0,00805
Bombas de vacío	21	137,90	0,00016
Fourdrinier	16	2192,51	0,00048
	17	6587,57	0,0010

Tabla 2.11 Equipos que consumen Aguas (Sumideros)

<i>Equipo</i>	<i>No. de la corriente (Anexo 7)</i>	<i>Flujo consumido(t/d)</i>	<i>Rango de flujo (t/d)</i>	<i>Consistencia (fracción)</i>	<i>Rango de consistencia (fracción)</i>
Hidrapulper	1	104,85	94,36 115,33	0,0066	0,00594 0,00756
	2	1423,36	1281,02 1565,69	0,0008	0,00072 0,00088
	3	1423,36	1281,02 1565,69	0,0008	0,00072 0,00088
Regulador de consistencia cuba	8	3448,27	3103,41 3793,12	0,00086	0,000774 0,000946

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

pulmón					
Dinapulper	23	8,64	7,776 9,504	0,00086	0,000774 0,000946
Succión Bomba#1	18	4956,7	4461,03 5452,37	0,0010	0,000909 0,00111
Regulador de consistencia cuba de la máquina	9	512,11	460,89 563,32	0,00086	0,00078 0,00094
Foso couch	19	2192,51	1973,25 2411,76	0,00048	0,000432 0,000528
	44	1630,87	1467,78	0,00101	0,000909 0,00111

Tabla 2.12 Equipos que consumen agua fresca

<i>Equipo</i>	<i>Flujo (t/d)</i>
Hidrociclones	28,8
Colador Cowan	1593,37
Espesador	172,8
Torre de alta densidad	850
Enfriamiento de refinadores	14,4
Recuperador de fibras	86,4
Dinapulper	103,68
Cleaner terciario	28,8
Limpieza malla del foso fuente	241,92
Duchas de limpieza foso Couch	320,5
Cajas de vacío prensas	132,19
Cajas de vacío rolo Couch	62,24
Turbo de 1200HP	86,4
Total	4844,8

Como se puede ver en la Tabla 2.12, el consumo de agua fresca es de 69.21 t agua/ t de papel, tomando como referencia el consumo actualizado de este tipo de fabrica, el cual es de 4.9 t agua/ t papel. Estos resultados se determinan para condiciones normales de operación. Las pérdidas de fibra en la instalación se deben básicamente a la fibra que es expulsada en los hidrociclones de la línea de preparación de pasta, por las bombas de vacío y por el cleaner terciario.

En la tabla 2.13 se muestran todos los equipos que vierten fibra a la zanja.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Tabla 2.13 Principales equipos que vierten fibra en los residuales

<i>Equipo</i>	<i>Flujo (t/d)</i>	<i>Consistencia(fracción)</i>	<i>ton. fibras/d</i>
Hidrociclones	108,97	0,00598	0,65
Cleaner Terciario	15,44	0,00805	0,12
Bombas de Vacío	137,90	0,00016	0,02
Total	262,31	-	0,79

2.3.3 Determinación del flujo y consistencia del agua residual y pérdidas de agua y fibra en las condiciones actuales.

Los residuales líquidos emitidos en el proceso productivo y que afectan al medio ambiente son las aguas vertidas por los distintos puntos del proceso (aguas blancas) y que contienen principalmente un alto por ciento de sólidos. Está establecida la realización de monitoreos de las aguas residuales en el canal general por parte del laboratorio químico en la fábrica, los cuales deben realizarse con una frecuencia de 2 veces a la semana durante la etapa productiva. Este sistema se ve afectado en muchas ocasiones por la inestabilidad de la producción.

A continuación se presentan los resultados del último muestreo realizado a la zanja de salida general para calcular la cantidad de agua y fibra que se pierde diario.

Datos:

Distancia= 2,40 m

Largo= 0,8m

Ancho= 0,3m

Tiempo= 4segundos

Q= flujo

C (consistencia)= 0,1234g/l

Producción media (linner y papel)= 67 tpapel/d

Agua utilizada en la fábrica según la norma= 70 m³ agua/t papel

Agua de entrada al proceso:

Existen dos bombas que extraen el agua del río, las bombas 1y 2 con un flujo de 540 m³/h, donde el 25% del agua va al poblado adyacente y el resto al proceso, la cual sería de 19440 m³/d.

Área de la sección transversal del canal = 0,8*0,3= 0,24m²

Velocidad de la corriente de agua = $\frac{2,40m}{4seg} = 0,6 \text{ m/s}$

Flujo del agua y fibra vertido a la zanja = 0,24m² * 0,6 m/s = 0,144m³/s = 518,4m³/h= 12442, 4m³/d

Índice de fibra = C*Q*86,4

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

$0,1234 \text{ g/l} * 0,144 \text{ m}^3/\text{s} * 86,4 = 1,53 \text{ t/d}$

$70 \text{ m}^3 \text{ agua/t papel} * 67 \text{ t papel/d} = 4690 \text{ m}^3/\text{d} = 195,4 \text{ m}^3/\text{h}$

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede apreciar que el consumo diario de agua para producir una tonelada de papel ($70 \text{ m}^3 \text{ agua/t papel}$) está muy por debajo del agua vertida a la zanja con un valor de $12442 \text{ m}^3/\text{d}$, es decir, se pierden $7752,4 \text{ m}^3/\text{d}$ por encima de la norma.

2.3.4 Modificación al esquema de circulación de aguas blancas.

En correspondencia con los resultados de la evaluación del sistema de aguas del proceso y del sistema de aguas blancas, se propone la adición de un circuito terciario para la recuperación de agua y fibra.

2.3.4.1 Estructura del circuito de aguas.

La Figura 2.4 muestra la estructura del circuito de aguas blancas que existe actualmente en la fábrica.

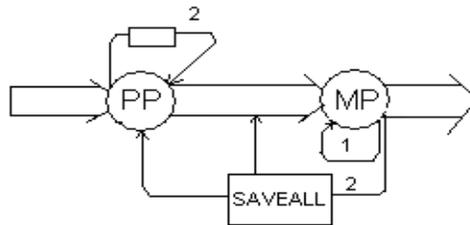


Figura 2.4 Estructura del circuito de agua papelería “Pulpa Cuba”

En el esquema se representa de forma simplificada el circuito primario de aguas blancas, donde se recircula directamente el agua y la fibra al proceso. Como se muestra en la figura, la instalación cuenta con dos circuitos secundarios de aguas blancas, uno en la sección de preparación de pastas y otro en la sección de la máquina de papel. El circuito secundario en la sección de preparación de pastas se debe a que en dicha sección se encuentran equipos que se encargan de eliminarle agua a la pulpa, tal es el caso del desaguador y del espesador. El otro circuito secundario está formado por la recuperación de fibras, etapa que, como su nombre lo indica, se recuperan las fibras que provienen básicamente de la máquina de papel, así como el agua blanca obtenida. Es decir, las fibras y el agua son reincorporadas nuevamente al proceso.

El principal defecto detectado en dicho circuito es la ausencia de un circuito terciario de agua blanca, así como de una planta de tratamiento auxiliar. Esto trae consigo pérdidas de agua, fibra y contaminación del medio ambiente.

2.3.4.2 Estructura del circuito de aguas propuesto.

El esquema que se muestra en la Figura 2.5 representa la incorporación de un circuito terciario, tomando como referencia el circuito actual con que cuenta la fábrica.

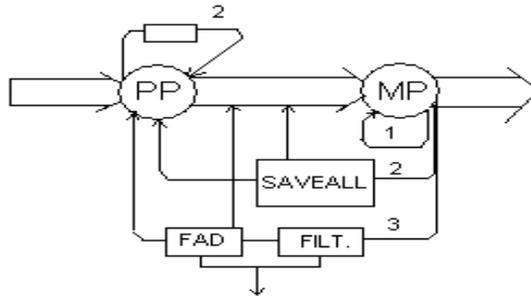


Figura 2.5 Circuito modificado de agua papelería "Pulpa Cuba".

Como se puede ver, la mejora consiste en el cierre de circuito a través del cierre del circuito terciario. El agua es enviada al un equipo de flotación por aire disuelto con el objetivo de remover la fibra y el agua y de esta manera mejorar el residual para su posterior uso como agua de proceso. El agua clarificada obtenida se usaría en la preparación de pasta y la fibra recuperada retornaría al proceso.

2.3.4.3 Esquema con el equipo de flotación por aire disuelto FAD.

En la Figura 2.6 se muestra el esquema general que presenta el equipo de flotación por aire disuelto.

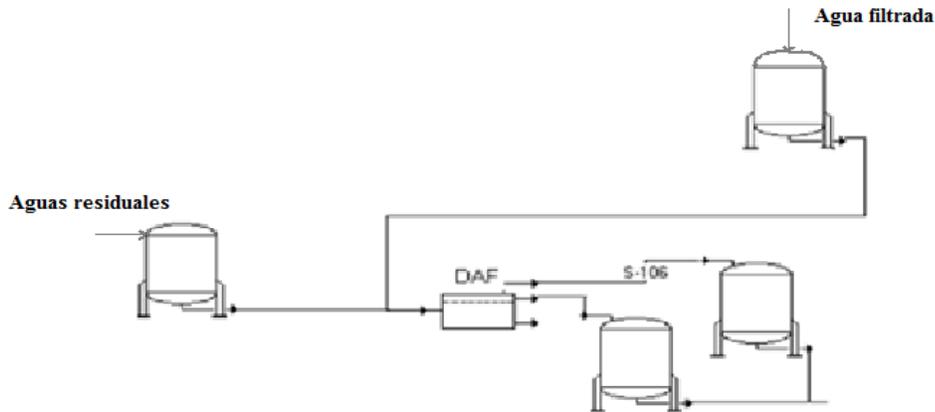


Figura 2.6 Esquema general del sistema de flotación por aire disuelto.

2.3.5 Selección del sistema de tratamiento de las aguas residuales.

Para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales en la papelería Pulpa Cuba se propone el uso de un sistema de flotación por aire disuelto (FAD), pues este requiere menos tiempo que la

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua, tiene una alta eficiencia en la remoción de sólidos y alta tasa de separación, gran eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos, generalmente superando los valores obtenibles con los decantadores más eficientes. Además tiene la habilidad para extraer los contaminantes que pueden causar problemas y puede tolerar alta carga superficial.

Para la selección del equipo de flotación por aire disuelto se tuvo en cuenta los datos ofrecidos por los fabricantes de este tipo de equipo (ver anexo No 6). Como criterio de selección se tomó el flujo a tratar en galones por minuto, siendo el mismo de 518,4 m³/h (2282,4 gal/min). El modelo propuesto por el fabricante para estas condiciones es el DAF-500, cuyas dimensiones se muestran en la tabla 2.14.

Tabla 2.14 Dimensiones equipo de flotación por aire disuelto.

<i>Parámetro</i>	<i>U/M</i>	<i>Valor</i>	<i>U/M</i>	<i>Valor</i>
Largo	Pie	75,46	m	23
Ancho	Pie	9,19	m	2,8
Altura	Pie	14,44	m	4,4
Área	pie ²	693	m ²	64,4
Flujo a Tratar	gal/min	2282,4	m ³ /h	518,4

En la Figura 2.7 se muestra el esquema detallado del sistema de flotación por aire disuelto.

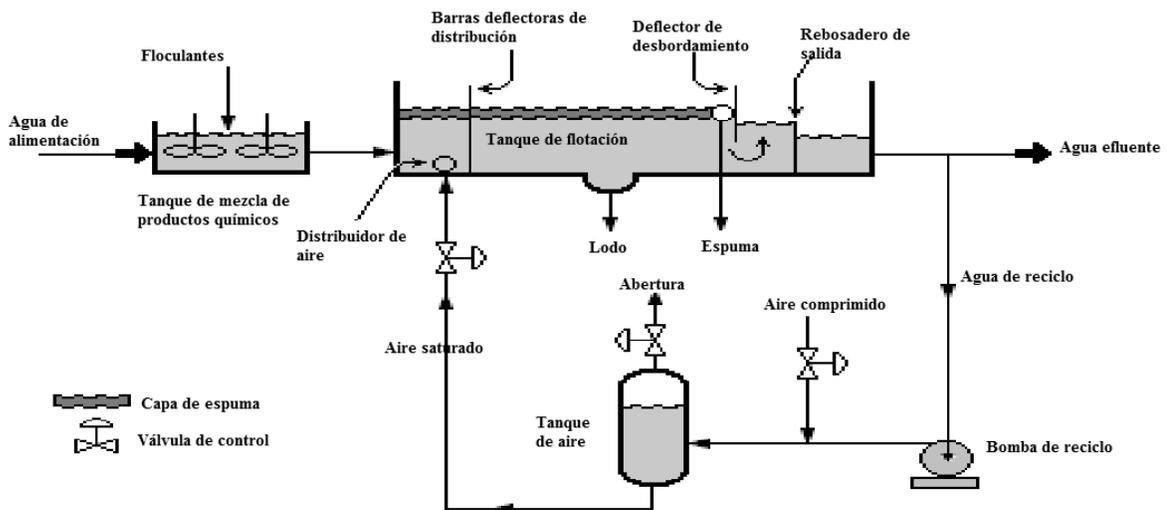


Figura 2.7 Esquema detallado del sistema de flotación por aire disuelto.

2.3.6 Diseño del equipo de flotación.

2.3.6.1 Cálculo de los parámetros para la evaluación.

- Velocidad de ascenso del lodo

Datos

ancho: 2,8 m

largo: 23 m

profundidad: 4,4 m

volumen: 283,36 m³

velocidad de ascenso en el laboratorio: 0,15 m/min

flujo: 518,4 m³/h

Tiempo de retención = volumen/flujo = 0,54 h

Velocidad de ascenso = profundidad/tiempo = 8,14 m/h = 0,14 m/min

La velocidad de ascenso del sistema de FAD calculada tiene una magnitud muy cercana a la determinada en laboratorio.

-Tasa de escurrimiento hidráulica

Area superficial = largo·ancho = 64,4 m²

Flujo del FAD = Flujo +(flujo·20%) = 518,4 + (518,4·0,2) = 622 m³/h

Tasa de escurrimiento H = flujo del FAD/área = 9,65 m³/m² h = 232 m³/m² d

La tasa de escurrimiento hidráulica para el sistema de FAD se encuentra en el rango establecido siendo este de 72-480 m³/m² *d

-Tasa de escurrimiento de sólidos (tasa de carga superficial)

Carga de SST= (flujo·concentración)/área= 140,5 lb/h /693 pie² = 0,20 lb/h pie²

La tasa de escurrimiento de sólidos para el sistema de FAD se encuentra por debajo del rango establecido, siendo este de 1-6 lb/h pie², sin embargo el objetivo es no exceder este valor y degradar los sólidos antes de que se separen por el sistema de cadena y paleta.

Para realizar la simulación se utilizó el Microsoft Excel.

-Relación aire/sólido (A/S)

$A/S = C_s \cdot R \cdot (f \cdot P - 1) / (Q_o \cdot X_o)$

Datos

C_s = 20,9 mg/l a 30°C

X_o (mg/l) de 0,16-8

P (atm) = 6

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

$f(0,5-0,8) = 0,65$

Nomenclatura

Xo: solubilidad del aire

Cs: valor de saturación para aire disuelto

Qo: flujo de alimentación

R: flujo de reciclaje

f: fracción de saturación en el tanque de aereación

Se puede graficar A/S en función de la variación de R, P o f, el comportamiento de la clarificación podría diferir en cada variación. Si se fija f o P, se obtiene el efecto de R sobre A/S.

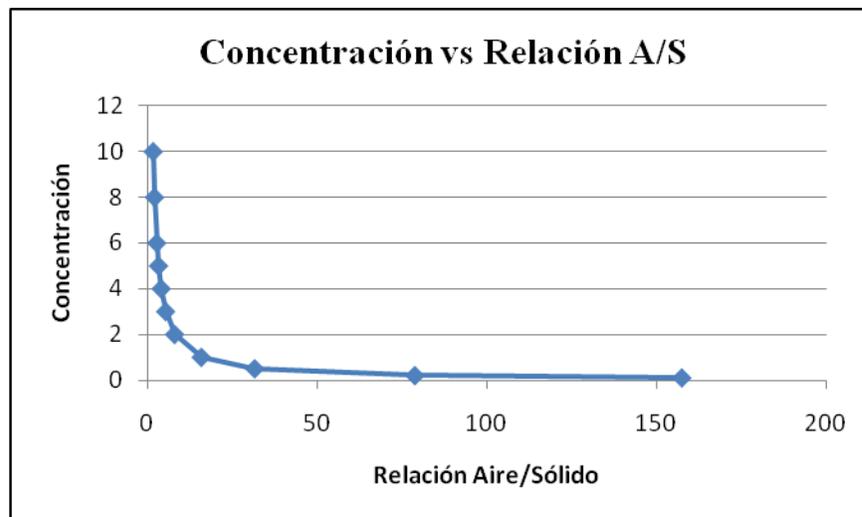


Figura 2.8 Concentración vs Relación A/S

El gráfico muestra que a medida que aumenta la relación aire/sólido disminuye la concentración, pero no lo suficiente como para estar en el rango establecido entre 0,01- 0,2, siendo estos valores para altas concentraciones de sólidos disueltos, los valores determinados para el sistema FAD son elevados por la pequeña concentración de los sólidos.

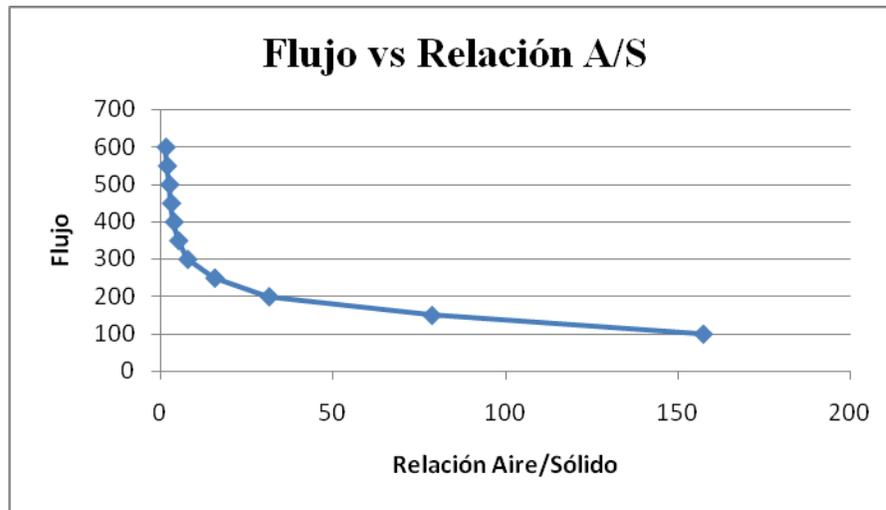


Figura 2.9 Flujo vs Relación A/S

A medida que aumenta la relación aire/sólido disminuye el flujo, encontrándose con un comportamiento adecuado. Es decir, los aumentos de flujo determinan que el sistema requiera menor suministro de aire, por tanto aumentos excesivos de aire pueden alterar el proceso de flotación, tanto en los lodos como en el flotado.

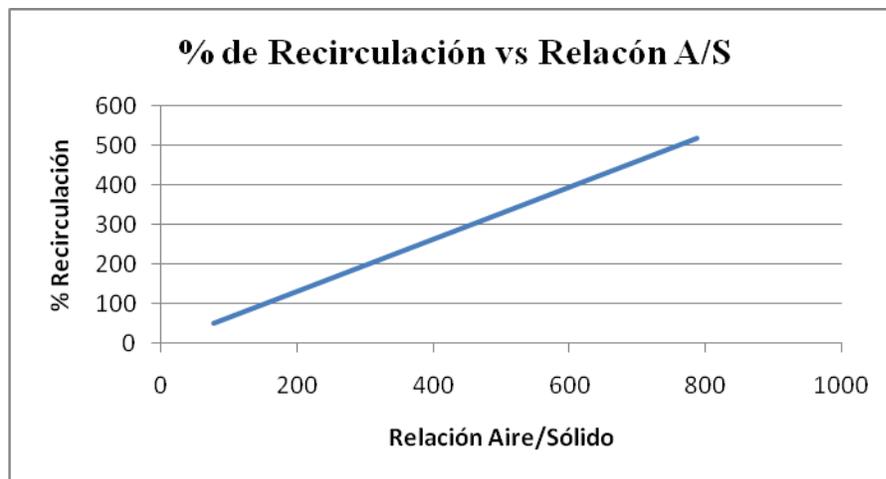


Figura 2.10 Por ciento de Recirculación vs Relación A/S

La Figura 2.10 muestra la relación del por ciento de recirculación con la relación aire/sólido (A/S) donde se observa que esta aumenta progresivamente con el por ciento de recirculación, por tanto, la recirculación de agua determina la relación aire /sólidos en la celda, lo cual debe ser lo más alta posible; sin embargo, una recirculación excesiva puede producir turbulencia que destruiría flóculos débiles, afectando la eficiencia del FAD (Salas, 2004).

2.3.7 Identificación de deficiencias operacionales.

-Efecto de la presión en la concentración de aire que sale del tanque de presurización (P vs Cp).

$$C_p = f \cdot C_s \cdot (P/1 \text{ atm})$$

$$C_p = 0,65 \cdot 20,9 \cdot (P/1 \text{ atm})$$

$$C_p = 13,58 \cdot (P/1 \text{ atm})$$

Nomenclatura

Cp: concentración del aire disuelto que sale del tanque de presurización (mg/l)

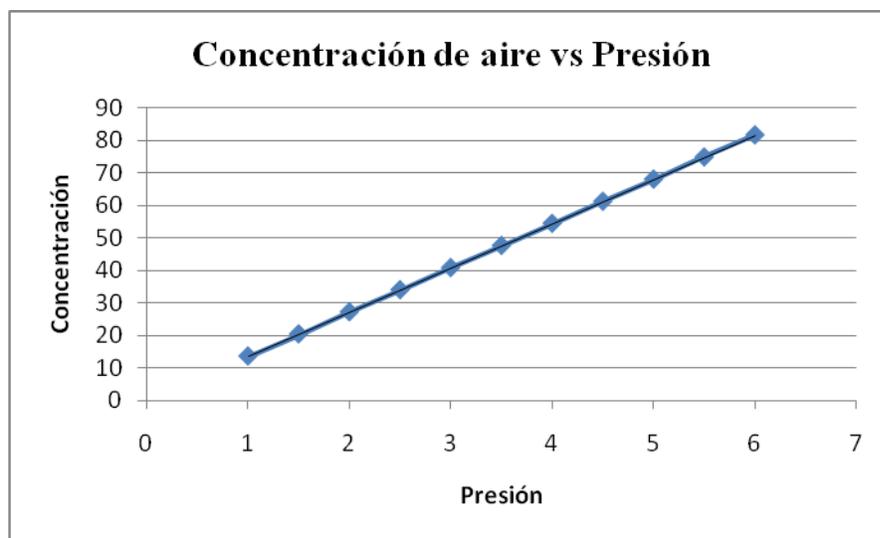


Figura 2.11 Concentración de aire vs Presión

A medida que aumenta la presión aumenta la concentración del aire disuelto, no encontrándose ninguna anomalía en esta relación, excepto cuando la presión de aire no se encuentra en el rango definido por tecnología.

-Efecto del flujo en la velocidad de ascenso de las burbujas (Vt vs Qo)

$$V_t = (Q_o + R) / A_s$$

$$A_s = 3,9 \text{ m}^2$$

Nomenclatura

As: área de flotación

Vt: velocidad de ascenso del lodo, m/min

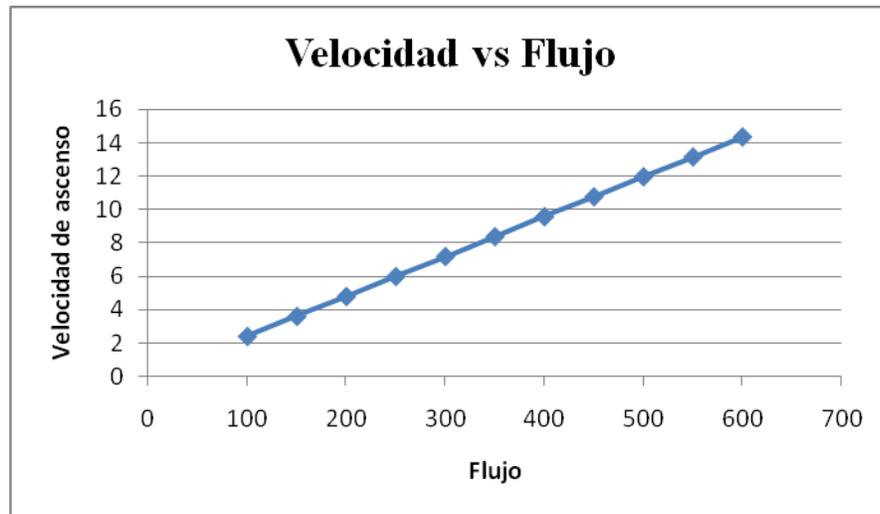


Figura 2.12 Velocidad vs Flujo

A medida que aumenta el flujo aumenta la velocidad de ascenso del lodo, encontrándose con un comportamiento normal para las condiciones de este proceso. Aquí se manifiesta la importancia del control del flujo al equipo de FAD.

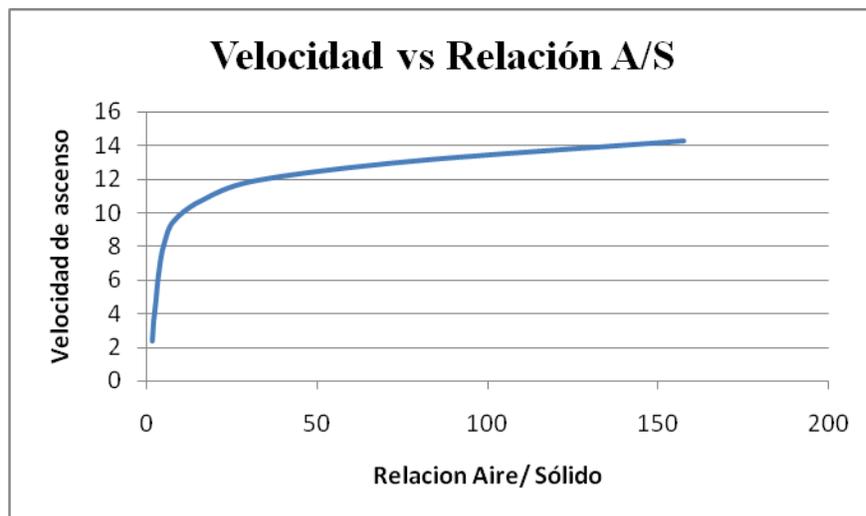


Figura 2.13 Velocidad vs Relación A/S

En el gráfico se muestra que a medida que aumenta la relación aire/sólido aumenta la velocidad de ascenso del lodo, encontrándose con un comportamiento adecuado, siempre que se mantenga un tamaño requerido de las burbujas, pues con aumento considerable del flujo de aire puede provocar aumento del tamaño de la burbujas, provocando efectos contrarios, como la formación de espumas,

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

turbulencia; contrarrestando el ascenso normal de la partículas. En este caso se obtiene una velocidad de ascenso de 0,17 m/min (6,63 pulg/min) superior al rango reportado en el Capítulo I.

2.3.8 Sistema de control automático.

La característica principal del **DAF** es la total automatización del tratamiento, centrándose principalmente en el tanque de presurización donde se crea una microburbuja de calidad y se controlan todas las variables que pueden influir, de esta manera, se tiene la total garantía de que no se va a producir en ningún momento una ruptura de la microburbuja en el interior del **DAF**, lo que podría provocar un vertido no deseado.

En este modelo, se puede con un solo botón, encender y parar todo el proceso, siguiendo una serie de pasos que no necesitarán de la supervisión de ninguna persona encargada.

-Controles

- ✓ Presión de la bomba de agua y de aire, con electroválvulas para poder regular ambas.
- ✓ Niveles en el tanque, de esta manera se permite ajustar la proporción exacta entre aire y agua.
- ✓ Dosificación de producto químico, con parada de la planta en caso de fallo
- ✓ Arranque de la bomba de entrada de agua bruta cuando ya se ha creado microburbuja en el interior del DAF y parada en caso de fallo de alguno de los pasos
- ✓ Todos los pasos están controlados por niveles o presiones, no por tiempo, teniendo así la certeza absoluta de que la planta va a tratar el efluente en las condiciones ideales, garantizando así los rendimientos adecuados.

En la Figura 2.14 se muestra el esquema de control automático para el sistema FAD.

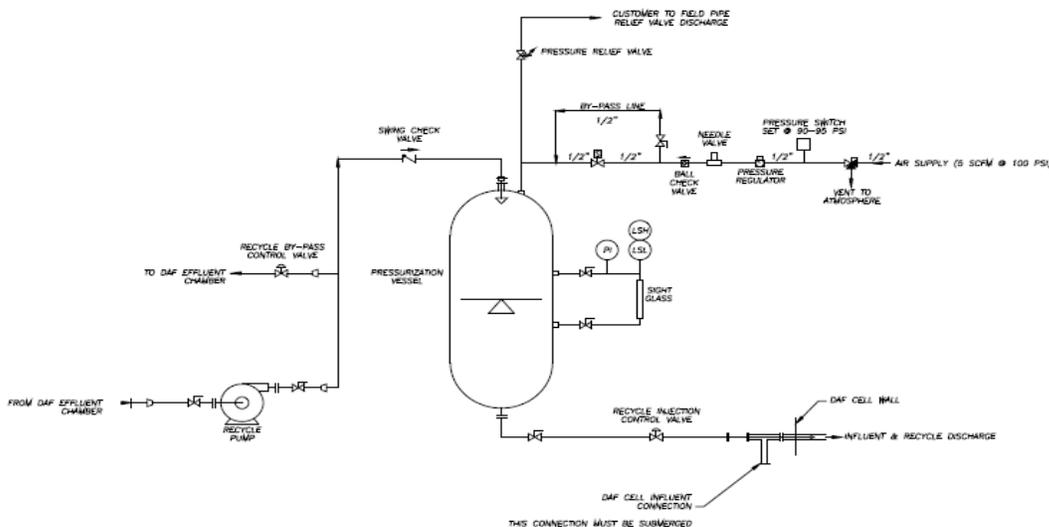


Figura 2.14 Esquema de control automático para el sistema FAD.

Capítulo II. Aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y el agua en la fábrica de papel.

Conclusiones parciales

1. El diagnóstico energético realizado en las actuales condiciones de operación muestra un 18 % de pérdidas por concepto de deficiente aislamiento, vertimiento de condensados y fugas de vapor, con una eficiencia térmica general de 86 %, considerando la recuperación de un 50 % del condensado, siendo 70 % por diseño original.
2. El esquema térmico modificado presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de contrapresión KKK (Siemens) CFR 5 G5 de 1 MW, operando en paralelo con el turbogenerador actual de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW; la continuidad de la generación de vapor con una caldera de 23 000 kg/h; la rehabilitación de una caldera similar operando a menor capacidad o instalación de una de 14 t/h y la supresión de una válvula reductora, logrando con este esquema, reducir las pérdidas energéticas hasta el 3 %.
3. La selección y diseño del sistema de FAD se ha basado en el tipo de residual, en las ofertas de Empresas exportadoras y en los procedimientos analíticos, siendo seleccionado un equipo con fondo tipo V con un flujo de 500 m³/h fabricado por JinWanTong Environmental Science and Technology Co., Ltd.
4. Las anomalías operacionales principales del proceso están asociadas a un deficiente control de la cantidad de burbujas, a una inestable operación continua, a un deficiente mantenimiento de la presión del sistema, del flujo de aire y del flujo de agua clarificada recirculada.
5. La característica principal de la FAD es la total automatización del tratamiento, centrándose principalmente en el tanque de presurización, donde se controla, el flujo de agua hacia el equipo de flotación y hacia el tanque de presurización, el flujo y la presión de aire hacia el tanque de presurización y el flujo de agua clarificada hacia el equipo de flotación.

Capítulo III: Evaluación económica.

La evaluación económica del sistema termoenergético y del sistema de circulación de aguas blancas de la papelera, incluye la estimación del costo de inversión del nuevo sistema de cogeneración y del sistema de flotación por aire disuelto (FAD), así como selección del equipamiento por ofertas internacionales; la determinación de los costos de operación del sistema de FAD; la determinación de los beneficios o ahorros netos por concepto de condensado recuperado, agua fresca, consumo de Fuel Oil y electricidad, y la determinación de los indicadores de rentabilidad tales como el VAN, la TIR y el PRD.

3.1 Análisis económico del sistema energético.

El costo de inversión para un turbogenerador completo a contrapresión (US.DOE, 2012) varía desde 900 \$/kW para un sistema pequeño (150 kW) y hasta menos de 200 \$/kW para un sistema mayor (2000 kW).

El costo de instalación varía dependiendo del sistema de tuberías, típicamente en un promedio de 75% del costo de equipamiento. El costo de adquisición del turbogenerador es de \$ 900 000,00 (CUC), estimado por (Turbine, 2003) y un gasto de salario de 12000 CUP/año (\$ 480,00/año). No se consideran otros costos de operación, atendiendo que son similares a los costos actuales. Se adopta como vida útil un periodo de 15 años.

-Consumo de combustible.

$$\frac{G_{cald}}{cons_{comb}} = \frac{19711}{1317} = 14 \text{ kgv/kcomb}$$

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{Q_{cald}}{VCN} = \frac{15347 \text{ kW}}{10300 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} * 0.00027 \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}}} = 1317 \text{ kg/h}$$

$$\text{Costo anual de combustible} = 1317 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{d}} * \frac{300 \text{ d}}{\text{año}} * \frac{458,40 \$}{\text{t}} = 4346732,16 \$$$

-Ahorro de electricidad.

$$983 \frac{\text{kWh}}{\text{h}} * 197,86 \frac{\$}{\text{MWh}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} * 300 \frac{\text{d}}{\text{año}} = 1400373,94 \$/\text{año}$$

Capítulo III: Evaluación económica.

Tabla 3.1 Beneficios económicos por concepto de ahorro de agua, combustible y electricidad.

<i>Denominación</i>	<i>Ahorro de recursos materiales</i>	<i>Ahorro de recursos financieros (\$/año)</i>
Agua de reposición	16 804,3 kg/h	12 123
Consumo de Fuel Oil	217 kg/h	716 204
Electricidad	7 077 600 kWh/a	1 400 374
Total		2 128 701

Nota: Los precios adoptados para el análisis de rentabilidad son los que actualmente utiliza la fábrica de papel, siendo 0,1 \$/m³, 458,4 \$/t y 197,86 \$/MW, para el agua, combustible y electricidad, respectivamente.

3.2 Análisis económico del sistema terciario de circulación de aguas blancas.

-Costo de adquisición del agua fresca

El agua fresca que es utilizada por la entidad proviene de un río aledaño a la misma. Por tal concepto la fábrica debe pagar 0,10 \$/m³ de agua fresca sustraída a dicha fuente. El consumo de agua fresca de la entidad obtenido de acuerdo con las condiciones reales de operación es de 19440 m³/d.

$$19440 \text{ m}^3/\text{d} \times 0,10 \text{ \$}/\text{m}^3 = 1944 \text{ \$}/\text{d}$$

-Costo de los efluentes

Según las condiciones reales de operación el flujo de residuales generado es de 518,4 m³/h, asociado a la inexistencia de un sistema terciario para el cierre del ciclo de agua en la máquina de papel. Si se considera que se recupera el 90 % del agua de proceso con el nuevo sistema de recuperación de agua y fibra, se obtiene un ahorro de 466,56 m³/h que significan 3359232 m³/año y un ahorro de 335923,2 \$/a.

-Costo de la fibra vertida equivalente a materia prima.

La cantidad de fibra vertida por la entidad de acuerdo con las condiciones reales de operación, es de 1,53 t/d. Además, se tuvo en cuenta la formulación utilizada como materia prima para determinar dicho costo. En tabla 3.2 se resume dicho aspecto.

Capítulo III: Evaluación económica.

Tabla 3.2 Costo de la fibra vertida.

<i>Tipo de materia prima</i>	<i>Costo unitario (\$/t)</i>	<i>% de materia prima</i>	<i>Flujo vertido (T/d)</i>	<i>Costo (\$/d)</i>
OCC Nacional	158,00	32	0,4896	77,35
DKL Importado	190,00	20	0,306	58,14
Recorte Corriente	147,12	48	0,7374	108,48
Total	-	100	-	243,97

Como se observa en la tabla 3.2 se obtiene un ahorro de fibra 243,97 \$/d que significa 73191 \$/año. Por tanto se obtiene un ahorro total de 409114,2 \$/año.

-Costo del equipo de flotación por aire disuelto (FAD) según la metodología del (Ulrich, 1985)

$$V = 10006 \text{ pie}^3$$

$$\text{Costo de la celda de flotación} = 15,00 \text{ \$/pie}^3$$

$$\text{Costo del Equipo (1970): } C_e = 15,00 \text{ \$/pie}^3 * 10006 \text{ pie}^3 = 150090\$$$

$$\text{Costo Actual del equipo: } C_{ae} = C_e * I_{Ca} / I_{C_{1970}}$$

$$I_{C_{1970}} = 109,1$$

$$I_{C \text{ actual (Sep. 2014)}} = 580$$

$$C_{ae} = 797.912\$$$

Si se adoptan precios de importadoras, tomados de (Alibaba.Group, 2006), estos oscilan entre US \$ 5,180 - 60,027.

-Estimación del costo de inversión según (CONAMA, 2015).

Función de estimación de costo

Costo Inversión (US\$) con Caudal de tratamiento Q (m³/h)

$$Inv = 3772,2 * Q^{0,8967}$$

$$Inv = 1.025.262$$

$$R^2 = 1$$

Costo Tratamiento (US\$/m³) con caudal de tratamiento Q (m³/h)

$$C = 2,5424 * Q^{-0,745}$$

$$C = 0,024 \text{ \$/m}^3$$

$$\text{Costo de operación del sistema de FAD} = 0,024 * 518,4 * 24 * 300 = \$ 89.579 / \text{año}$$

$$R^2 = 0,9792$$

Capítulo III: Evaluación económica.

Los resultados de la estimación de los costos de inversión y de operación (tratamiento) mediante estas ecuaciones son superiores a los reportados por Empresas exportadoras, por lo que se adopta un valor intermedio de costo de adquisición para la evaluación económica (500 000 pesos).

Tabla 3.3 Aspectos para la determinación de la inversión fija del sistema de flotación.

<i>Parámetro</i>	<i>% (Peters, 1991)</i>	<i>Costo (\$)</i>
Costo de adquisición	-	500 000
Costo de instalación	39	23 400
Total Inversión Fija	-	523 400

3.3 Determinación del costo total de operación.

En la determinación del costo de operación se asumen las diferentes consideraciones:

- Consumo de electricidad en el equipo de flotación por aire disuelto.
- Consumo de electricidad de las bombas.
- Operadores de la estación.
- Mantenimiento.
- Consumo de aire comprimido.
- Depreciación.

3.3.1 Estimación del Tiempo de recuperación de la inversión

Para la estimación del tiempo de recuperación de la inversión es necesario conocer el costo del equipamiento seleccionado anteriormente.

Tabla 3.4 Costos de adquisición e inversión

<i>Equipo</i>	<i>Costo de adquisición (\$)</i>	<i>Costo de inversión (\$)</i>
Turbogenerador	900 000	1 575 000
Sistema de flotación por aire disuelto	500 000	523 400
Total	1400 000	2 098 400

Tabla 3.5 Costos de operación.

<i>Denominación</i>	<i>Costo (\$/año)</i>
Salario en turbogeneración (\$/año)	480,00
Costo de operación en FAD (\$/año)	89 579
Total	90 059,00

Tabla 3.6 Ingresos netos totales por concepto de ahorro

<i>Denominación</i>	<i>Ahorro (\$/año)</i>
Agua de reposición	12 123
Consumo de Fuel Oil	716 204
Electricidad	1 400 374
Agua	335 923,2
Fibra	243,97
Total	2 464 868,17

Tabla 3.7 Resultados del análisis de factibilidad.

<i>Indicadores de rentabilidad</i>	
Valor actual neto (VAN), \$	12 247 506,36
Tasa Interna de Rendimiento (TIR), %	100
Periodo de recuperación al descontado (PRD), años	2

3.3.2 Análisis de sensibilidad basado en el costo de adquisición.

Atendiendo a la incertidumbre en los costos de adquisición del equipamiento, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar la variación del VAN y PRD en función del costo inversión del equipamiento. La Tabla 3.8 y la Figura 3.1 muestran los resultados del análisis.

Tabla 3.8 Análisis de sensibilidad basado en el costo del inversión.

<i>Costo de inversión (\$)</i>	<i>Valor actual neto (VAN) (\$)</i>	<i>Periodo de recuperación al descontado (PRD) (años)</i>
200 000	12 656 616,41	1,6
300 000	12 520 246,39	1,8
400 000	12 383 876,37	1,9
500 000	12 247 506,36	2,0
600 000	12 111 136,34	2,1
700 000	11 974 766,32	2,2
800 000	11 838 396,31	2,3
900 000	11 702 026,29	2,4
1000 000	11 565 656,28	2,5

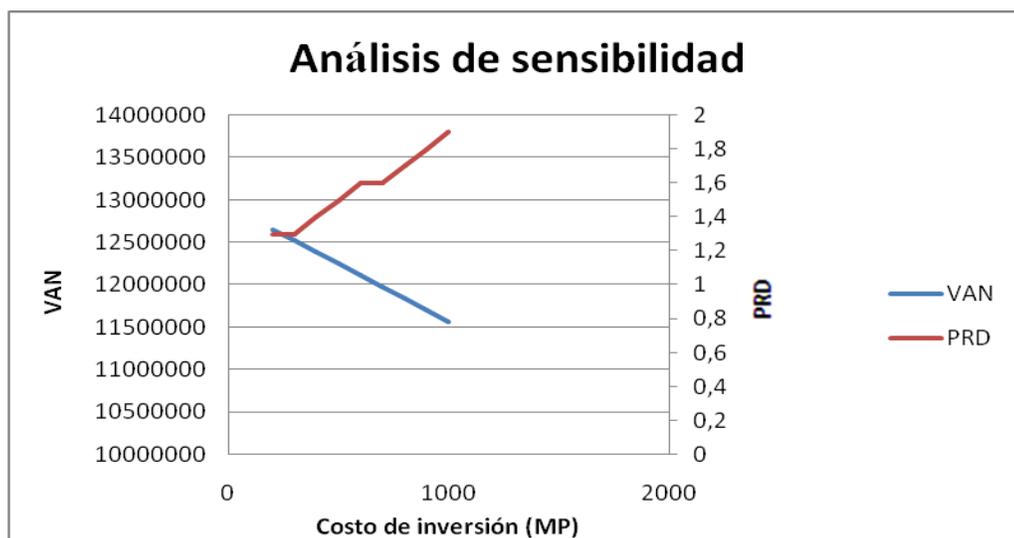


Figura 3.1 Análisis de sensibilidad.

Como se observa en la Figura 3.1 el VAN disminuye y el PRD aumenta, ambos con el aumento del costo de inversión. Los costos de inversión estimados tienen valores entre 200 000 y 1000 000 de pesos (USD). Las causas de la incertidumbre en los costos de adquisición están asociadas a imprecisiones en la información de Empresas comercializadoras, las cuales no ofrecen valores precisos o confiables y en un rango muy amplio. Por otra parte, los resultados de la estimación de costos de adquisición mediante ecuaciones reportadas por la literatura, están muy alejados de los costos reportados por Empresas.

Como resultado de la evaluación energética y del sistema de circulación de agua, se proponen los siguientes proyectos:

1. Instalación de un turbogenerador de 1 MW acoplado con un turbogenerador original de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW.
2. Rehabilitación de las redes de distribución de vapor, incluyendo reposición de aislamiento y la supresión de una válvula de reducción de presión.
3. Evaluación de la rehabilitación una caldera de vapor de 23 000 kg/h o incorporación de una caldera de 14 000 kg/h
4. Rehabilitación de los sistema de recuperación de condensados, tratamiento de agua y alimentación de agua a las calderas.
5. Selección, diseño, instalación y evaluación de un sistema de flotación por aire disuelto (FAD) para la recuperación de agua y fibra.

Conclusiones parciales.

1. Los beneficios económicos que se obtienen como resultado de la propuesta de un nueva tecnología de cogeneración y de flotación por aire disuelto son de 2 464 868,17 \$/a por concepto de ahorro de agua de reposición, combustible, electricidad, agua y fibra.
2. El análisis de sensibilidad se basa en los costos de inversión, atendiendo al nivel de incertidumbre en los costos de adquisición del equipamiento, principalmente para el tratamiento de aguas residuales en fábricas de papel.
3. Como resultado de la evaluación energética y del sistema de circulación de agua, se proponen cinco proyectos de inversión que contribuyen a elevar la eficiencia en el uso de la energía y del agua, con un VAN de 12 247 506,36; cuya inversión global se estima que se recupere en 2 años.

Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones.

1. En los sistemas de gestión de la energía, la Norma Cubana (50001, 2011) define el objeto y campo de aplicación, referencias normativas, términos y definiciones y los requisitos del sistema de gestión de la energía; este último aspecto incluye entre otros, la planificación energética en la cual la revisión energética constituye el elemento de mayor trascendencia en el proceso de gestión.
2. La FAD tiene una alta eficiencia en la remoción de sólidos, pero es sensible a variaciones de temperatura, sólidos en suspensión, recargas hidráulicas, variaciones químicas y fisicoquímicas y los costos operacionales son elevados ya que generalmente requiere un control riguroso automático de parámetros.
3. El esquema térmico modificado presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de contrapresión KKK (Siemens) CFR 5 G5 de 1 MW, operando en paralelo con el turbogenerador actual de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW; la continuidad de la generación de vapor con una caldera de 23 000 kg/h; la rehabilitación de una caldera similar operando a menor capacidad o instalación de una de 14 t/h y la supresión de una válvula reductora, logrando con este esquema, reducir las pérdidas energéticas hasta el 3 %.
4. La selección y diseño del sistema de FAD se ha basado en el tipo de residual, en las ofertas de Empresas exportadoras y en los procedimientos analíticos, siendo seleccionado un equipo con fondo tipo V con un flujo de 500 m³/h fabricado por JinWanTong Environmental Science and Technology Co., Ltd.
5. Como resultado de la evaluación del sistema de FAD se identifican deficiencias operacionales potenciales, tales como: deficiente control de la cantidad de burbujas, una inestable operación continua, un deficiente mantenimiento de la presión del sistema, del flujo de aire y del flujo de agua clarificada recirculada.
6. Como resultado de la evaluación energética y del sistema de circulación de agua, se proponen cinco proyectos de inversión que contribuyen a elevar la eficiencia en el uso de la energía y del agua, con un VAN de 12 247 506,36; cuya inversión global se estima que se recupere en 2 años.

Conclusiones y Recomendaciones.

Recomendaciones.

1. Realizar estudios de evaluación comparativa (benchmarking) para seleccionar una tecnología de tratamiento de las aguas residuales que sea técnica y económicamente factible para la clarificación y reuso del agua blanca residual.
2. Utilizar los resultados obtenidos en el presente trabajo para la realización de estudios de prefactibilidad de un proyecto de inversión de un sistema de recuperación de agua y fibra en la máquina de papel.
3. Realizar el diseño y evaluación del equipo de flotación por aire disuelto mediante metodologías reportadas en la literatura, a partir de parámetros que actualmente no están disponibles.

Referencias bibliográficas.

Referencias bibliográficas.

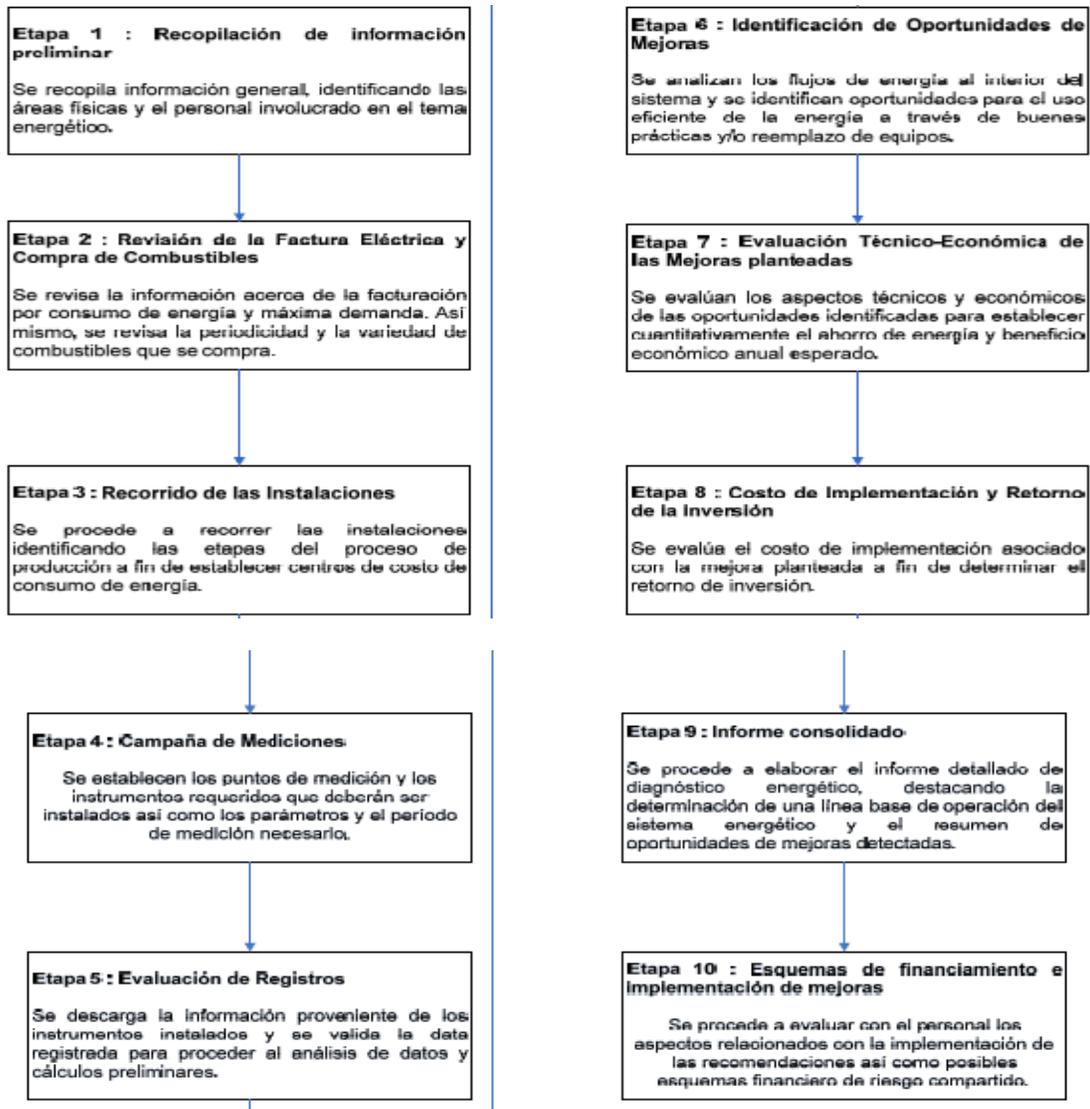
1. 50001, N. I. 2011. *Sistemas de gestión de la energía- Requisitos con orientación para su uso*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización (NC).
2. (STEAM), I. 2015. Available: http://www.midwestchptap.org/Archive/pdfs/060216_Industrial_Steam.pdf. [Accessed]:12/03/16.
3. ACCESSSCIENCE. 2016. *Sedimentation (industry)* [Online]. McGraw-Hill Global Education Holdings. Available: <http://www.accessscience.com/content/sedimentation-industry/612300> [online]. [Accessed]:04/05/16.
4. ACOGEN, C. 2013. *Acogen-congeneración*. [Online]. Available: <http://www.acogen.org/post/informe-acogen-congeneración> [Online]. [Accessed]:21/03/16.
5. ALCALA-GALIANO, A. P., TUIJA 1998. "*Gestión del Agua en la Industria Papelera*".
6. ALEMAYEHU, Z. 2015. *Dissolved Air Flotation. Water Treatment* [Online]. Available: <https://aaucivil.files.wordpress.com/2010/10/dissolved-air-flotation.pdf> [Online]. [Accessed]:30/04/16.
7. ALIBABA.GROUP. 2006. *DAF plant for paper mill wastewater treatment* [Online]. Available: http://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Industrial_Wastewater_Treatment_Plant_Factory.html [Accessed]:16/04/16.
8. BORA, K. 2008. *Energy Management in pulpa and paper industry*. [Online]. Available: www.ripublication.com [Online]. [Accessed]:26/03/16.
9. BORROTO, A. E. 2006. *Gestión energética en el sector productivo y los servicios*. , Cienfuegos., Editorial Universidad de Cienfuegos.
10. C. NEGRO, M. A. B., I. GASPAR Y J. TIJERO. 1995. *El Agua en la Industria Papelera*.
11. CAMPOS, A. Y. C. 2015. *Cogeneración*. .
12. CNEE. 2010. *Diagnósticos energéticos.FIDE* [Online]. Available: www.cnee.gob.gt [Online]. [Accessed]:10/04/16.
13. COAKLED, T. 2010. *Uso de la energía en el sector industrial*. [Online]. Available: www.iuses.eu/materiali/e/MANUALES_PARA.../Manual_industria.pdf [Online]. [Accessed]:30/03/16.
14. CONAE 1995. *Diseño de sistemas de cogeneración*. , México.
15. CONAE 2011. *Diseño de sistemas de cogeneración*., México, Amacalli Editores, SA.
16. CONAMA. 2015. *Tecnologías de flotación por aire disuelto*. [Online]. Available: http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_03.pdf [Online]. [Accessed]:15/04/16.
17. COURSEHERO. 2016. Available: <https://www.coursehero.com/file/10527592/Sedimentation-1/> [Accessed]:26/04/16.
18. DONALD, Q. K. 1969. *Proceso de transferencia de calor*., Editorial Felix Varela.
19. EGRANCONEL. 2006. *Optimizar la eficiencia energética en la industria del ecuador*. [Online]. Available: www.Egranconel.com [Online]. [Accessed]:17/04/16.
20. ESPINOSA, R. 1990. *Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera*., La Habana.
21. ESPINOSA, R. Y. C. 2014. *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*., Editorial Feijoo.

Referencias bibliográficas.

22. GROSS, F. C., V, RICHTER, C. 2015. *Clarificación de agua por flotación con aire disuelto – Aplicaciones desarrolladas en Uruguay y Brasil* [Online]. Available: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02273e20.pdf> [Online]. [Accessed]:13/04/16.
23. HERNANDEZ, M. L. 2010. *Los diagnósticos energéticos* [Online]. Available: www.fonanperu.org [Accessed]:14/04/16.
24. KEENAN, J. 1978. *Steam table*.
25. LOHRMANN, I. 2015. *Power Plants Oil Refineries Sale and Relocation*. [Online]. Germany. Available: http://www.lohrmann.com/fileadmin/dynamictable/offer_steamturbinegenerators/STG-29.17_Short.pdf [online]. [Accessed]:23/05/16.
26. MAJONIN, A. 1976. *Principios de la tecnología papelera.*, Editorial Félix Varela.
27. MCKEEN, L. 2003. *Alternativas para la integración energética de la fábrica de papel de Damují.* . Trabajo de Diploma., Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
28. MIJEEV, M. A. 1988. *Fundamentos de termotransferencia.* , La Habana., ENPES. .
29. NORDELO, A. B. 2013. *Recomendaciones metodológicas para la implementación de sistemas de gestión energética según la norma iso 50001.*, Cienfuegos.
30. PÁVLOV, K. F. 1981. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aspectos en tecnología química.* , Moscú., Editorial Mir.
31. PETERS, M. S. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.
32. SALAS, G. 2004. *Diseño de un Flotador por Aire Disuelto (DAF) en el tratamiento del agua residual de una industria textil*.
33. SALOME, J. A. 2004. Goikoetxea. Available: <http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-3.PDF> [Accessed]:21/03/16.
34. STROMERZEUGER-DISCOUNT. 2015. Available: <http://www.stromerzeuger-discount.com/index.html> [Online]. [Accessed]:21/14/16.
35. TURBINE, B. P. 2003. Available: <http://www.backpressureturbine.com> [Online]. [Accessed]:31/04/16.
36. ULRICH, G. 1985. *Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química.* .
37. US.DOE. 2012. *Consider Installing High-Pressure Boilers with Backpressure Turbine-Generators, Advanced Manufacturing Office Energy Efficiency and Renewable Energy* [Online]. Available: <http://manufacturing.energy.gov> [Online]. [Accessed]:19/04/16.
38. WORD, M. 2015. *The Cost of Producing Electricity*. [Online]. Available: <http://www.maintenanceworld.com/the-cost-of-producing-electricity/> [Accessed]:20/041/16.
39. XAVIER, F. 2008. *Los sistemas de gestión de emisiones y energía como primer punto de prevención para la reducción de emisiones de CO2*. [Online]. Available: www.riadicy.org.ar [Online] [Accessed]:03/03/16.

Anexos

Anexo 1 Pasos de un diagnóstico energético.



Anexo 2 Principales usos del agua en esta industria.

<i>Aplicaciones del agua en la fabricación de papel</i>		
Usos	Función	Ejemplos
Agua de proceso	Transporte	Transporte de fibras, aditivos, cargas, etc.
	Dilución	Ajuste de la consistencia, preparación de aditivos
Agua para rociadores y toberas	Mojado	Mojado de la tela de formación
	Lubricante	Rodillo de cabeza, de retorno de la tela, tensor, conductor, caja uñe, etc.
	Corte, desbarbe	Recorte de los laterales de la banda de papel
	Limpieza	Limpieza de la tela de formación, del fieltro, de los rodillos
	Dilución	Caja de alimentación
	Enfriamiento	Rodillos guía, rodillo superior, partes mecánicas
	Antiespumante	Células de flotación, caja de alimentación, etc.
Agua de refrigeración	Enfriamiento	Sistemas de bombas, sistemas de accionamiento de máquinas, fluidos de lubricación, calandrado, etc.
Agua de caldera	Producción de vapor	Cilindros secadores
Agua de sellado	Sellado	Cajas de vacío, bombas, etc.
Agua de limpieza	Transporte	Limpieza de la máquina, depósitos, tuberías.

Anexo 3 Importancia de estos parámetros en función del tipo de fibra utilizada.

<i>Contribución a la contaminación del agua de proceso de los distintos tipos de pasta</i>			
Tipo de pasta	Contenido partículas finas	Contenido materia orgánica soluble	Contenido en microorganismos
Mecánica	alto	alto	moderado
Química blanqueada	bajo	bajo/moderado	bajo
Reciclada sin destintar	moderado/alto	moderado/alto	alto
Reciclada destintada	bajo/moderado	bajo	moderado

Anexo 4 Datos utilizados en la realización del balance energético en la sección de secado.

<i>Elementos a evaluar</i>	<i>Unidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Magnitud</i>
Ancho del papel	M	B	3.70
Velocidad de la maquina	m/min	V	90
Peso básico llevado a 100% de sequedad	Kg/m ²	PB	
Sequedad final en fracción	----	SAF	0.94
Capa calorífica del papel	Kj/kg °C	CPL	1.3
Temperatura del papel a la entrada y salida de la sección secadora	°C	TI TF	33 46.63
Sequedad inicial	%	SI	32
Cap calorífica del agua	Kj/kg °C	CP2	1.3
Sequedad final	%	SF	94
Contenido calórico del papel a la temp media del secado	Kj/kg	I	2644
Temp media del secado	°C	TMS	73.6
Long. partes libres del papel/e/los cilindros	m	L	1.2
Cantidad de partes libres	-----	N	41
Temperatura del aire que rodean al papel	°C	TB1 TB2 TB3 TB4 TB5 TB6	53 66 69 56 49 45
Perímetro de contacto del papel con el cilindro	m	PCP	3.57
Perímetro de la tambora	m	PT	4.77
Perímetro de contacto fieltro-cil	m	PCF	2.38
Long total de los fieltros	m	LT	334.65
Ancho del fieltro	m		
Diám. cilindro secador del papel	m	DP	1.52
Número de cilindros secadores de papel	----	NP	41
Espesor tapa tope del cilindro	m	ET	0.054
Coeft.termoconductividad del material	W/m ² °C	LAN1	62.8
Temp.del vapor en cil/grupos			
Número de cilindros secadores por grupos	----	N1 N2 N3 N4 N5 N6	2 4 8 18 3 6
Espesor del fieltro	m	GA2	0.005

Coef. termoconductividad del papel	W/m ² °C	LAN2	0.0465
Temperatura del vapor vivo	°C	TH	140
Contenido de calor, vapor vivo.	°C	TH	2732.3

Anexo 5 Cálculo del gasto útil de calor para el secado del papel (Qump).

Tabla 1 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Qump.

<i>Q1.1</i> : Cantidad de calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca que está en el papel secado al aire (kJ/h)	<i>Q1.2</i> : Cantidad de calor para el calentamiento del agua que se queda en el papel seco al aire (kJ/h)
<i>Q1.3</i> : Cantidad de calor necesario para la evaporación (kJ/h)	<i>G</i> : Masa del papel absolutamente seco 3135,5 (kg/h)
<i>Cp</i> : Capacidad calorífica del papel absolutamente seco (1,22 ÷ 1,30), (kJ/kg °C)	<i>Ti; Tf</i> : Temperatura inicial y final del papel (°C)
<i>Wi</i> : Masa de agua en el fieltro mojado que se suministra para el secado del papel (kJ/h)	<i>Cp_{AGUA}</i> : Capacidad calorífica del agua (kJ/kg °C)
<i>Si</i> : Sequedad inicial (32%)	<i>W</i> : Cantidad de agua que se vaporiza en el papel (kg/h)
<i>i</i> : Contenido de calor que se vaporiza en el papel	<i>Tms</i> : Temperatura media del secado
<i>Sf</i> : Sequedad final	

$$\eta_{mp} = \frac{Q_{ump}}{Q_{tmp}} \quad (2.1)$$

$$Q_{ump} = Q1.1 + Q1.2 + Q1.3 \quad (2.2)$$

$$Q_{ump} = 15536500,25 \text{ KJ/h}$$

$$Q1.1 = G * Cp * (Tf - Ti) \quad (2.3)$$

Sustituyendo en 2.3

$$Q1.1 = 3173,5 * 1,30 * (62,4 - 53,1) \quad (2.4)$$

$$Q1.1 = 38362,5 \text{ KJ/h}$$

$$Q_{1.2} = W_1 * C_{p_a} * (T_f - T_i) \quad (2.5)$$

$$C_{p_{AGUA}} = 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ figura XI (Pávlov, 1981)}$$

$$W_i = \frac{G * (100 - S_i)}{S_i}$$

$$W_i = 6743,6 \text{ kg/h}$$

Sustituyendo en 2.5

$$Q_{1.2} = 6725,64 * 4,18 * (62,4 - 53,1)$$

$$Q_{1.2} = 262777 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{1.3} = W * (i - C_p * T_{ms}) \quad (2.6)$$

$$i = 2644 \text{ kJ/kg (figura 12) (Donald, 1969).}$$

$$T_{ms} = 73,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W = \frac{G * (100 - S_i)}{S_i} - \frac{G * (100 - S_f)}{S_f}$$

$$S_f = 94\%$$

$$W = 6541 \text{ kg/h}$$

Sustituyendo en 2.6

$$Q_{1.3} = 6541 * (2644 - 4,19 * 73,6)$$

$$Q_{1.3} = 15279776 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de las pérdidas térmicas en la máquina de papel (Q_{tmp}).

Tabla 2 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Q_{tmp} .

Q1: Pérdidas de calor por las partes libres de la hoja de papel (kJ/h)	Q2: Pérdidas de calor por las partes libres de los fieltros secadores (kJ/h)
Q3: Pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de papel (kJ/h)	Q4: Pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de fieltro (kJ/h)
Q5: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de papel (kJ/h)	Q6: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro (kJ/h)
Q7: Pérdidas de calor por la superficie lateral	Q8: Pérdidas de calor por la superficie lateral de

de los cilindros cubiertos de papel y fieltro (kJ/h)	los cilindros secadores cubiertos de papel; pero no cubiertos de fieltro (kJ/h)
Q9: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros cubiertos de fieltro; pero no cubiertos de papel (kJ/h)	Q10: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro cubiertos de fieltro (kJ/h)

$$Q_{pmp} = \sum_1^{10} Q_{mp} \quad (2.7)$$

Cálculo de las pérdidas de calor por las partes libres de la hoja de papel (Q1), kJ/h.

Tabla 3 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Q1.

F_p : Superficie de las partes libres de la hoja de papel de los lados (m)	b: Ancho del lienzo del papel (condicionalmente aceptado igual al ancho total del papel en el bobinado (m)
α_1 : Coeficiente de emisión térmica del papel al aire ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	n: Cantidad de partes libres, se acepta igual al número de secadores
T_m : Temperatura media del papel en las partes libres (igual a la temperatura media de secado) ($^\circ C$)	V: Velocidad de la máquina (m/s)
L: Longitud de la parte libre del papel entre los cilindros (m)	

$$Q_1 = F_p * \alpha_f * ([T_{ms} - T_{bi}] + \dots + (T_{ms} - T_{b6})) \quad (2.8)$$

$$F_p = 2 * L * b * n \quad (2.9)$$

Sustituyendo en 2.9

$$F_p = 2 * 1,2 * 3,7 * 41$$

$$F_p = 364,08 \text{ m}^2$$

El coeficiente de emisión térmica se puede determinar por la fórmula empírica siguiente:

$$\alpha_1 = 5,58 + 3,95 * V \quad (2.10)$$

$$\alpha_1 = 5,58 + 3,95 * 1,5$$

$$\alpha_1 = 11,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

Sustituyendo en 2.8

$$Q_1 = F_p * \alpha_f * ([T_{ms} - T_{bi}] + \dots + (T_{ms} - T_{b6}))$$

$$Q1 = 364,08 * 11,5 *$$

$$\left[(73,6 - 53) + (73,6 - 66) + (73,6 - 69) + (73,6 - 56) + (73,6 - 49) + (73,6 - 45) \right]$$

$$Q1 = 1552509,9 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por las partes libres de los fieltros secadores (Q2) (kJ/h).

Tabla 4 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Q2.

F_c : Superficie de las partes libres de los fieltros (m ²)	N_p : Cantidad total de cilindros
α_2 : Coeficiente de emisión térmica para la superficie rugosa del fieltro	B_f : Coeficiente medio de los arcos de los cilindros secadores de fieltro (W/m ² °C)
AB : Ancho del fieltro (m)	B_p : Coeficiente medio del arco en los cilindros secadores, cubiertos de papel
L_t : Longitud total de los fieltros (m)	PCP : Perímetro del papel en contacto con el cilindro
D_p : Diámetro de los cilindros (m)	PCF : Perímetro de contacto del fieltro con el cilindro
PT : Perímetro de la tambora	α_2 : se determina por la fórmula empírica de la superficie rugosa

$$Q2 = F_c * \alpha_2 * \sum (T_m - T_{b1}) \quad (2.11)$$

$$F_f = 2 * AB * \left[L_t - (\pi * D_p * n_p * B_p + \pi * D_f * n_f * B_f) \right] \quad (2.12)$$

$$B_p = PCP / PT$$

$$B_p : 0,63 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$B_f : 0,5 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

Sustituyendo en 2.12

$$F_f = 2 * AB * \left[L_t - (\pi * D_p * n_p * B_p + \pi * D_f * n_f * B_f) \right] \quad (2.12)$$

El segundo término de la ecuación se anula porque en la sección de secado no existen cilindros secadores de fieltro.

$$F_f = 423,2 \text{ m}^2$$

$$\alpha_2 = 6,16 + 4,187 * V$$

$$\alpha_2 = 10,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo en 2.11

$$Q_2 = 423 * 10. [(73,6 - 53) + (73,6 - 66) + (73,6 - 69) + (73,6 - 56) + (73,6 - 49) + (73,6 - 45)]$$

$$Q_2 = 17104557,6 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de papel (Q3) (kJ/h).

Tabla 4 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Q3.

F :Superficie de tope de un cilindro (m ²)	α_f :Coeficiente de emisión térmica del vapor para la pared del cilindro (W/m ² °C)
K_1 :Coeficiente de transferencia de calor del vapor al aire a través de la pared del cilindro	α_t :Espesor de la tapa del tope del cilindro (m)
n : Número de cilindros secadores por grupo	λ_1 :Coeficiente de termo conductividad del material (para el hierro fundido)
$T_{v1}, T_{v2}, T_{v3}, T_{v4}, T_{v5}, T_{v6}$:Temperatura promedio del vapor en los cilindros secadores por grupo	α_3 :Coeficiente de emisión térmica de la pared del tope del cilindro al aire (W/m ² °C)
α_3 : Se determina mediante una fórmula empírica	

$$Q_3 = (2 * F * K_1 * [(T_{v1} - T_{b1}) * n_1 + (T_{v2} - T_{b2}) * n_2 + \dots + (T_{v6} - T_{b6}) * n_6]) \quad (2.13)$$

$$F = 3,14 * \frac{dp^2}{4} \quad (2.14)$$

$$F = 3,14 * \frac{(1,5)^2}{4}$$

$$F = 1,766 \text{ m}^2$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha F} + \frac{\alpha_t}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_3}} \quad (2.15)$$

$$\lambda = 62,8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Majonin, 1976})$$

$$\alpha_3 = 5,58 + 3,95 * V / 2 \quad (2.16)$$

$$\alpha_3 = 8,54 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo en 2.15

$$K = 7,57 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Sustituyendo en 2.13

$$Q3 = 2 * 1,76 * 7,57 * [63,4 - 53] * 2 + (84,6 - 66) * 4 + (89,1 - 69) * 8 + (83,8 - 56) * 18 + (50,3 - 49) * 3 + (66,4 - 45) * 6$$

$$Q3 = 521094.6 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de fieltro (Q4) (kJ/h).

$$Q4 = 2 * K1 * F * (Tv_f - Tb1) * n_f \quad (2.17)$$

$$Q4 = 0$$

No existen cilindros secadores de fieltro en la sección de secado.

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de papel (Q5) (kJ/h).

$$Q5 = K2 * \pi * dp * [1 - Bp] * b + (1 - Bf) * (B - b) * [Tv1 - Tb1] * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + \dots + (Tv6 - Tb6) * n6 \quad (2.18)$$

Donde:

B : Ancho del cilindro en metros. Bf : Ancho del fieltro (m)

∂C Espesor del cilindro (m).

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha F} + \frac{\alpha c}{\lambda l} + \frac{1}{\alpha 3}}$$

$$K2 = 7.57 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$Q5 = 7.57 * 3.14 * 1.5 * [1 - 0.75] * 3.7 + (1 - 0.50)(4.16 - 3.7) + (4.16 - 0.5) * [63.4 - 53] * 2 + (84.6 - 66) * 4 + (89.1 - 69) * 8 + (83.8 - 56) * 18 + (50.3 - 49) * 3 + (66.4 - 45) * 6$$

$$Q5 = 576107.28 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro (Q6) (kJ/h).

$$Q6 = K2 * \pi * df * \left[(1 - Bf) * B + (B - Bfieltro) + nf(tuf - tb1) \right] \quad (2.19)$$

$$Q6 = 0$$

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores cubiertos de papel y fieltro (Q7) (kJ/h).

Tabla 5 Nomenclatura utilizada para el cálculo de Q7.

$K3$: Coeficiente de emisión térmica de los cilindros secadores de papel y fieltro	$\lambda1$: Coeficiente de termo conductividad del material en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$\partial1$: Espesor del papel (m)	$\lambda2$: Coeficiente de termo conductividad del papel en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
∂c : Espesor del cilindro (m)	$\lambda3$: Coeficiente de termo conductividad del fieltro en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$\partial2$: Espesor del fieltro (m)	$\alpha2$: Coeficiente de emisión térmico del fieltro al aire

$$Q7 = K3 * \pi * b * dp * Bf *$$

$$\left[(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + .. + (Tv6 - Tb6) n6 \right] \quad (2.20)$$

$$K3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha1} + \frac{\partial c}{\lambda1} + \frac{\partial1}{\lambda2} + \frac{\partial2}{\lambda3} + \frac{1}{\alpha2}} \quad (2.21)$$

$$K3 = 6,6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$Q7 = 6,6 * 3,14 * 3,7 * 1,5 * 05 * \left[(1 - 0,75) * 3,7 + (1 - 0,50)(4,16 - 3,7) + (4,16 - 0,5) \right] *$$

$$\left[(63,4 - 53) * 2 + (84,6 - 66) * 4 + (89,1 - 69) * 8 + (83,8 - 56) * 18 + (50,3 - 49) * 3 + (66,4 - 45) * 6 \right]$$

$$Q7 = 192188,16 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores cubiertos de papel; pero no cubiertos de fieltro (Q8) (kJ/h).

$$Q8 = K8 * D * \pi * B1 * (Bp - Bf) *$$

$$\left[(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + .. + (Tv6 - Tb6) n6 \right] \quad (2.22)$$

$$K5 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha1} + \frac{\partial c}{\lambda1} + \frac{\partial1}{\lambda2} + \frac{1}{\alpha2}} \quad (2.23)$$

$$K5 = 10,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Sustituyendo en 2.22

$$Q8 = 14705316 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros cubiertos de fieltro; pero no cubiertos de papel (Q9) (kJ/h).

$$Q9 = K3 * \pi * dp * (B - b) * Bf * [Tv1 - Tb1] * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + .. + (Tv6 - Tb6) * n6 \quad (2.24)$$

Sustituyendo en 2.24

$$Q9 = 3620,16 \text{ kJ/h}$$

Cálculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro cubiertos de fieltro (Q10) (kJ/h).

$$Q10 = K3 * \pi * dp * Bf * Bfieltro * [Tv1 - Tb1] * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6 \quad (2.25)$$

$$Q10 = 0$$

Sustituyendo en 3.2

$$Qump = 15536500,3 \text{ kJ/h}$$

$$Qtmp = 35678046.36 \text{ kJ/h}$$

$$\eta_{mp} = \frac{Qump}{Qtmp}$$

$$\eta_{mp} = 44 \%$$

Gasto específico de vapor. (Para 1 kg de papel).

$$Ga_{MP} = \frac{Qt}{i - c * t}$$

i : Contenido de calor de vapor vivo. 2732 kJ/kg

C: Capacidad calorífica del agua. 4.19 kJ/kg. °C

T: Temperatura del vapor vivo. 140 °C

$$Ga_{MP} = \frac{35633632,2}{2739-4,19-140}$$

$$Ga_{MP} = 16625 \text{ kg/h}$$

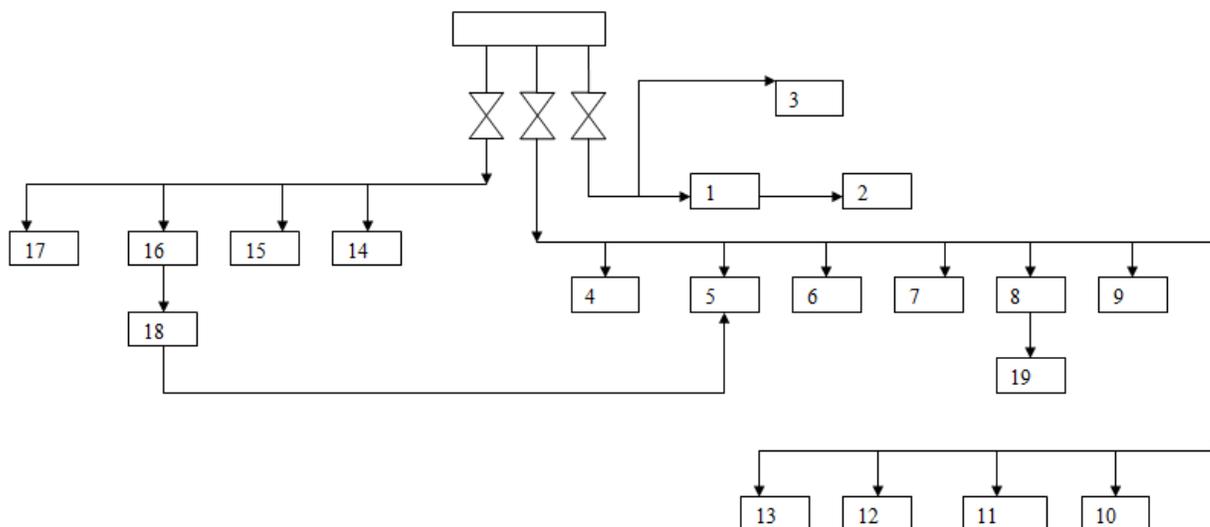
Anexo 6 Equipo de flotación por aire disuelto.

Tabla 6. Parámetros de diseño para equipos de flotación por aire disuelto. (Alibaba.Group, 2006)

Model	Flow Rate(m ³ /h)	Recycle Pump Power(kW)	Air Compressor Power(kW)	Overall Size(mm)
DAF-5	5	3	0.37	3200*1200*1200
DAF-10	10	3	0.37	4000*1200*1200
DAF-20	20	4	0.37	4800*1200*1500
DAF-30	30	4	0.37	5800*1500*1500
DAF-50	50	7.5	0.37	6500*1800*1800
DAF-80	80	7.5	0.55	7500*2000*2000
DAF-100	100	15	0.55	12500*2200*2000
DAF-150	150	18.5	0.75	14000*2200*2200
DAF-200	200	18.5	0.75	15500*2600*2200
DAF-250	250	22	1.1	16500*2800*2200
DAF-300	300	22	1.1	17500*2800*2400
DAF-350	350	22	1.1	18500*3600*2400
DAF-400	400	30	1.5	20000*3600*2600
DAF-450	450	30	1.5	21500*4000*2800
DAF-500	500	37	1.5	23000*4400*2800



Anexo 7. Diagrama de agua.



Leyenda del Diagrama de Agua

1-Tratamiento de la caldera	10-Depurador Terciario
2-Caldera	11-Turbo 1200HP
3-Torre de enfriamiento	12-Acondicionador de Paños
4-Dinapulper	13-Otros
5-Hidrapulper 16"	14-Torre de Alta Densidad
6-Hidrapulper 11"	15-Colador Cowan
7-Tanque de Almidón	16-Lavadora
8-Tanque Sello	17-Depurador
9-Fourdrinier	18-Tanque de Filtrado
	19-Bomba de Vacío

